

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**

**Přírodovědecká fakulta**

**Porovnání akustických vlastností  
prostor se zaměřením na  
srozumitelnost lidské řeči**

Bakalářská práce

**Miroslava Kozlová**

školitel: Ing. Ladislav Ptáček

České Budějovice 2015

## **Bibliografické údaje**

Kozlová M., 2015: Porovnání akustických vlastností prostor se zaměřením na srozumitelnost lidské řeči.

[The comparison of acoustic properties of interiors with focusing on speech intelligibility. Bc. Thesis, in Czech.] – 50 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

### **Anotace:**

Tato bakalářská práce se věnuje zkoumání akustických vlastností různých prostor a jejich následnému vyhodnocení dle účelu využití daného prostoru. Práce je rozdělena na část teoretickou, ve které je přiblížena fyzikální podstata zvuku, jeho vlastnosti a způsoby měření akustických veličin určených k jeho popisu, a část praktickou, kde jsou zpracovány výsledky akustického měření ve vybraných prostorech s různou účelností. Akustické měření je zaměřeno na dobu dozvuku a srozumitelnost.

Klíčová slova: zvuk, akustické měření, doba dozvuku, srozumitelnost řeči

### **Annotation:**

This bachelor thesis is devoted to examining the acoustic properties of different rooms. Subsequent evaluation of these properties is carried out according to the intended use of the space. This thesis is divided into two parts. The first is the theoretical part, in which the physical nature of sound and properties and methods of the measurements of acoustic quantities intended for its description are explained. The second part is the practical part, which presents the results of the acoustic measurements in selected interiors. Acoustic measurements are focused on reverberation time and speech intelligibility.

Key words: sound, acoustic measurement, reverberation time, speech intelligibility

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 24.4.2015

.....

Miroslava Kozlová

## **Poděkování**

Zde bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Ptáčkovi za odborné vedení a zapůjčení přístrojů pro akustická měření. Dále děkuji Bc. Janu Randlovi za cenné rady a připomínky, panu Janu Vozárymu za umožnění měření v prostoru hudebního klubu a panu Petru Michalovi za umožnění měření v nahrávacím studiu.

# Obsah

<b>I. ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>II. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>2</b>
1 ZVUK .....	2
1.1 Fyzikální podstata zvuku .....	2
1.2 Šíření zvuku .....	2
2 VNÍMÁNÍ ZVUKU .....	4
2.1 Sluchový orgán .....	4
2.2 Vlastnosti zvuku.....	7
2.3 Vliv zvuku na posluchače .....	11
3 PROSTOROVÁ AKUSTIKA .....	12
3.1 Geometrická akustika.....	12
3.2 Vlnová akustika .....	14
3.3 Statistická akustika.....	14
3.4 Dozvuk.....	16
3.5 Srozumitelnost .....	19
3.6 Akustická pohltivost .....	21
3.7 Úpravy uzavřených prostor .....	22
4 AKUSTICKÁ MĚŘENÍ .....	23
4.1 Měření doby dozvuku .....	24
4.2 Měření srozumitelnosti .....	25
4.3 Použité přístroje a software.....	25

<b>III. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>27</b>
5 AKUSTICKÉ MĚŘENÍ SPECIFICKÝCH PROSTOR .....	27
5.1 Podmínky pro umístění měřicí aparatury .....	27
5.2 Malá posluchárna .....	27
5.3 Velká posluchárna .....	31
5.4 Nahrávací studio .....	34
5.5 Zkušebna .....	37
5.6 Hudební klub .....	40
6 DISKUZE .....	44
<b>IV. ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>V. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>48</b>
<b>VI. PŘÍLOHY</b> .....	<b>50</b>
7 TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT .....	50
7.1 Měření doby dozvuku T20 .....	50
7.2 Měření doby dozvuku T30 .....	52
8 FOTOGRAFIE MĚŘENÝCH PROSTOR .....	55
8.1 Malá posluchárna .....	55
8.2 Velká posluchárna .....	56
8.3 Nahrávací studio .....	57
8.4 Zkušebna .....	58
8.5 Hudební klub .....	59

## **I. ÚVOD**

Účelem této bakalářské práce je poukázat na odlišné požadované akustické vlastnosti prostor s ohledem na způsob využití a jejich následné zjištění praktickým měřením. Začátek práce je věnován fyzikálnímu pojetí zvuku s návazností na biologii člověka, kde je přiblíženo zpracování zvuku lidským uchem. V další kapitole jsou představeny fyzikální veličiny, které slouží k popisu zvuku a způsoby jejich měření. Teoretickou část pak uzavírá kapitola o provádění akustického měření doby dozvuku a srozumitelnosti lidské řeči. V praktické části je uvedeno akustické měření v těchto prostorech: velká posluchárna, malá posluchárna, nahrávací studio, zkušebna a hudební klub. Výsledky měření jsou u každého prostoru srovnány s doporučenými hodnotami z normy ČSN 73 0527 a diskutovány.

## **II. TEORETICKÁ ČÁST**

### **1 ZVUK**

K popisu zvuku máme rozmanité možnosti a můžeme na něj pohlížet z mnoha perspektiv. Například pro pochopení jeho šíření zvolíme čistě fyzikální pohled, zatímco pro popis jeho vlivu na psychiku člověka zvolíme pohled hudební či psychoakustický. Ději, které souvisí se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem se zabývá fyzikální obor akustika, který má dnes již mnoho odvětví.

#### **1.1 Fyzikální podstata zvuku**

Fyzikální podstatou slyšitelného zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí. Toto kmitání je ve frekvenčním rozsahu zhruba 20 Hz až 20 kHz lidským sluchem vnímáno jako zvuk. Frekvence mimo tento rozsah nejsou slyšitelné lidským uchem. Jsou-li menší než 20 Hz, pak mluvíme o infrazvuku a jsou-li větší než 20 kHz, jedná se o ultrazvuk. V této práci se zaměříme pouze na slyšitelné pásmo [1].

Zvuk, který je charakterizován sinusovými změnami akustického tlaku, se z hlediska hudební akustiky nazývá jednoduchý tón. Tyto jednoduché tóny se však v hudbě ani v přírodě téměř nevyskytují. Zvuky, které vydávají hudební nástroje a které nazýváme tóny, jsou složeny z jednoduchých tónů [2].

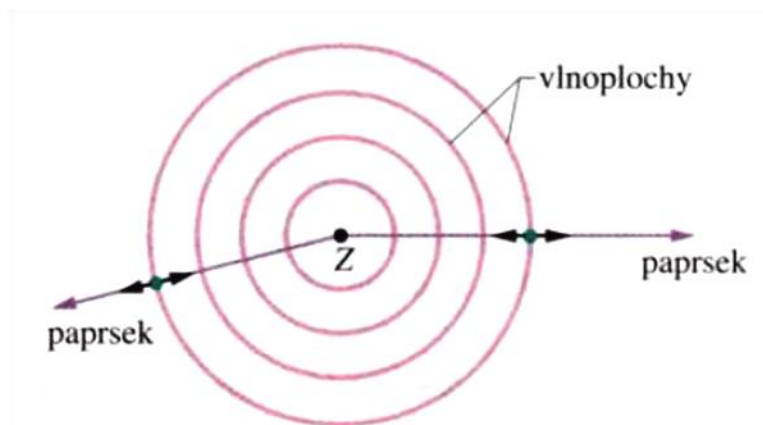
#### **1.2 Šíření zvuku**

Zvuk se dokáže šířit v plynech, kapalinách i pevných látkách ve formě akustického vlnění. V homogenním izotropním prostředí, kde rychlost šíření nezávisí na směru, se šíří toto vlnění přímočaře. Ve fyzice rozlišujeme dva druhy vlnění dle toho, v jakém směru částice kmitají, a to vlnění příčné a podélné. Zvuk se šíří jako vlnění podélné. V pevných látkách se může šířit i jako vlnění příčné [1].

Ve vzduchu se tedy zvuk šíří jako podélné postupné vlnění. Při spuštění libovolného zvukového (pro jednoduchost bodového) zdroje se jeho mechanické chvění přenáší do vzduchu prostřednictvím periodických změn tlaku vzduchu. To také znamená, že šíření zvukového vlnění je podmíněno látkovým prostředím (ve vakuu zvukové vlnění nevznikne). Od bodového zdroje (zdroje o zanedbatelných rozměrech) se zvukové vlnění šíří



rovnoměrně do všech směrů a směr šíření a rozložení zvukových vln se znázorňují pomocí vlnoploch a paprsků viz obrázek č. 1.



**Obrázek č. 1:** Zvukové vlny se šíří trojrozměrným prostředím od zdroje Z. Vlnoplochy vytvářejí koule se středem v bodě Z. Paprsky mají radiální směr od Z. Krátká oboustranná šipka naznačuje směr kmitů částic prostředí; je rovnoběžný s paprsky [3].

Důležitým parametrem pro šíření zvukového vlnění je rychlost zvuku v daném prostředí. Ta se dá vyjádřit výrazem

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1)$$

kde  $K$  je modul objemové pružnosti daného prostředí a  $\rho$  je jeho hustota (uvažujeme-li tekutiny). K této rovnici se můžeme dostat jednoduchým odvozením a to přímo z druhého Newtonova zákona viz [3]. Rychlosti šíření zvuku v různých látkách jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Látka	$v$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Látka	$v$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
Oxid uhličitý	260	Mořská voda	1500
Kyslík	317	Kaučuk	40
Vzduch 0 °C	331	Korek	500
Dusík	336	Olovo	1300
Vzduch 20 °C	343	Ebonit	1570
Vodní pára	405	Beton	1700
Svítiplyn	453	Stříbro	2700
Helium	971	Platina	2800
Vodík	1270	Led	3200
Diethylether	1020	Mosaz	3400
Benzín	1170	Dřevo dubové	3400
Methanol	1240	Měď	3500
Rtuť	1400	Cihly	3600
Voda 4 °C	1400	Ocel	5000
Voda 13 °C	1440	Hliník	5100
Voda 25 °C	1500	Sklo	5200

**Tabulka č. 1:** Rychlost šíření zvuku v různých látkách, kde  $v$  je rychlost šíření zvuku.

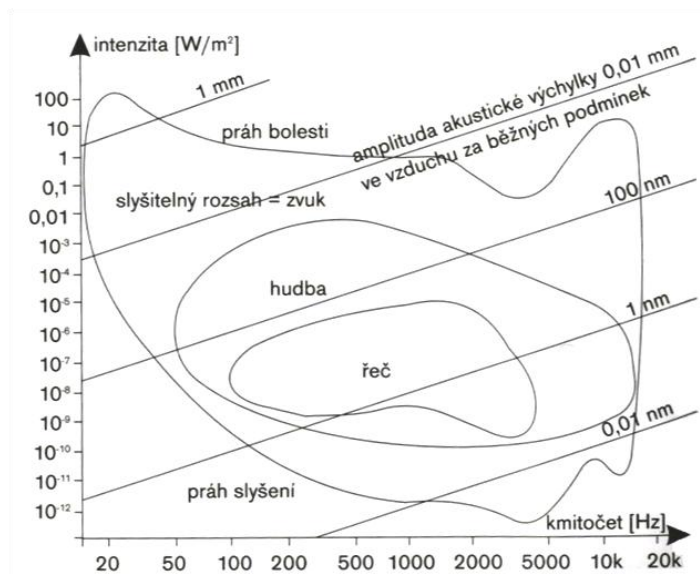
Není-li uvedena teplota, jde o rychlost při běžných teplotách (okolo 20 °C) [8].

## 2 VNÍMÁNÍ ZVUKU

Pod pojmem vnímání zvuku máme vždy na mysli určité fyziologické procesy, které člověku umožňují zpracovávat zvukové vlnění z okolního prostoru. Tím mu umožňují komunikovat s druhými a zároveň v člověku tento zpracovaný zvuk dokáže vyvolat určité pocity dle toho, zda je jedincem zvuk vnímán jako příjemný, rušivý či esteticky hodnotný jako například hudba. Samozřejmě, jelikož se jedná o subjektivní zpracování, nelze tvrdit, že každý člověk má vnímání zvuku nastavené na stejné hodnocení, a proto, například v oblastech vyhodnocování hluku prostředí, jsou nastavené normy přizpůsobené průměru.

### 2.1 Sluchový orgán

Spojení „slyšitelný zvuk“ je terminologicky nesprávný pleonasmus, protože každý zvuk je slyšitelný. Neexistuje neslyšitelný zvuk [4]. U člověka je však oblast slyšení omezena a to, jak již bylo uvedeno výše, na frekvenční rozmezí cca 20 Hz až 20 kHz a z hlediska intenzity vnímaného zvuku se hodnota přibližně  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> udává jako práh lidského slyšení a hodnota 10 W/m<sup>2</sup> jako práh bolestivosti.



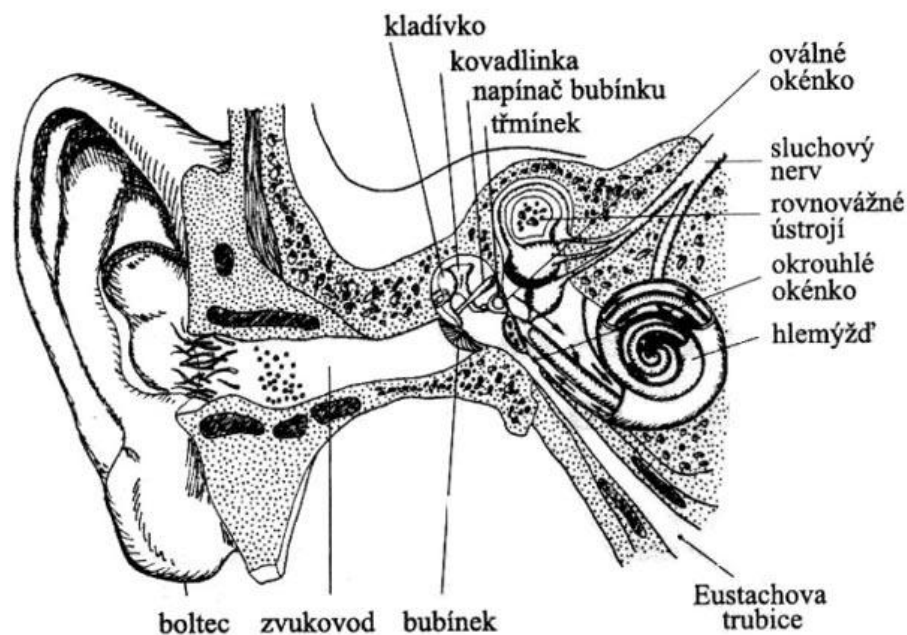
**Obrázek č. 2:** Slyšitelný rozsah kmitočtů a intenzit mechanického kmitání omezený prahem slyšení a prahem bolesti a přibližné rozsahy hudby a lidské řeči [4].

Vnímání zvuku je obecně velmi složitý proces a do dnešního dne stále nejsou objasněny všechny podrobnosti lidského slyšení. Míru složitosti tohoto mechanismu navyšují procesy ryze biologického charakteru, které v obecném fyzikálním pojetí nelze přesně vyjádřit.

Lidské ucho se skládá z vnějšího, středního a vnitřního ucha, viz obrázek č. 3.

### 2.1.1 Vnější ucho

Vnější ucho se skládá z boltce a zvukovodu a jeho funkcí je zejména schopnost určovat směr, ze kterého zvuk přichází, udává se, že tato schopnost se projeví až od frekvencí cca 500 Hz. Ve zvukovodu se pak následně zvuk, je-li ve frekvenčním pásmu v rozsahu 2 - 6 kHz, dostává do rezonance, což zapříčiňuje změny akustického tlaku pro tyto určité frekvence na konci zvukovodu (např. pro frekvence okolo 4 kHz zapříčiňuje nárůst akustického tlaku až o 10 dB) [2].



**Obrázek č. 3:** Sluchový orgán [2].

### **2.1.2 Střední ucho**

Na samém začátku středního ucha nalezneme tzv. bubínek, jenž je tvořen blánkou z tenkého vaziva, na kterou působí změny tlaku způsobené dopadajícím zvukem. Do středního ucha zasahuje také Eustachova trubice, která je spojnici mezi dutinou středního ucha a nosohltanem a umožňuje tak vyrovnání tlaku na obou stranách bubínku. Chvění bubínku se mechanicky přenáší skrze střední ucho do ucha vnitřního (pro jejich složení opět viz obrázek č. 3) a vnitřní ucho pak představuje odpor pro další vedení zvuku. Ve středním uchu ještě nalezneme dva malé svaly, a to: napínač bubínku a třmínkový sval, které mají hlavně ochrannou funkci při pobytu v nadměrně hlučném prostředí, začínají však pracovat již při hladině akustického tlaku nad 70 dB [2].

### **2.1.3 Vnitřní ucho**

Ve vnitřním uchu se amplitudy zvukových vln z bubínku přemění na menší vibrace za vyššího tlaku. Vnímání zvuku nervy se uskutečňuje podél tzv. hlemýžďe, který se odborně nazývá basiální membrána ušního závitku, a zde také nastává frekvenční analýza zvuku. Zvuky s různými frekvencemi zaznamenává tato membrána vnitřního ucha jako maximální záchvěvy v různých vzdálenostech od oválného okénka (opět viz obrázek č. 3). Tyto maximální záchvěvy mají široký rozsah, a čím má zvuk frekvenci nižší, tím větší je

vzdálenost zachycovaného maxima od vstupního oválného okénka. Detailnější frekvenční analýza probíhá ještě přímo v nervovém systému [1].

## 2.2 Vlastnosti zvuku

Vlastnosti zvuku jsou obecně velice široký pojem a zde bych zmínila jen výběr těch nejdůležitějších parametrů. V každodenním životě se setkáváme s pojmy, jako jsou výška, ostrost či hlasitost zvuku a všechny zastupují určitou vlastnost vnímaného zvuku.

### 2.2.1 Akustický tlak a intenzita zvuku

V obecnější rovině nás zajímá případná veličina, která nám zvuk určitým způsobem popíše, a navíc se dá přímo změřit měřicím přístrojem. Takovoto vlastnosti splňuje akustický tlak, který je označován klasicky  $p$  s jednotkou pascal [Pa]. K jeho srozumitelnému vyjádření se používá nejčastěji tzv. hladina akustického tlaku  $L_p$  s vyjádřením v decibelech [dB], jejíž definice je následující:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_{\text{ref}}^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{\text{ref}}} \quad (2)$$

Tato definice vyplývá z vyjádření pro hladinu intenzity zvuku, což je další důležitá veličina popisující zvuk, ale její přímé měření je složitější než měření hladiny akustického tlaku. Její definice je:

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} \quad (3)$$

U obou definic  $p_{\text{ref}}$  a  $I_{\text{ref}}$  označují prahové hodnoty lidského slyšení pro akustický tlak a intenzitu zvuku při 1 kHz. Pro hladinu akustického tlaku je tedy prahová hodnota  $p_{\text{ref}} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa a pro hladinu akustické intenzity  $I_{\text{ref}} = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>. Rozdíl v měření těchto dvou veličin tkví v tom, že intenzita závisí i na směru šíření zkoumaného zvuku a je tedy vektorovou veličinou, zatímco akustický tlak je veličina skalární a snadněji měřitelná. I přes tento fakt mohou obě veličiny, jak hladina akustické intenzity, tak i hladina akustického tlaku, nabývat stejných hodnot a to v případě, že plocha, na které zjišťujeme intenzitu, je kolmá na směr šíření vyšetřovaného zvuku [4].

Obecný vztah mezi hladinou intenzity zvuku a hladinou akustického tlaku se dá vyjádřit tímto vztahem:

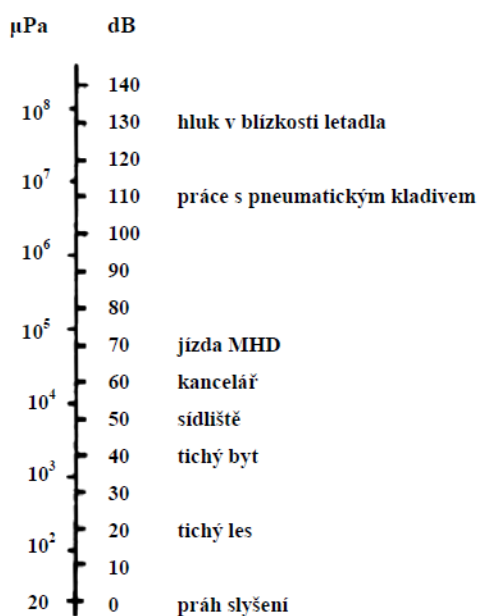
$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{\text{ref}}} = 10 \cdot \log \frac{\frac{p^2}{\rho \cdot c}}{\frac{p_{\text{ref}}^2}{\rho_0 \cdot c_0}} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{\text{ref}}} + 10 \cdot \log \frac{\rho_0 \cdot c_0}{\rho \cdot c}, \quad (4)$$

kde součin  $\rho \cdot c$  vyjadřuje měrný vlnový odpor prostředí, kterým se akustická vlna šíří. Při běžných klimatických podmínkách nabývá poslední člen tohoto vyjádření hodnoty - 0,2 dB, takže následně můžeme rovnici přepsat do tvaru:

$$L_I = L_p - 0,2 \cong L_p \quad (5)$$

Tento výraz má hlavní uplatnění v oboru technické akustiky, jelikož díky němu jsme schopni určit hladinu intenzity zvuku na základě měření hladiny akustického tlaku a předešlý člen nabývající hodnoty - 0,2 dB se zanedbá [1].

Pro bližší představu o nabývajících hodnotách hladiny akustického tlaku je zde zobrazena na obrázku č. 4 stupnice s odpovídajícími běžně známými prostředími ze života člověka.



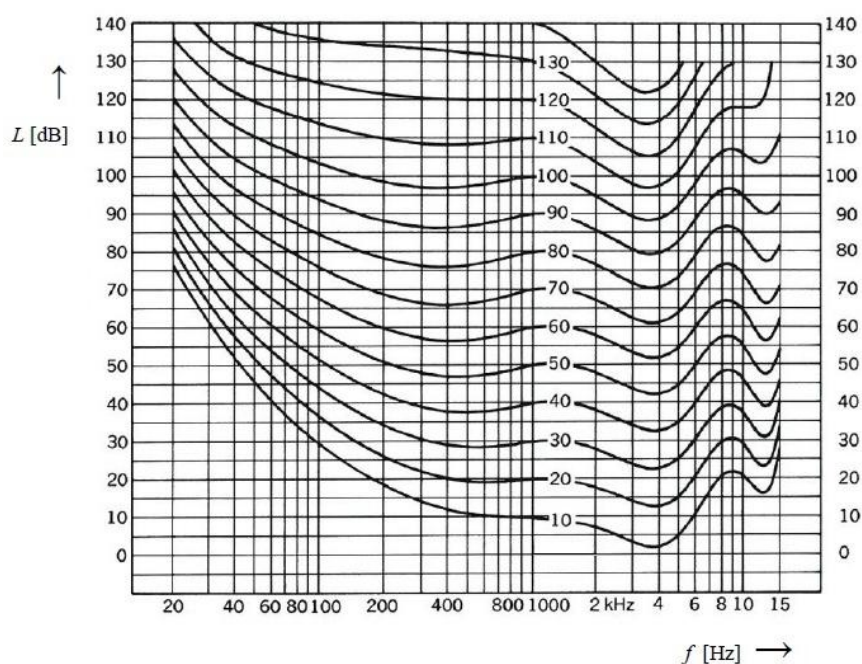
**Obrázek č. 4:** Hladiny akustického tlaku a akustický tlak v různém prostředí [1].

## 2.2.2 Hlasitost

Další veličinou, jež nám popisuje vlastnosti zvuku, a v běžném životě je jí často hovorově užíváno, je hlasitost zvuku. V technické akustice není příliš využívána, jelikož se jedná o veličinu čistě subjektivního charakteru. Určuje ji subjektivní hodnocení intenzity zvukového vjemu určitých osob a její označení v literatuře je nejčastěji  $N$ . Také byla zavedena hladina hlasitosti  $L_N$  díky běžnějšímu hladinovému vyjadřování akustických veličin, avšak její jednotkou není decibel, ale fon [Ph]. Vztah mezi hladinou hlasitosti a hlasitostí je určen následovně:

$$L_N = 40 + 33,2 \cdot \log N, \quad (6)$$

kde číslo 40 vyjadřuje hladinu akustického tlaku vybraného referenčního tónu. Hladina hlasitosti určitého zvuku ve fonech souhlasí číselně s hladinou intenzity čistého tónu (při frekvenci 1 kHz, v jednotkách dB) přicházejícího z přímého směru a ve formě rovinných postupných vln, o kterém posluchač prohlásí, že je stejně hlasitý jako zkoumaný zvuk. Takže z této definice vyplývá, že pro tón o frekvenci 1 kHz je hladina hlasitosti číselně shodná s hladinou intenzity. Díky hlasitosti a jejím mnohačetným subjektivním testům máme dnes k dispozici tzv. křivky stejné hlasitosti, které jsou již mezinárodně normovány a tento normovaný svazek křivek stejné hlasitosti je zobrazen v obrázku č. 5 [2].



Obrázek č. 5: Křivky stejné hlasitosti [2].

Obrázek č. 5 také ukazuje, jak jsou křivky stejné hlasitosti čistých tónů závislé na frekvenci. Svislé stupnice jsou logaritmické, což je v souladu s Weber-Fechnerovým zákonem, který zní: Hlasitost daného tónu roste řadou aritmetickou, roste-li jeho fyzikální intenzita řadou geometrickou [1], či formulováno dle jiného zdroje: Intenzita počitku je úměrná logaritmu podnětu [4]. Křivky stejné hlasitosti sestavené pro určité čisté tóny nám popisují míru citlivosti lidského sluchového orgánu na různé frekvence a hladiny hlasitosti, a tedy jak je z obr. č. 5 patrné, pro stejný subjektivní vjem ze zvuku nízkofrekvenčního a vysokofrekvenčního se musí jednoznačně zvýšit hladina akustického tlaku u zvuku s nízkou frekvencí [1].

### **2.2.3 Výška**

Další možnou subjektivní veličinou charakterizující zvuk je výška. Výška jednoduchého tónu souvisí s jeho frekvencí i intenzitou a rozlišuje se navíc, zda-li jde o absolutní výšku tónu, relativní výšku tónu či subjektivní výšku tónu.

Absolutní výška je určena čistě jen frekvencí daného tónu a její jednotkou je hertz (stejně jako pro prakticky měřenou frekvenci), ale je vztažena na případ, kdy hladina akustického tlaku nabývá hodnoty 40 dB. Toto určení výšky se uplatňuje zejména v oblasti hudby, kde se jednotlivé tóny řadí dle hudební stupnice.

Relativní výška tónu je definována jako srovnání výšky zkoumaného tónu s výškou nějakého daného referenčního tónu a opět je tato výška využívána v hudbě, konkrétněji v oblasti hudebních intervalů.

Subjektivní výšku tónu lze určit pomocí čistě subjektivního hodnocení tónů a její jednotkou je mel. Posluchači je dán vztažný tón (většinou o frekvenci 1 kHz nebo 440 Hz) a poté má za úkol určit tón, o kterém usoudí, že jeho výška je buď poloviční, nebo dvojnásobná oproti vztažnému tónu. Takto pak lze sestavit numerickou stupnici výšky tónu, která ale nijak neodpovídá frekvenční ani hudební stupnici [2].

### **2.2.4 Ostrost**

Ostrost je dalším výrazným rozlišovacím znakem pro zvuk přispívající k přiblížení tzv. barvy zvuku. Její jednotkou je acum, který je definován následovně: 1 acum je ostrost úzkopásmového šumu o kritické šířce pásma se střední frekvencí 1 kHz a hladinou akustického tlaku 60 dB [2]. Kritická šířka pásma souvisí s jevem nazvaným maskování



(změny vjemu dvou a více najednou přijímaných zvukových signálů lidským uchem) a její velikost se udává přibližně 20% střední frekvence pásma ( $0,2 \cdot f$ ). Jedná se však jen o zjednodušující vztah, který je platný od frekvence pásma cca 500 Hz.

Ostrost byla také experimentálně zkoumána a výsledky četných experimentů ukázaly, že změnu v ostrosti zvuku ovlivňuje tvar obálky spektra daného zvuku. Z tohoto poznatku tedy vyplývá, že ostrost se nemění se strukturou spektra (spojité, diskrétní), jestliže obálky těchto spekter jsou shodné [2].

### 2.3 Vliv zvuku na posluchače

Vnímání zvuků z okolí je pro člověka důležitým zdrojem informací. Umožňuje nám komunikaci s druhými prostřednictvím řeči, upozorňuje nás na případná nebezpečí v naší blízkosti atd. Samozřejmě i toto vnímání s sebou přináší vedle mnoha výhod i řadu škodlivých dopadů na lidský organismus a to zejména účinkem nežádoucího hluku.

Za hluk se označuje většinou takový zvuk, který zapříčiňuje nepříjemné a rušivé vjemy či má přímý škodlivý účinek na organismus člověka. Vyhodnocování nepříjemnosti určitého zvuku je opět na subjektivním posouzení posluchače, a tedy nelze s jistotou tvrdit, že určitý zvuk je nepříjemným pro každého posluchače. Obecně je hluk rozdělován na tzv. habituální hluk a emoční hluk a to dle fyziologické reakce člověka. Vnímá-li člověk hluk jako známý a běžný, jedná se o habituální hluk, ale naopak jde-li o nový či určitým způsobem varující hluk, jde o hluk emoční (např. zvuk sirény). Oba dva druhy ovlivňují fyziologii člověka a to například zvýšením krevního tlaku, změnou hladiny adrenalinu a kvality spánku.

Je třeba také zmínit nejzákladnější negativní vliv hluku a tím je možné poškození sluchu, které může být dočasného i trvalého charakteru. Většinou jde o následek vystavení velmi intenzivnímu zvuku, při kterém dojde ke změnám na smyslových a nervových buňkách, které jsou po nějaký čas vratné. Dočasné poškození sluchu se také nazývá jako sluchová únava a projevuje se dočasným zvýšením prahu slyšitelnosti. Avšak při dlouhodobém či často opakujícím se vystavení takovému nadměrnému hluku nastalé změny již nejsou vratné a dochází k trvalému posunutí prahu slyšitelnosti. K tomuto posunutí dochází také vlivem pokročilého věku u člověka. Mezi časté poruchy patří šelest v uchu (*tinnitus*), kdy postižená osoba neustále slyší pískání či jiný podobně nepříjemný zvuk. Toto pískání může mít úroveň i několik desítek dB, což může mít v některých extrémních případech za následek psychické poruchy, někdy vedoucí dokonce až k sebevraždě. Pak to je také

akustické trauma, které má za následek přímé poranění sluchového aparátu. Toto nebezpečí hrozí při vystavení člověka tlakovým impulsům s hladinami nad 130 dB, kdy dochází ke krvácení z uší, a může být při něm nevratně poškozen bubínek, kůstky středního ucha i basiální membrána ušního závitku [2].

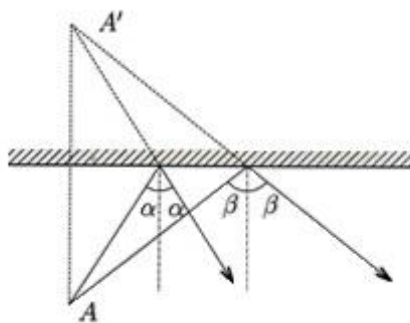
### **3 PROSTOROVÁ AKUSTIKA**

Prostorová akustika je vědním a technickým oborem zabývajícím se akustičností prostoru, tedy šířením zvuku v prostoru z hlediska jakosti poslechu zvuku [5]. Jejím cílem je dosáhnout takové akustické kvality určeného prostoru, aby pak svými vlastnostmi uspokojil nároky posluchačů. Samozřejmě vždy záleží na účelnosti prostoru, zda se jedná například o přednáškovou místnost či hudební sál, protože pak se privilegovaná kritéria budou zajisté lišit např. takovým způsobem, že u zmíněného přednáškového sálu se zaměříme na srozumitelnost řeči, naopak u koncertního sálu na kvalitu poslechu hudby. Prostorová akustika zkoumá zvukové pole těchto prostorů pomocí metod geometrické, vlnové a statistické akustiky.

#### **3.1 Geometrická akustika**

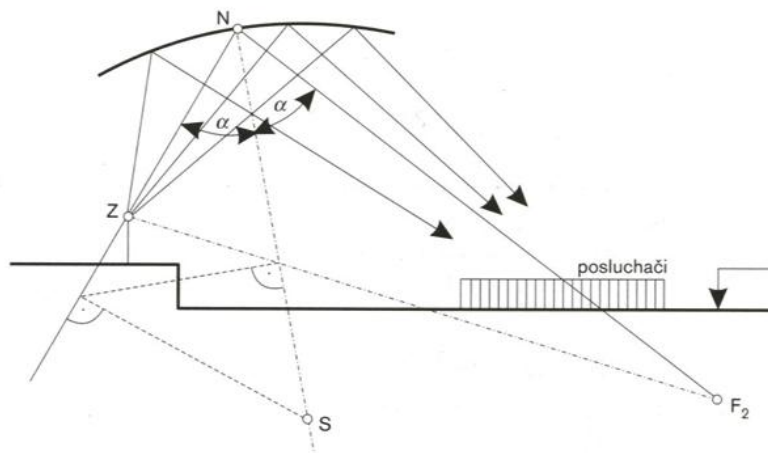
V geometrické akustice se využívá předpokladu limitního případu zvukových vln o malých vlnových délkách ve srovnání s rozměry uzavřeného prostoru, z čehož tedy plyne, že se jedná o vysokofrekvenční zvuk. Pro lepší představu např. pro frekvenci 1 kHz je vlnová délka přibližně 34 cm [2].

Podobně jako v optice je základním prvkem v geometrické akustice tzv. zvukový paprsek a lze si ho představit jako malou výseč kulové vlny vycházející z jednoho bodu určitou malou štěrbinou. Pro tento paprsek také platí známý zákon, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu, a to díky zanedbání difrakce vlnění v celé geometrické akustice. Z tohoto předpokladu vyplývá, že zvukové paprsky lze považovat za přímky. Dalším zjednodušením v geometrické akustice je neuvažování fáze zvukových vln při interferenci, a tedy se sčítají pouze jejich amplitudy [2]. Na obrázku č. 6 je naznačen základní princip řešení šíření zvukového paprsku v případě, že odrážející plochou je rovina, a jde o tzv. zrcadlení zdrojů.



**Obrázek č. 6:** Odraz paprsků od rovinné stěny [2].

V běžných stavbách se však nevyskytují pouze rovinné plochy, takže bychom pro každý paprsek museli hledat vlastní zrcadlový zdroj. Zákon o dopadu a odrazu však platí stále, takže se paprsky dopadající na zakřivenou plochu, chovají podobně jako světelné paprsky dopadající na zrcadla v geometrické optice, jako příklad viz obr. č. 7 s odrazy paprsků do hlediště koncertního sálu. Avšak dopadne-li zvukový paprsek na stěnu, není od ní odražen úplně, ale část jeho energie se pohltí. Míru pohltivosti určuje tzv. činitel zvukové pohltivosti s označením  $\alpha$ , který je definován jako poměr energie pohlcené ku energii dopadající [2].



**Obrázek č. 7:** Konstrukce stropu tvaru eliptického válce [4].

Nemůžeme-li předpokládat že rozměry stěn jsou mnohonásobně větší než vlnová délka dopadajícího zvuku, pak již zákon o dopadu a odrazu nemůžeme použít. V tomto případě dochází i k ohybu a rozptylu popadajících paprsků a takovéto odrazy se pak nazývají difúzní odrazy, či částečně difúzní odrazy [2].

### 3.2 Vlnová akustika

Před nastíněním základních principů vlnové akustiky je důležité znát pojem rychlostní potenciál, ze kterého následně budeme vycházet. Rychlostní potenciál je hypotetická veličina (označována  $\Phi$ ) usnadňující vyšetřování zvukových polí a platí pro ni vztah:

$$\text{grad}\Phi = \vec{v} \quad (7)$$

Základem vlnové akustiky je řešení obecné vlnové rovnice, do kterého se zahrnují i její okrajové podmínky. Pro zmíněný rychlostní potenciál má tvar:

$$\Delta\Phi - c_0^{-2} \cdot \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

Okrajové podmínky v tomto případě slouží pro zahrnutí vlastností stěn (včetně podlahy a stropu) do řešení zvukového pole dané místnosti. Pro reálné prostory je velice obtížné nalézt tyto okrajové podmínky a řešení vlnové rovnice se pak potýká s velkou výpočetní náročností. Zvuková pole je možné vyšetřovat prostřednictvím řešení vlnové rovnice díky numerickým postupům [2].

### 3.3 Statistická akustika

Jelikož řešení zvukového pole v uzavřeném prostoru je obtížnou úlohou (uvažujeme-li difúzní zvukové pole), v běžné praxi se využívá některých zjednodušujících předpokladů, díky kterým jsme pak schopni určit hledané energetické veličiny pomocí statistické teorie.

Tuto statistickou teorii vypracoval na počátku minulého století americký fyzik Wallace Clement Sabine a jeho výchozí myšlenka byla taková, že doba dozvuku charakterizuje energetickou bilanci v určeném prostoru a je závislá na pohltivosti stěn a celkovém množství zvukové energie v prostoru [2].

Předpoklady statistické akustiky jsou následující:

- 1) Ve všech bodech uzavřeného prostoru je objemová hustota zvukové energie konstantní. Hustota zvukové energie je dána součtem energie přicházející přímo od zdroje zvuku a energie, která se do daného bodu dostane díky odrazům.

- 2) V každém elementu uzavřeného prostoru je celková energie dána součtem středních hodnot všech energií, které do daného bodu dospěly díky odrazům od stěn (popřípadě i překážek).
- 3) Všechny úhly dopadu zvukových vln do libovolného bodu jsou stejně pravděpodobné [2].

Je-li tedy do daného uzavřeného prostoru přiváděn nepřetržitý akustický výkon, který je v určité míře pohlcován při dopadech zvukových vln na stěny místnosti, bude zde jistě platit zákon o zachování energie, který lze zapsat ve tvaru:

$$(W - W_p)d\tau = Vdw, \quad (9)$$

kde  $W$  je vyzařovaný akustický výkon zdroje,  $W_p$  je pohlcovaný akustický výkon,  $V$  je objem místnosti a  $w$  je hustota akustické energie. Množství pohlcovaného akustického výkonu lze vyjádřit výrazem:

$$W_p = \frac{1}{4}wc\alpha_m S, \quad (10)$$

kde zlomek  $\frac{wc}{4}$  udává množství energie dopadající za sekundu na jednotku plochy ( $c$  je v tomto případě rychlost zvuku),  $S$  je součet všech ploch ohraničujících místnost a  $\alpha_m$  je tzv. střední činitel zvukové pohltivosti, který lze určit z nám známých činitelů pohltivosti jednotlivých ploch dle vzorce:

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad (11)$$

Dosazením výrazů (10) a (11) do rovnice (9) získáme diferenciální rovnici ve tvaru:

$$\frac{V}{W - w \frac{c\alpha_m S}{4}} dw = d\tau \quad (12)$$

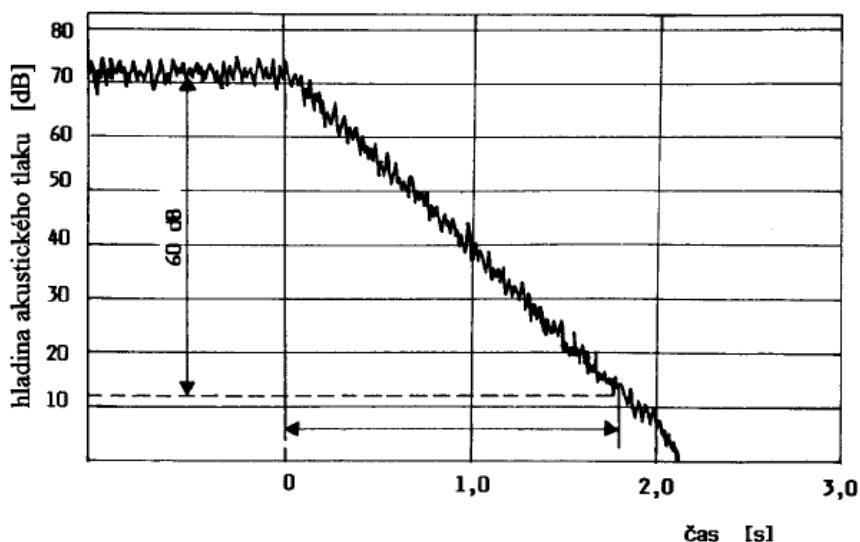
A jejím řešením je výraz pro okamžitou hodnotu hustoty akustické energie:

$$w = \frac{4W}{c\alpha_m S} \left(1 - e^{-\frac{c\alpha_m S}{4V}\tau}\right) + w_0 e^{-\frac{c\alpha_m S}{4V}\tau}, \quad (13)$$

kde  $w_0$  je hustota akustické energie na počátku v čase  $\tau = 0$  [1]. Toto řešení nám poslouží v další kapitole s charakterizací doby dozvuku potřebné pro statistickou teorii prostorové akustiky.

### 3.4 Dozvuk

Ve statistické akustice je hlavním parametrem energetické bilance uzavřeného prostoru podle Sabineho teorie prostorové akustiky tzv. doba dozvuku. Tuto dobu lze prakticky měřit v uzavřených prostorech při vypnutí zdroje zvuku. Doba dozvuku je definována jako doba, za kterou hustota zvukové energie klesne na  $10^{-6}$  původní hodnoty [2], resp. doba, za kterou se sníží hladina akustického tlaku v poli odražených vln o 60 dB [4]. Názorně je tato doba vidět na obrázku č. 8, kde je zobrazen časový průběh poklesu hladiny akustického tlaku.



**Obrázek č. 8:** Časový průběh hladiny akustického tlaku při vypnutí zdroje zvuku [1].

V předcházející podkapitole jsme již dospěli k řešení diferenciální rovnice, která vyjadřovala zákon zachování energie, a toto řešení definovalo okamžitou hodnotu hustoty akustické energie  $w$ . A tedy díky řešení diferenciální rovnice (13), lze tuto definici zapsat jako:

$$\frac{w}{w_0} = 10^{-6} = e^{-\frac{c\alpha_m S}{4V}\tau}, \quad (14)$$

z čehož po úpravách dostaneme výraz určující dobu dozvuku:

$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha_m S} \quad (15)$$

Tato závislost v praxi platí poměrně přesně pro malé činitele pohltivosti  $\alpha$ , jestliže však je konstanta úměrnosti zvýšena takto:

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha_m S} \quad (16)$$

Obecně je výraz (16) v literatuře označován jako doba dozvuku podle Sabineho. Následně s rostoucími činiteli pohltivosti svou přesnost začne ztrácet. Vysvětlení nám dá nabývající hodnota  $T$  v případě  $\alpha_m = 1$ , která by měla být  $T = 0$ , ale není, což je v rozporu s praktickým měřením. Podobný rozpor nastane, pokud by měly stěny dokonalou odrazivost  $\alpha_m = 0$ . Pak by doba dozvuku byla podle (16) nekonečná, což vzhledem k útlumu prostředí není v pořádku. Těmito problémy u Sabineho vzorce se zabýval americký fyzik C. F. Eyring a podařilo se mu tento vzorec pro výpočet doby dozvuku zpřesnit. Uvažoval o změnách akustické energie jako o nespojitých procesech, tedy že úbytky akustické energie nastávají ve skocích a to při každém odrazu zvukové vlny od stěny [1]. Jeho výsledný vzorec je:

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_m)} = 0,164 \frac{V}{S \alpha_E}, \quad (17)$$

kde  $\alpha_E = -\ln(1 - \alpha_m)$  je tzv. Eyringův činitel zvukové pohltivosti. V případě pro  $\alpha_m = 1$  nastává rozdíl ve výsledku oproti Sabineho vzorci a výsledkem je očekávaná hodnota  $T = 0$ . Doba dozvuku určená pomocí tohoto vzorce se nazývá doba dozvuku podle Eyringa a je poměrně přesná i pro větší činitele zvukové pohltivosti [2].

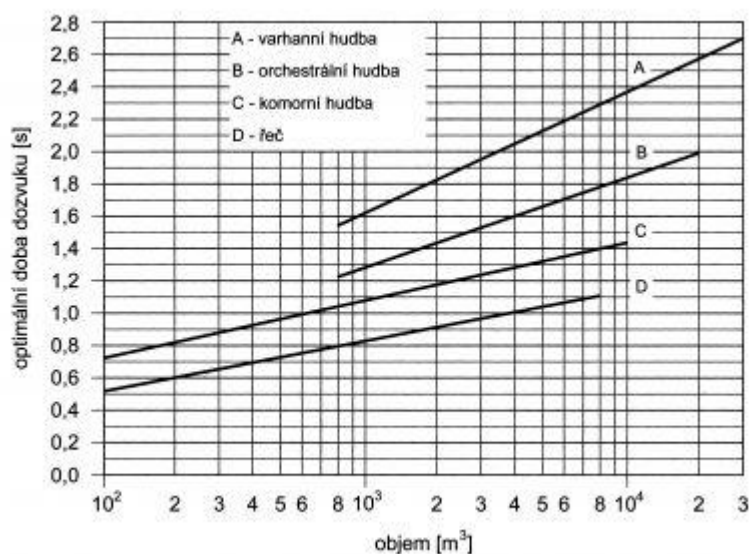
Dalším fyzikem, který se zabýval určováním doby dozvuku v uzavřeném prostoru, byl Millington. Ten změnil předpoklad Sabineho a Eyringa, který tvrdil, že se zvukový paprsek odráží stále od stejně pohltivé plochy nebo se od všech ploch odráží stejněkrát, a to tak, že předpokládal odrazy od různých povrchů s odlišnými činiteli pohltivosti. Tuto myšlenku vyjádřil ve vztahu:

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (18)$$

V literatuře se toto vyjádření nazývá doba dozvuku podle Millingtona a je nejvhodnější z uvedených vztahů pro prostředí s  $\alpha_m > 0,8$  [16]. Bohužel pro všechny zmíněné vzorce narážíme na problém v případě, že  $\alpha \rightarrow 0$ . Tento problém se snažil vyřešit americký fyzik V. O. Knudsen, který navíc uvažoval ztráty akustické energie vlivem absorpce při samotném šíření zvuku prostorem. Velikost této absorpce vyjádřil součinem  $4mV$ , kde  $m$  je činitel útlumu zvuku, který závisí především na relativní vlhkosti vzduchu, a  $V$  je objem místnosti. Vliv absorpce se uvažuje zejména ve výpočtech s vyššími frekvencemi (cca nad 2 kHz) a s objemy místností větších než  $2000 \text{ m}^3$  [1]. Výpočtový vztah pro dobu dozvuku s uvažováním Knudsenova součinu a Millingtonova vzorce je tedy:

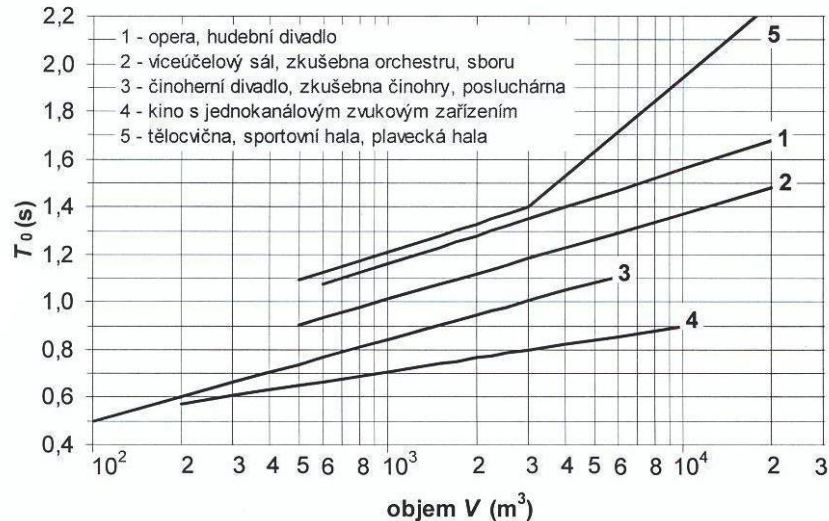
$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad (19)$$

Optimální dobu dozvuku různých prostor v závislosti na jejich objemu stanovují v dnešní době již zavedené normy ČSN 73 0525 a ČSN 73 0527. Požadavkem také je, aby optimální doby dozvuku bylo dosaženo ve frekvenčním rozsahu od 125 Hz do 4 kHz s určitými povolenými tolerancemi. Na obrázku č. 9 a 10 vidíme základní představu optimálních dob dozvuku podle objemu místnosti.



**Obrázek č. 9:** Optimální doba dozvuku různých prostor v závislosti na jejich objemu - podle ČSN 73 0525 [4].





**Obrázek č. 10:** Optimální doba dozvuku různých prostor v závislosti na jejich objemu - podle ČSN 73 0527 [9].

### 3.5 Srozumitelnost

Lidská schopnost řeči či zpěvu je podmíněna dobře fungujícím artikulačním ústrojím (nadhrtanové dutiny, dutiny ústní, nosní, hrdelní, jazyk atd. viz [14]). Na základě analýzy lidské řeči bylo zjištěno, že vokální trakt generuje dva základní signály: kvaziperiodický signál příslušející samohláskám (vokály) a stochastický šumový signál vytvářející souhlásky (konsonanty). Oba tyto signály jsou ovlivněny průchodem rezonančními dutinami a nastavením artikulačního ústrojí. Původní kvaziperiodický signál, vytvořený hlasivkami, se nazývá hlasivkový tón. Ten při řeči mírně kolísá (tzv. *jiter*). Frekvence hlasivkového tónu se u řeči pohybuje v rozmezí 60 až 400 Hz [14].

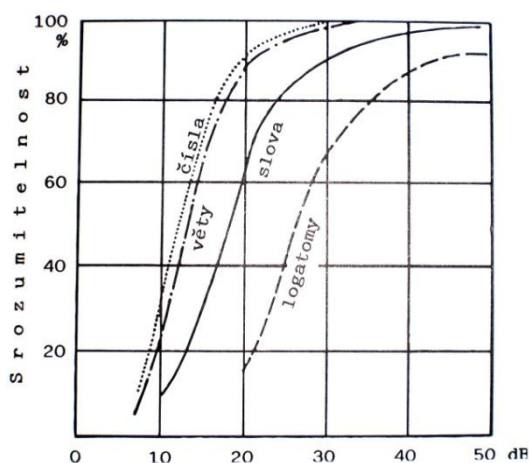
	<b>Frekvenční rozsah [Hz]</b>	<b>Průměrná hodnota [Hz]</b>
Ženy	150 - 300	233
Muži	80 - 160	132
Děti	200 - 600	400

**Tabulka č. 2:** Základní tón lidské řeči [14].

Lingvistickou jednotkou je tzv. foném, který je definován jako nejmenší lingvistická jednotka, pomocí které je možné odlišovat významové jednotky (např. slova). Důležitým pojmem pro následné vymezení srozumitelnosti řeči jsou formanty. Kolem tzv. formantových frekvencí se soustředí akustická energie řeči. Tyto oblasti soustředění energie se nazývají formanty. Tvoří podstatu znělých částí řeči, zejména samohlásek [14]. Jedná se o charakteristiku jednotlivých hlásek dle nastavení artikulačního ústrojí, při kterém

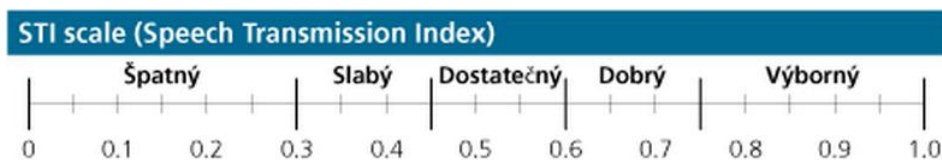
se mění jeho tvar i objem rezonančních dutin. Celkově se v literatuře uvádí 7 různých formantů, jejichž frekvenční rozsahy určují konkrétní hlásky. Pro dobrou srozumitelnost řeči postačuje přenášet úzké pásmo, které však obsahuje všechny formanty hlásek (vokálů) [9].

Hlavním faktorem ovlivnění celkové srozumitelnosti je hladina akustického tlaku u ucha posluchače a míra okolního hluku. Srozumitelnost samu o sobě nelze vyjádřit jako explicitně měřitelnou veličinu a uvádí se jako procento porozuměných slov, slabik, atd. z jejich celkového počtu vyřčeného v daných akustických podmínkách (tzv. artikulační index). Srozumitelnost pro věty, čísla, jednotlivá slova a logatomy je znázorněna na obrázku č. 11.



**Obrázek č. 11.:** Srozumitelnost řeči [9].

Často je vyjádření srozumitelnosti definováno pomocí STI, což je zkratka pro index přenosu řeči (Speech Transmission Index). Nabývá hodnot od 0 do 1, kde 1 značí nejlepší výsledek pro srozumitelnost v daném prostoru, viz obrázek č 12. Samotné měření STI vychází z analýzy tzv. modulační přenosové funkce, která hodnotí stupeň, do kterého je ještě modulace hlasu zachována v jednotlivých oktákových pásmech [11].



**Obrázek č. 12:** Stupnice STI [12].

Důležitým pojmem je tzv. práh srozumitelnosti, kterým se označuje hladina zaznamenaného vjemu řeči, ale neznamená porozumění obsahu zprávy. Srozumitelnost klesá se stoupajícím odstupem užitečného signálu od hluku a se stoupající dobou dozvuku [9].

### 3.6 Akustická pohltivost

Pro popis akusticky pohltivých vlastností ploch ohraničujících uzavřený prostor, jak již bylo zmíněno výše, se používá činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ , který lze vyjádřit jako poměr energie pohlcené plochou ku energii dopadající na plochu (resp. poměr výkonů) [2]. Jeho zápis je následující:

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i}, \quad (20)$$

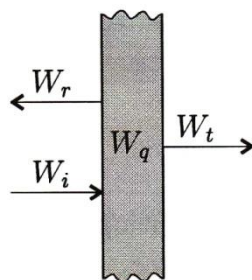
kde  $W_i$  je energie dopadající a  $W_a$  je energie pohlcená. Z tohoto vztahu vyplývá, že činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo, které může nabývat hodnot od 0 do 1. Stěna, která zcela pohlcuje zvuk, má tedy činitel zvukové pohltivosti  $\alpha = 1$  a naopak stěna dokonale odražející zvuk má činitel zvukové pohltivosti  $\alpha = 0$  [1].

Pro dopadající akustickou energii  $W_i$  při dopadu nastanou tři následující děje: část této energie se přemění na teplo (ozn.  $W_q$ ), část se odrazí (ozn.  $W_r$ ) a část projde stěnou (ozn.  $W_t$ ). Tyto děje jsou zobrazeny na obrázku č. 13. Pohlcenou energii pak lze vyjádřit součtem:

$$W_a = W_q + W_t \quad (21)$$

a díky platnosti zákona o zachování energie následně můžeme psát pro energii dopadající:

$$W_i = W_a + W_r \quad (22)$$



**Obrázek č. 13:** Odraz a průchod zvuku stěnou [2].

V některých případech se pro charakterizování pohltivých vlastností stěn používá přímo veličina zvaná pohltivost s častým označením  $A$ , která závisí nejen na činiteli zvukové

pohltivosti ale i na ploše dané stěny, a lze ji vyjádřit vztahem:

$$A = \alpha S \quad (23)$$

Mají-li části stěn různé činitele zvukové pohltivosti, či chceme-li určit celkovou pohltivost více stěn s různými činiteli pohltivosti, lze vztah rozšířit na tvar:

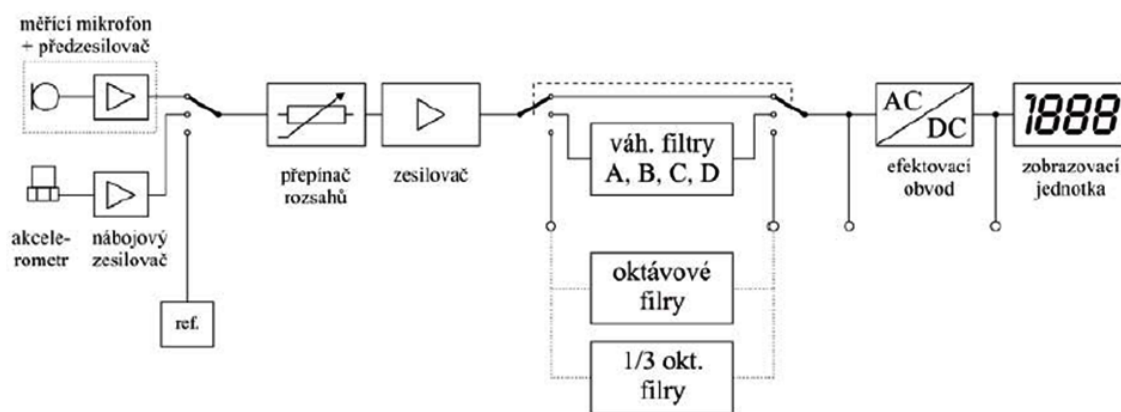
$$A_{celk} = \sum \alpha_i S_i \quad (24)$$

### 3.7 Úpravy uzavřených prostor

Pro optimální akustické vlastnosti určitého uzavřeného prostoru je potřeba provést řadu úprav. Akustické vlastnosti jednotlivých prostorů se musí lišit díky různým účelům, ke kterým má být prostor využíván, a z tohoto důvodu se pak také liší jednotlivá opatření v úpravách. Jednotlivými úpravami se pak dosahuje požadované optimální doby dozvuku a dostatečného odizolování od okolí. Optimální hodnoty pro dobu dozvuku prostoru dle jeho účelu jsou uvedeny v normě ČSN 73 0527, kde je stanoveno i toleranční pásmo při odchylkách od optimální doby dozvuku v celém frekvenčním rozsahu. Nejčastější úpravou prostoru pro zlepšení doby dozvuku je využití různých pohltivých nebo naopak odrazivých materiálů pro obložení stěn. Každý materiál je rozdílně akusticky pohltivý pro určitá frekvenční pásma, a proto pro vyrovnání doby dozvuku v celém frekvenčním rozsahu je zapotřebí využívat více materiálů odlišných vlastností. Pokud je potřeba dobu dozvuku na určité frekvenci naopak zvýšit (pro vyrovnání doby dozvuku v tolerančním pásmu), je to realizováno instalací materiálů s vysokou odrazivostí (např. kameny, dlažba).

## 4 AKUSTICKÁ MĚŘENÍ

Akustická měření slouží ke zjišťování vlastností zvukových polí různých prostor a také charakteristik různých zdrojů zvuku. Základním měřicím přístrojem v akustice je zvukoměr, jehož blokové schéma je zobrazeno na obrázku č. 14 [2].

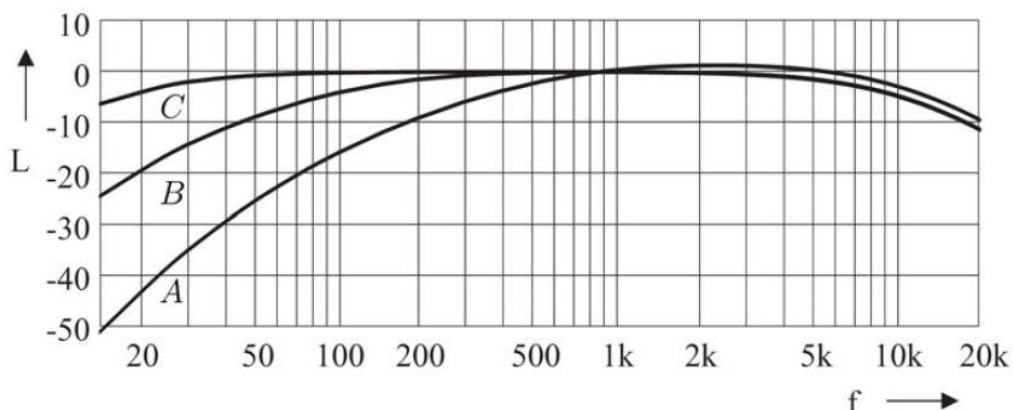


**Obrázek č. 14:** Blokové schéma zvukoměru [2].

Pro způsob hodnocení proměnných zvukových polí se používá tzv. ekvivalentní trvalá hladina s označením  $L_{eq}$ . Ta je definována jako stálá hladina zvolené veličiny (obvykle jde o akustický tlak nebo intenzitu), která má stejný účinek jako hodnocený proměnný zvuk, za shodný časový interval [7]. Tuto vlastnost nejlépe vystihuje energetická střední hodnota pro akustický tlak určená vztahem:

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right], \quad (25)$$

kde  $T$  je doba trvání proměnného zvuku. Tuto veličinu jsme tedy schopni změřit zvukoměrem. Zvukoměry dnes již standardně obsahují řadu váhových filtrů a to s označením A, B, C, popř. i D viz obrázek č. 14, a také mohou mít i filtry oktávové nebo třetinooktávové [7]. Váhové filtry představují korekci pro vnímání zvuku lidským uchem, jelikož lidské ucho není citlivé na všech frekvencích stejně. Filtr A se dnes používá nejčastěji a výrazně potlačuje frekvence pod 1000 Hz (při frekvenci 10 Hz až o 70 dB). Filtr C má útlum na frekvencích pod 50 Hz o 1 dB a pod 31,5 Hz o 3 dB a filtry B, D nejsou obecně příliš používány [15]. Díky digitalizaci měřidel jsou dnes váhové filtry určeny svými funkčními předpisy, jejichž průběhy jsou zobrazeny v obrázku č. 15. Dříve byly předepsány tabelované hodnoty korekcí pro jednotlivé frekvence.



**Obrázek č. 15:** Průběhy váhových křivek A, B a C [2].

#### 4.1 Měření doby dozvuku

Inženýrská a přesná měření dozvuku se dnes provádějí dle platné normy ČSN EN ISO 3382. V této práci se budu řídit metodickými návody z dostupné literatury od firmy Bruel & Kjaer. Před samotným měřením je nezbytné stanovit vhodné podmínky pro nejpřesnější výsledky. U měření doby dozvuku se jedná o měření v neobsazeném prostoru s maximálně s 1-3 osobami (provádějícími měření) a neopomenutí vlivu pohltivosti vzduchu, proto je potřebné změřit i teplotu, tlak a relativní vlhkost vzduchu v daném prostoru. Jednou z možných metod zkoumání doby dozvuku je metoda integrované signálové odezvy, kterou bylo provedeno měření i v této práci. K provedení měření touto metodou je zapotřebí mikrofonu a zdroje impulzního signálu (nejlépe všesměrového), jehož výkon je dostatečný pro vybuzení hladiny akustického tlaku s velkým odstupem od hluku pozadí v daném prostoru. Měření má být prováděno v prostorech, které jsou stavebně dokončeny včetně všech akusticky pohltivých úprav, a jsou vybaveny zařízením odpovídajícím vybavení v běžném provozu prostoru. Veškeré vybavení v daném prostoru může mít na výslednou dobu dozvuku velký vliv [10]. Jednotlivé nastavení poloh mikrofonu a zdroje se volí s ohledem na účel daného prostoru a konkrétní podmínky stanovené při měření v této práci jsou uvedeny v kapitole 5.

Nejistota měření u této metody je kmitočtově závislá a je ovlivněna též počtem zvolených poloh zdroj-mikrofon. Pro pásma nižších kmitočtů je nejistota měření vyšší než pro pásma vyšších kmitočtů při použití stejného počtu měření [10].

## **4.2 Měření srozumitelnosti**

V této práci je pro měření srozumitelnosti řeči využíván software Dirac, jehož funkce umožňují složitý výpočet indexu přenosu řeči STI přímo z naměřených dat. Při měření je rozlišován index přenosu řeči pro ženský a mužský hlas z důvodu odlišností ve frekvenčním rozložení lidského hlasu u žen a mužů.

## **4.3 Použité přístroje a software**

### **4.3.1 Echo Speech Source Type 4720**

Jedná se o zdroj kalibrovaných akustických signálů včetně lidské řeči (a pěti dalších) pro měření zejména srozumitelnosti v daném prostoru. Pomocí těchto signálů lze provést i měření pomocí impulsové odezvy a přerušného šumu. Samotný zdroj je díky svým malým rozměrům (10 x 10 x 17 cm) a váze (1 kg) skladný a snadno se s ním při měření manipuluje. Lze ho také umístit na stativ, čehož bylo při měření využito i u zvukového analyzátoru. K počítači s příslušným vyhodnocovacím softwarem ho lze připojit BNC kabelem (s redukcí zástrčky na cinch) přes zvukovou kartu, v našem případě typ ZE 948.

### **4.3.2 Hand-held Analyzer 2250 Light**

Tento zvukový analyzátor od firmy Bruel & Kjaer obsahuje přeinstalovaný modul zvukoměru, který měří současně všechny požadované parametry a dynamickým rozsahem 120 dB. Spojení s počítačem je možné přes síťový kabel a umožňuje následné vzdálené ovládání analyzátoru. Pro měření v této práci jsem však využila pouze signál, který analyzátor snímá pomocí mikrofону typu 4950 a díky výstupu pro sluchátka ho lze přivést do zvukové karty a následně pro další zpracování do počítače. K tomuto propojení byl použit propojovací audio kabel jack-jack 3,5 mm s koncovou redukcí na 2x cinch zástrčky.

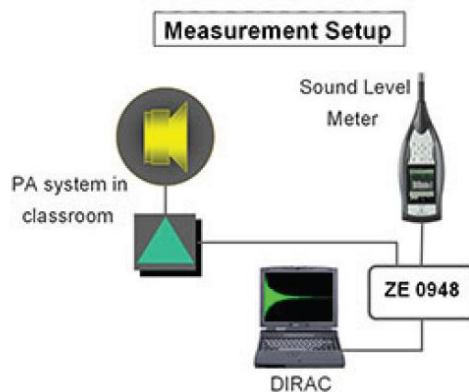
### **4.3.3 Sound Calibrator Type 4231**

Pro kalibraci analyzátoru byl použit tento typ kalibrátoru od Bruel & Kjaer. Tento kalibrátor má nominální hodnotu hladiny akustického tlaku 94,0 dB s možnou odchylkou  $\pm 0,2$  dB.

### **4.3.4 Zvuková karta USB Audio Interface ZE 0948**

Jedná se o zvukovou kartu také od firmy Bruel & Kjaer určenou přímo k použití při různých akustických měřeních, jako jsou například měření vibrací a měření akustických parametrů prostoru. Její analogový vstup a výstup jsou fázově synchronní, díky čemuž lze provést

akustické měření na bázi MLS. K počítači ji lze připojit využitím USB portu a k připojení ke vstupu a výstupu je použito 2x2 cinch zásuvky. Její správné umístění v měřící aparatuře je zobrazeno na obrázku č. 16.



*Obrázek č. 16:* Schéma zapojení ZE 0948 [13].

#### **4.3.5 DIRAC Room Acoustic Software Type 7841**

Tento software od firmy Bruel & Kjaer ve verzi 6.0 je určen přímo pro profesionální akustická měření, při kterých lze pomocí tohoto programu získat značné množství různých akustických parametrů. Program obsahuje například i automatické přednastavení pro měření doby dozvuku dle ISO 3382-2, kterého bylo při vlastním měření také využito.

#### **4.3.6 Multifunkční prostředí měřicí přístroj 4 v 1 Voltcraft**

S tímto přístrojem, který má v sobě zabudovaný luxmetr, zvukoměr, teploměr a vlhkoměr lze lehce naměřit požadované parametry prostředí (teplota, vlhkost), které je potřeba zadat do programu Dirac pro zpřesnění výsledků akustického měření.

#### **4.3.7 Počítač HP Probook 455 G2**

Standardní notebook, který obsahoval SW Dirac a byl propojen se zvukovou kartou.

#### **4.3.8 Laserový dálkoměr FLUKE 414D**

Sloužil pro snazší měření rozměrů měřených prostor.



### **III. PRAKTICKÁ ČÁST**

#### **5 AKUSTICKÁ MĚŘENÍ SPECIFICKÝCH PROSTOR**

V této práci jsem se zaměřila na zjištění doby dozvuku T20 a T30 a srozumitelnosti řeči prostřednictvím indexu přenosu řeči STI. V pěti vybraných prostorech (malá a velká posluchárna, nahrávací studio, zkušebna a hudební klub) jsem použila zjištěné hodnoty těchto akustických parametrů pro následné srovnání s účelností daného prostoru.

##### **5.1 Podmínky pro umístění měřící aparatury**

Při umístění zdroje zvuku byly dodržovány tyto podmínky:

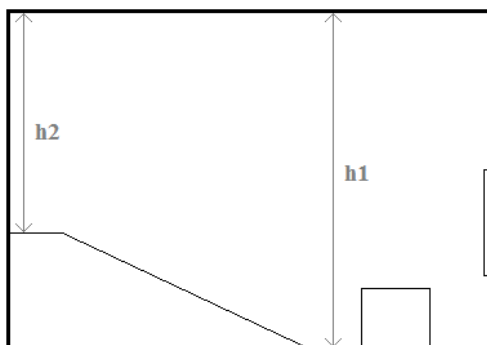
- vzdálenost nejméně 0,5 m od obvodové zdi místnosti
- polohy R1 a R2 jsou od sebe vzdáleny nejméně 0,7 m
- polohy zdroje nesmí ležet ve stejných rovinách rovnoběžných se stěnami místnosti [10]
- umístění ve výšce 1,5 m

Při umístění mikrofonu byly dodržovány tyto podmínky:

- vzdálenost nejméně 1 m od obvodové zdi místnosti
- mezi dvěma polohami mikrofonu vzdálenost nejméně 0,7 m
- mezi zdrojem zvuku a mikrofonem vzdálenost nejméně 1 m
- umístění ve výšce 1,2 m

##### **5.2 Malá posluchárna**

Prostor malé posluchárny byl vybrán v budově BC Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity s označením místnosti C4. Tato posluchárna je kapacitně přizpůsobená pro maximální obsazení 30 posluchači a je využívána zejména k odborným přednáškám, proto hlavním požadavkem na akustické vlastnosti tohoto prostoru je tedy co nejlepší srozumitelnost lidské řeči. Místnost je vybavená školním nábytkem, podlahu pokrývá plovoucí podlaha, stěny jsou obloženy dekorem lamina Kronospan a strop je tvořen kazetovým podhledem. Změřené rozměry místnosti a výšky stropu vyznačené ve zjednodušeném bokorysu na obrázku č. 17 jsou uvedeny v tabulce č. 3.



**Obrázek č. 17:** Zjednodušený bokorys malé posluchárny.

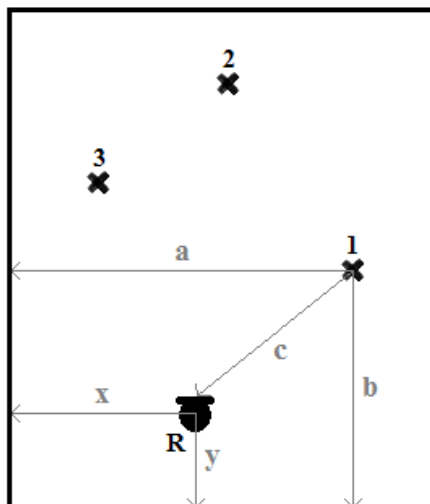
Rozměry místnosti		Výšky stropu		Objem	Plocha stropu
š [m]	d [m]	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$S$ [m <sup>2</sup> ]
5,6	7,0	4,7	3,2	162,2	39,2

**Tabulka č. 3:** Změřené parametry malé posluchárny.

Schéma rozmístění měřicí aparatury je zobrazeno na obrázku č. 18 a v tabulce č. 4 jsou pak zapsány vlastní hodnoty z tohoto schématu. Měření bylo prováděno metodou integrované signálové odezvy a ze zdroje zvuku byl použit signál e-sweep, který je v literatuře Bruel & Kjaer označován za nejvhodnější pro zkoumání doby dozvuku prostoru a software Dirac umožňuje při jeho použití výpočet indexu přenosu řeči STI pro zjištění výsledné srozumitelnosti. Čas jednoho náměru byl nastaven na  $t = 5,46$  s a bylo zde tedy předpokládáno, že doba dozvuku bude kratší než polovina doby náměru. Podmínky prostředí při provádění měření byly následující: vlhkost vzduchu 39,2 %, tlak 1024 hPa a teplota 22,3 °C.

Rozmístění aparatury					
	$a$ [m]	$b$ [m]	$c$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]
1)	4,7	4,5	3,8	2,7	1,3
2)	2,8	6,4	5,3	2,7	1,3
3)	1,2	5,6	4,4	2,7	1,3

**Tabulka č. 4:** Hodnoty udávající polohu mikrofону a zdroje zvuku v malé posluchárně.

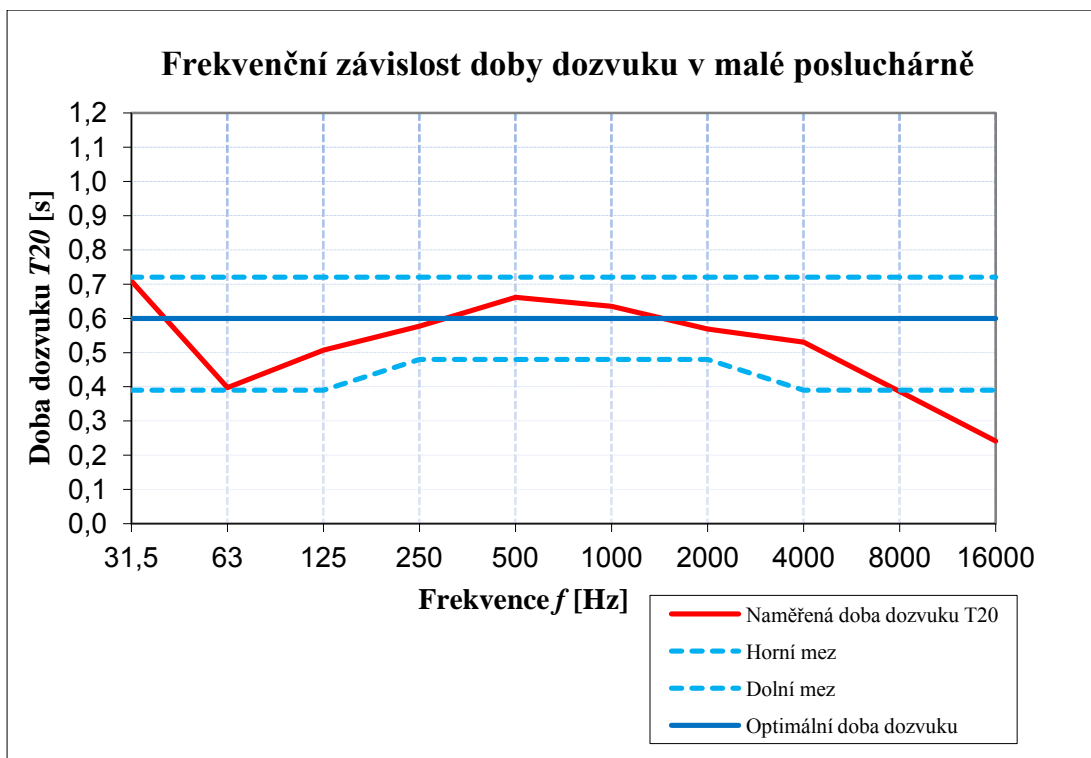


**Obrázek č. 18:** Schéma rozmístění měřicí aparatury v malé posluchárně (R – umístění reproduktoru; 1,2,3 – pozice mikrofonu) - půdorys.

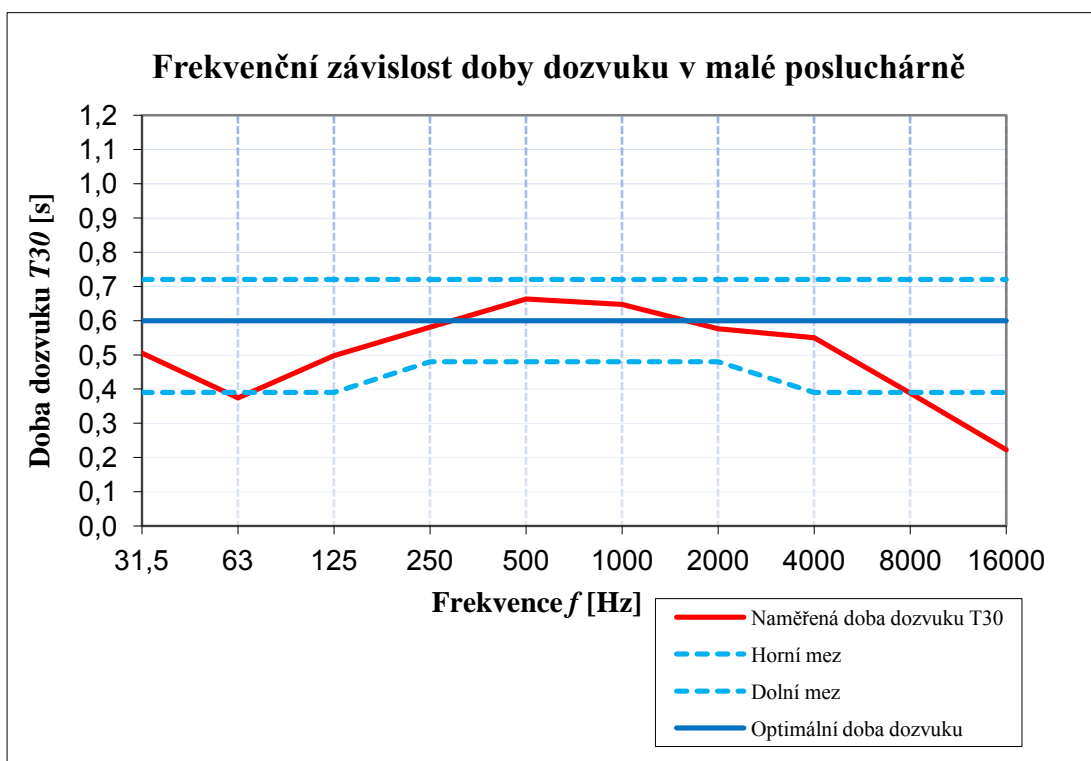
V malé posluchárně bylo měření provedeno celkem pro 3 různé rozestavení aparatury a to pro 1 fixní polohu zdroje a 3 různé polohy mikrofonu. Měření pro každou polohu mikrofonu bylo opakováno celkem 3x. Při měření byla v místnosti přítomna 1 osoba. Výsledky měření vybraných parametrů jsou uvedeny v tabulce č. 5 a v grafech číslo 1 a 2.

Výsledný index přenosu řeči		Srozumitelnost
STI ženy	0,58	dostatečná
STI muži	0,59	dostatečná

**Tabulka č. 5:** Výsledné hodnoty STI a vyhodnocení srozumitelnosti ve velké posluchárně.



**Graf č. 1:** Výsledné hodnoty T20 v oktávoých pásmech naměřené v malé posluchárně s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

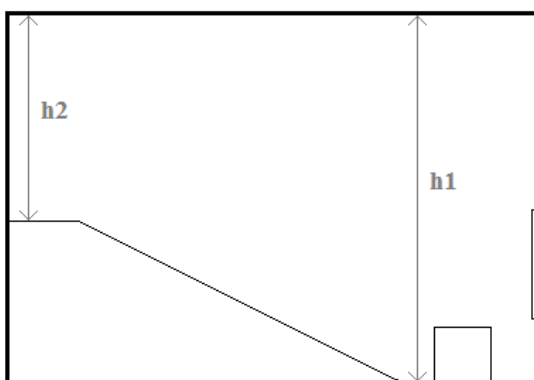


**Graf č. 2:** Výsledné hodnoty T30 v oktávoých pásmech naměřené v malé posluchárně s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

Dle ČSN 73 0527 (viz obrázek č. 10) byla optimální doba dozvuku této místnosti stanovena na  $T_{opt} = 0,6$  s. Z grafů výsledných hodnot pro T20 i T30 je vidět, že ve frekvenčních pásmech 125 Hz – 4000 Hz naměřená doba dozvuku spadá mezi doporučenou horní a spodní mez optimální doby dozvuku, a tedy místnost splňuje účel posluchárny, k němuž je určena. Výsledné hodnoty STI tak dobré nejsou, jelikož pro dobrou funkčnost posluchárny by byla optimální hodnota STI v rozmezí 0,7 – 0,9 (dobrá – výborná) a v tomto měření bylo dosaženo pouze hodnocení dostatečná a to jak pro ženský, tak i mužský hlas.

### 5.3 Velká posluchárna

Prostor velké posluchárny byl vybrán také v budově BC Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity a s označením místnosti C2. Tento prostor je určen kapacitně pro 154 sedících posluchačů a díky svým větším rozměrům je dobrá srozumitelnost v tomto prostoru důležitá pro jeho plnou funkčnost. Posluchárna je opět využívána zejména k odborným přednáškám. Místnost je vybavená školním nábytkem, podlahu pokrývá plovoucí podlaha, stěny jsou obloženy dekorem lamina Kronospan a strop je tvořen kazetovým podhledem. Rozměry místnosti a výšky stropu vyznačené ve zjednodušeném bokorysu na obrázku č. 19 jsou uvedeny v tabulce č. 6.



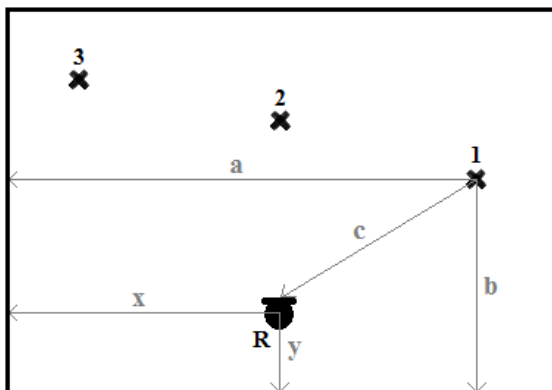
**Obrázek č. 19:** Zjednodušený bokorys velké posluchárny.

Rozměry místnosti		Výšky stropu		Objem	Plocha stropu
š [m]	d [m]	h <sub>1</sub> [m]	h <sub>2</sub> [m]	V [m <sup>3</sup> ]	S [m <sup>2</sup> ]
16,0	11,9	5,1	3,9	778,3	190,4

**Tabulka č. 6:** Změřené parametry velké posluchárny.

Schéma rozmístění měřicí aparatury je vidět na obrázku č. 20 a je podobné jako u malé posluchárny. V tabulce č. 7 jsou zapsány vlastní hodnoty pro umístění zdroje zvuku

a mikrofonu dle tohoto schématu. Měření bylo prováděno stejnou metodou s časem jednoho náměru  $t = 10,9$  s (z důvodu odhadu delší doby dozvuku). Podmínky prostředí při provádění měření byly následující: vlhkost vzduchu 38,9 %, tlak 1024 hPa a teplota 21,5 °C.



**Obrázek č. 20:** Schéma rozmístění měřicí aparatury ve velké posluchárně - půdorys.

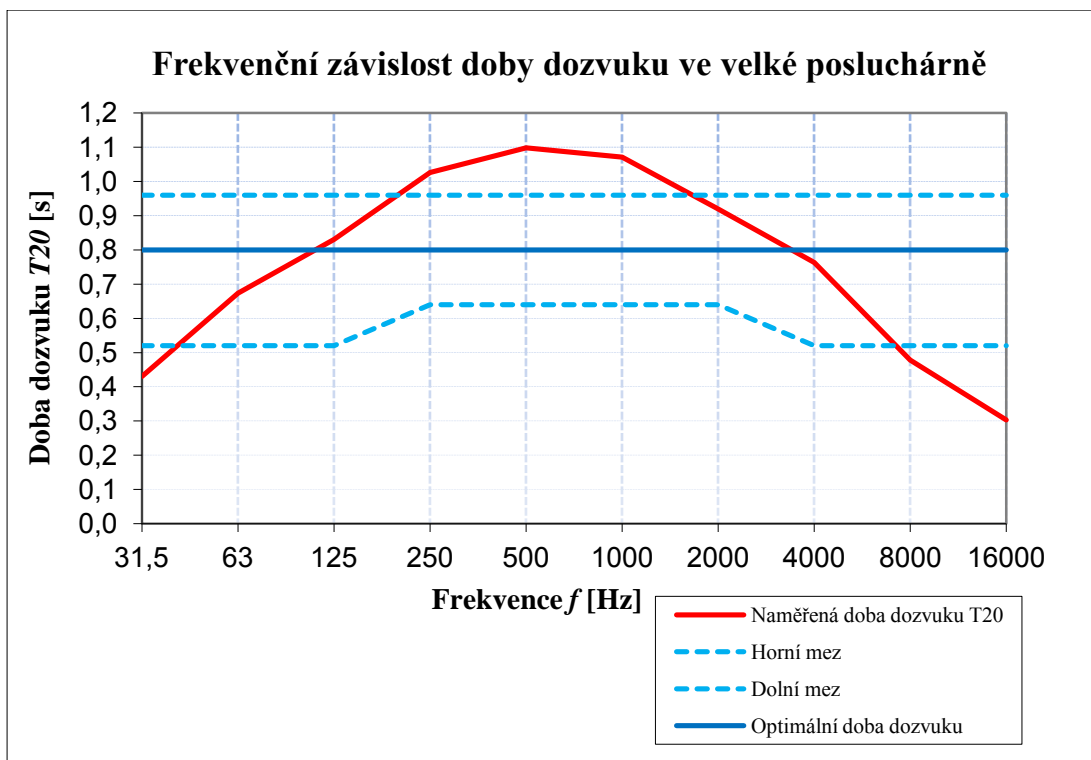
Rozmístění aparatury					
	$a$ [m]	$b$ [m]	$c$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]
1)	14,5	7,0	11,8	6,2	2,2
2)	8,8	8,8	6,7	6,2	2,2
3)	1,0	10,3	9,5	6,2	2,2

**Tabulka č. 7:** Hodnoty udávající polohu mikrofonu a zdroje zvuku ve velké posluchárně.

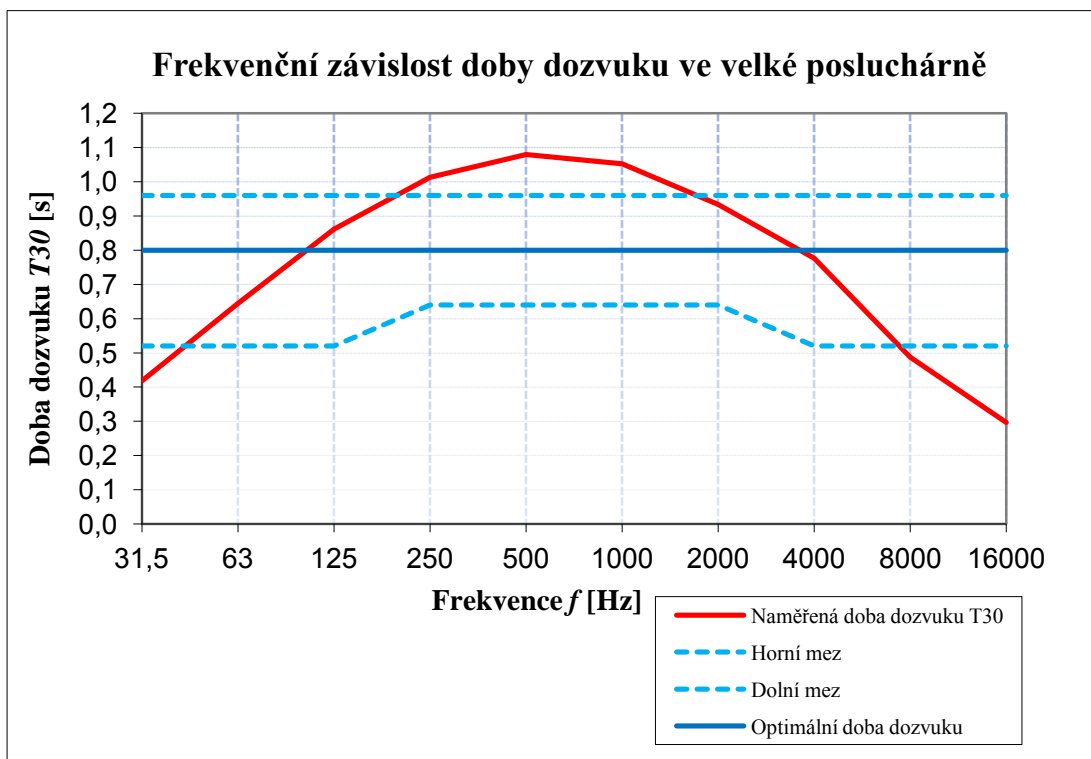
Ve velké posluchárně bylo měření provedeno opět pro 3 různé rozestavení aparatury, a to pro 1 fixní polohu zdroje a 3 různé polohy mikrofonu. Měření pro každou polohu mikrofonu bylo opakováno celkem 3x. Při měření byly v místnosti přítomny 2 osoby. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce č. 8 a v grafech č. 3 a 4.

Výsledný index přenosu řeči		Srozumitelnost
STI ženy	0,51	dostatečná
STI muži	0,51	dostatečná

**Tabulka č. 8:** Výsledné hodnoty STI a vyhodnocení srozumitelnosti ve velké posluchárně.



**Graf č. 3:** Výsledné hodnoty T20 v oktávoých pásmech naměřené ve velké posluchárně s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

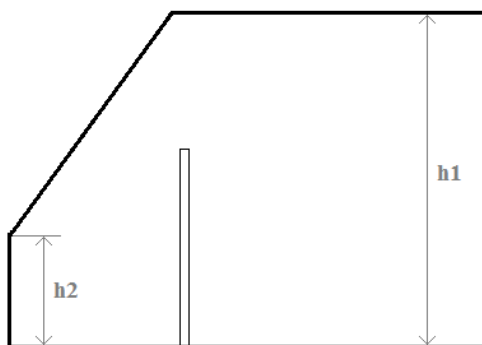


**Graf č. 4:** Výsledné hodnoty T30 v oktávoých pásmech naměřené ve velké posluchárně s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

Dle ČSN 73 0527 byla optimální doba dozvuku této místnosti stanovena na  $T_{opt} = 0,8$  s. Z grafů výsledných hodnot pro T20 i T30 je vidět, že ve frekvenčních pásmech 125 Hz – 4000 Hz naměřená doba dozvuku mírně překračuje doporučenou horní mez v pásmech 250 Hz – 1000 Hz, a tedy již nesplňuje optimální dobu dozvuku pro prostor určený jako posluchárna. Výsledné hodnoty STI také nejsou dobré, jelikož požadovaná hodnota STI je v rozmezí 0,7 – 0,9 (dobrá – výborná) a v tomto měření bylo dosaženo pouze hodnocení dostatečná a to pro ženský i mužský hlas, navíc ještě s menší výslednou hodnotou STI než u malé posluchárny.

#### 5.4 Nahrávací studio

Prostor nahrávacího studia byl změřen u společnosti Mkp studio v Českých Budějovicích. Tato místnost je využívána pro co nejkvalitnější záznam zvuku, a tedy hlavním požadavkem na akustické vlastnosti tohoto prostoru je krátká a vyrovnaná doba dozvuku. Místnost je vybavená velkým počtem komponentů potřebných pro nahrávání (stojany, mikrofony, kabely, apod.), podél jedné stěny jsou umístěny desky z tlumícího materiálu (viz obr. č. 21 i 22), povrch podlahy tvoří dřevotříska a na ní položený koberec, stěny jsou obloženy v různých částech akustickou pěnou, kobercem či dřevěnými deskami. Strop je obložen taktéž. Změřené rozměry místnosti a výšky stropu vyznačené ve zjednodušeném bokorysu na obrázku č. 21 jsou uvedeny v tabulce č. 9.



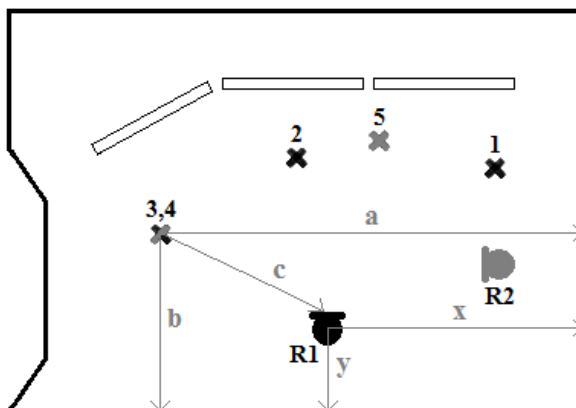
**Obrázek č. 21:** Zjednodušený bokorys nahrávacího studia.

Rozměry místnosti		Výšky stropu		Objem	Plocha stropu
š [m]	d [m]	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$S$ [m <sup>2</sup> ]
5,8	4,6	2,6	0,8	56,2	32,7

**Tabulka č. 9:** Změřené parametry nahrávacího studia.



Schéma rozmístění měřicí aparatury je vidět na obrázku č. 22 a liší se od předchozích z důvodu malých rozměrů místnosti a umístění pohltivých desek. V tabulce č. 10 jsou zapsány vlastní hodnoty pro umístění zdroje zvuku a mikrofonu dle tohoto schématu. Měření bylo prováděno stejnou metodou s časem jednoho náměru  $t = 5,46$  s. Podmínky prostředí při provádění měření byly následující: vlhkost vzduchu 40,1 %, tlak 1035 hPa a teplota 20,2 °C.



**Obrázek č. 22:** Schéma rozmístění měřicí aparatury v nahrávacím studiu - půdorys.

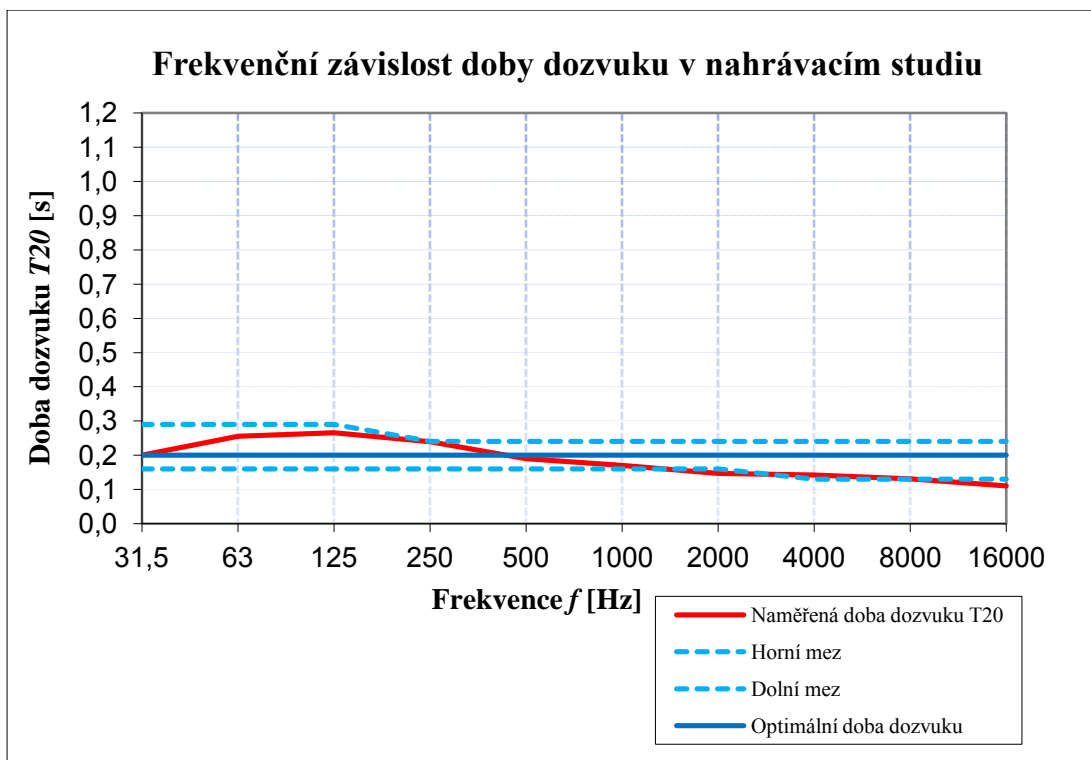
Rozmístění aparatury					
	$a$ [m]	$b$ [m]	$c$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]
1)	1,1	3,6	2,7	2,4	1,2
2)	3,1	2,8	1,7	2,4	1,2
3)	3,1	2,8	2,2	1,1	2,4
4)	3,2	1,1	2,5	1,1	2,4
5)	2,0	3,2	1,4	1,1	2,4

**Tabulka č. 10:** Hodnoty udávající polohu mikrofonu a zdroje zvuku v nahrávacím studiu.

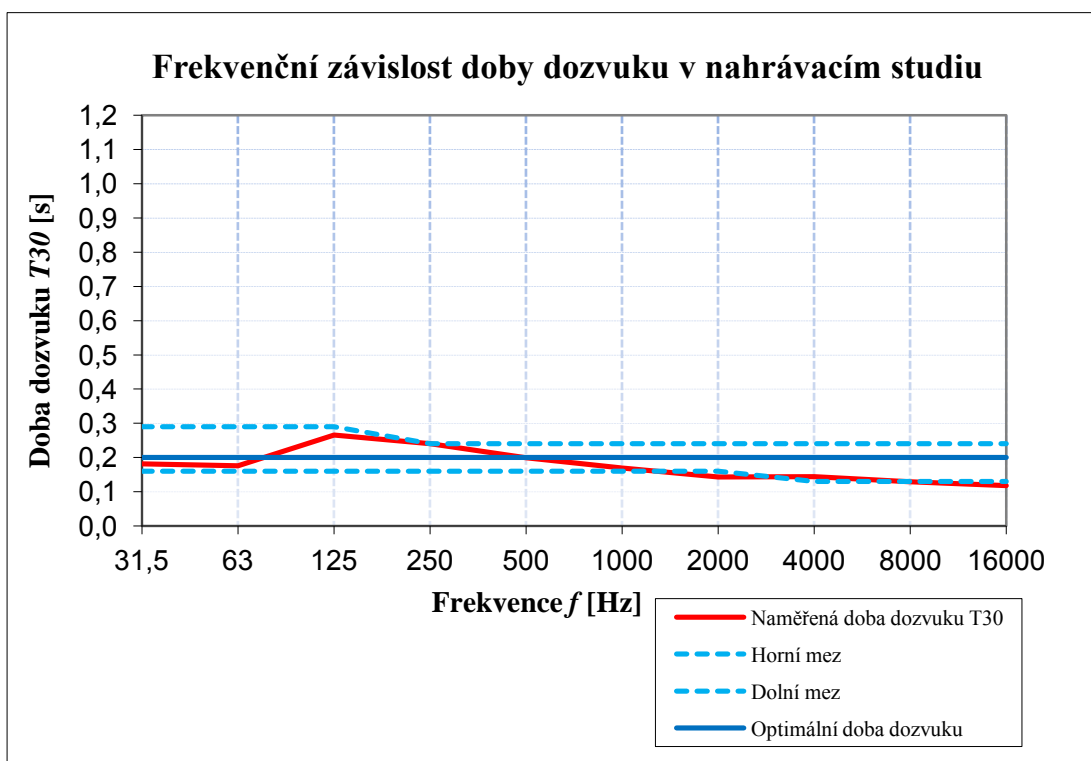
V nahrávacím studiu bylo měření provedeno celkem pro 5 různých rozestavení aparatury a to pro 2 polohy zdroje a 4 různé polohy mikrofonu (viz obr. č. 22). Měření pro každou polohu mikrofonu bylo opakováno celkem 2x. Při měření byly v místnosti přítomny 2 osoby. Výsledky měření vybraných parametrů jsou uvedeny v tabulce č. 11 a v grafech číslo 5 a 6.

Výsledný index přenosu řeči		Srozumitelnost
STI ženy	0,68	dobrá
STI muži	0,69	dobrá

**Tabulka č. 11:** Výsledné hodnoty STI a vyhodnocení srozumitelnosti v nahrávacím studiu.



**Graf č. 5:** Výsledné hodnoty  $T_{20}$  v oktávních pásmech naměřené v nahrávacím studiu s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

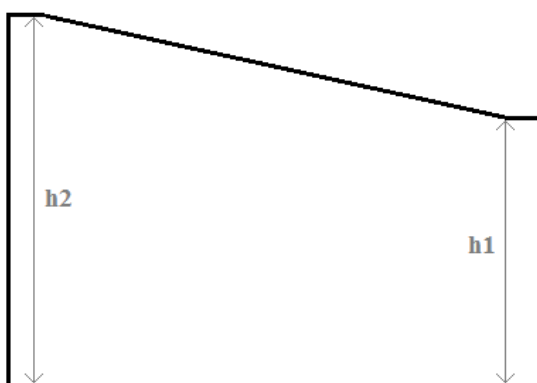


**Graf č. 6:** Výsledné hodnoty  $T_{30}$  v oktávních pásmech naměřené v nahrávacím studiu s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

Dle ČSN 73 0527 (nahrávací studia) byla optimální doba dozvuku této místnosti stanovena na  $T_{opt} = 0,2$  s. Z grafů výsledných hodnot pro T20 i T30 je vidět, že ve frekvenčních pásmech 125 Hz – 4000 Hz naměřená doba dozvuku se pohybuje nad i pod vyznačenou optimální dobou dozvuku  $T_{opt}$  a téměř nepřekračuje hranice tolerančního pásma. V případě požadovaných akustických vlastností od prostoru nahrávacího studia je takto krátká doba dozvuku požadovaným výsledkem a místnost tedy splňuje požadavky pro využití k dobrému záznamu zvuku. Výsledné hodnoty STI jsou také dobré, jelikož v tomto měření bylo dosaženo hodnocení srozumitelnosti jako „dobrá“ pro ženský i mužský hlas.

### 5.5 Zkušebna

Prostor zkušebny hudebního tělesa byl změřen v garážové zástavbě v Jindřichově Hradci. Tato místnost je využívána ke zkouškám pětičlenné kapely. Místnost je vybavena nábytkem, kytarovými zesilovači a bicí soupravou, na podlaze je položen koberec ve dvou vrstvách, stěny jsou obloženy papírovými platy od vajíček a různou textilií a povrch stropu tvoří pouze štuková omítka. Změřené rozměry místnosti a výšky stropu vyznačené ve zjednodušeném bokorysu na obrázku č. 23 jsou uvedeny v tabulce č. 12.



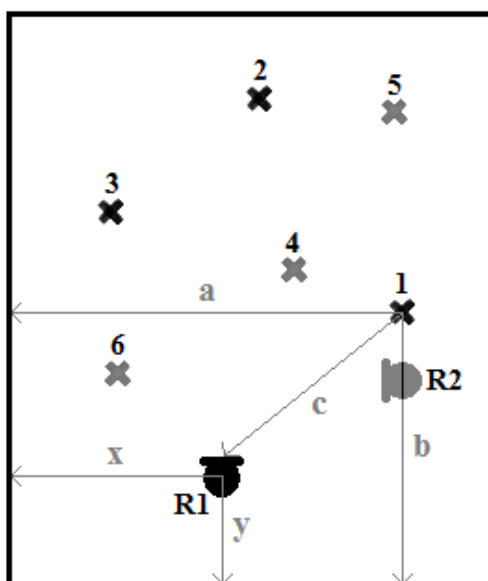
**Obrázek č. 23:** Zjednodušený bokorys zkušebny.

Rozměry místnosti		Výšky stropu		Objem	Plocha stropu
š [m]	d [m]	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	V [m <sup>3</sup> ]	S [m <sup>2</sup> ]
3,5	5,8	2,2	3,0	57,9	20,5

**Tabulka č. 12:** Změřené parametry zkušebny.

Schéma rozmístění měřicí aparatury je vidět na obrázku č. 24 a v tabulce č. 13 jsou zapsány vlastní hodnoty pro umístění zdroje zvuku a mikrofonu dle tohoto schématu. Měření bylo

prováděno stejnou metodou s časem jednoho naměru  $t = 5,46$  s. Podmínky prostředí při provádění měření byly následující: vlhkost vzduchu 45 %, tlak 1017 hPa a teplota 12 °C.



**Obrázek č. 24:** Schéma rozmístění měřicí aparatury ve zkušebně - půdorys.

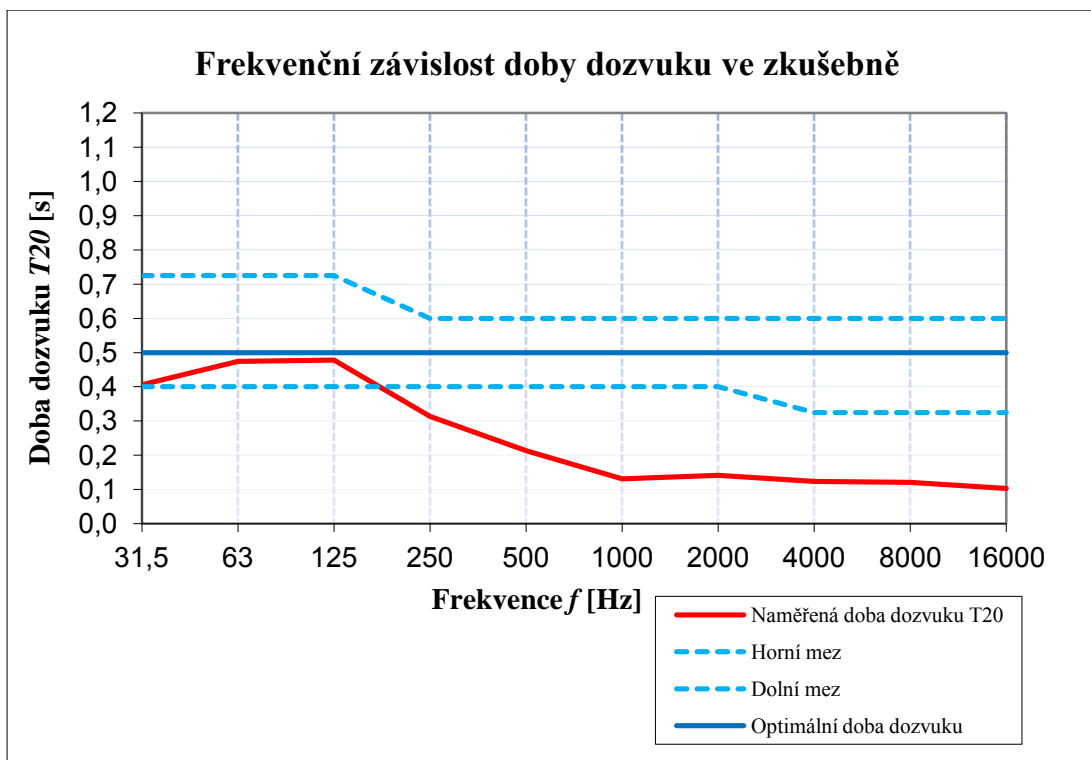
Rozmístění aparatury					
	$a$ [m]	$b$ [m]	$c$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]
1)	2,5	2,9	1,9	3,1	1,1
2)	1,8	4,6	3,0	3,1	1,1
3)	1,0	3,2	2,0	3,1	1,1
4)	2,3	3,0	1,1	2,3	2,0
5)	2,4	4,4	2,9	2,3	2,0
6)	1,2	2,2	1,3	2,3	2,0

**Tabulka č. 13:** Hodnoty udávající polohu mikrofonu a zdroje zvuku ve zkušebně.

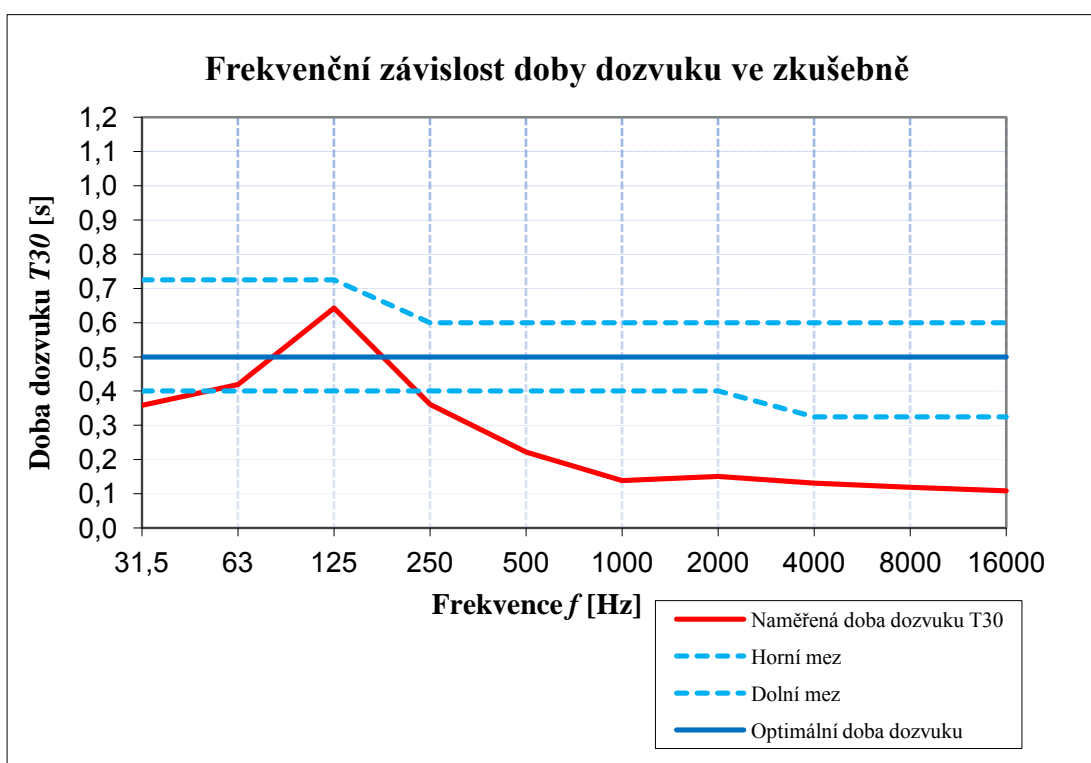
Ve zkušebně bylo měření provedeno celkem pro 6 různých rozestavení aparatury a to pro 2 polohy zdroje a 6 různé polohy mikrofonu (viz obr. č. 24). Měření pro každou polohu mikrofonu bylo opakováno celkem 2x. Při měření byla v místnosti přítomna 1 osoba. Výsledky měření vybraných parametrů jsou uvedeny v tabulce č. 14 a v grafech číslo 7 a 8.

Výsledný index přenosu řeči	Srozumitelnost	
STI ženy	0,69	dobrá
STI muži	0,69	dobrá

**Tabulka č. 14:** Výsledné hodnoty STI a vyhodnocení srozumitelnosti ve zkušebně.



**Graf č. 7:** Výsledné hodnoty  $T_{20}$  v oktávových pásmech naměřené ve zkušebně s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

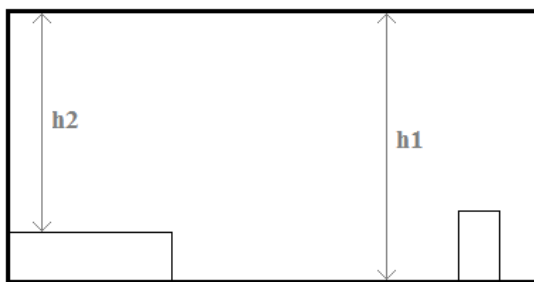


**Graf č. 8:** Výsledné hodnoty  $T_{30}$  v oktávových pásmech naměřené ve zkušebně s vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

Dle ČSN 73 0527 lze tento prostor klasifikovat v kategorii pro víceúčelový sál, zkušebna orchestru, sboru, avšak nejmenší uvedený objem daného prostoru je  $500 \text{ m}^3$ , což je pro toto měření nepoužitelné. V kategorii pro posluchárny, činoherní divadla a činoherní zkušebny je uveden nejmenší objem místnosti  $100 \text{ m}^3$  (viz předchozí kapitola) a doba dozvuku  $T_{\text{opt}} = 0,5 \text{ s}$ , tudíž je tato hodnota pouze orientační a velmi nadhodnocena. Z grafu výsledných hodnot pro T20 je vidět, že naměřená doba dozvuku je ve všech pásmech menší než orientační hodnota, avšak v grafu výsledných hodnot pro T30 je naměřená doba dozvuku ve frekvenčním pásmu 125 Hz dokonce větší než hodnota  $T_{\text{opt}}$ . V případě požadovaných akustických vlastností od prostoru zkušebny je naměřená doba dozvuku při přihlédnutí k velikosti místnosti nevyhovující. Použité tlumící prvky v tomto prostoru jsou tedy pro nižší frekvence nedostačující. Výsledné hodnoty STI jsou však dobré, jelikož v tomto měření bylo dosaženo hodnocení srozumitelnosti jako „dobrá“ pro ženský i mužský hlas.

## 5.6 Hudební klub

Prostor sálu hudebního klubu byl změřen v MC Fabrika v Českých Budějovicích. Tato místnost je využívána pro živé koncerty, reprodukovanou hudbu všech žánrů a např. i autorská čtení literárních děl. Z tohoto důvodu je hlavním požadavkem na akustické vlastnosti této místnosti optimální doba dozvuku odpovídající víceúčelovému sálu. Místnost je vybavena nábytkem podél stěn, pódiem, na stěnách visí desky z tlumícího materiálu, na podlaze je položen zátěžový koberec a povrch stropu tvoří pouze omítka. Změřené rozměry místnosti a výšky stropu vyznačené ve zjednodušeném bokorysu na obrázku č. 25 jsou uvedeny v tabulce č. 15.

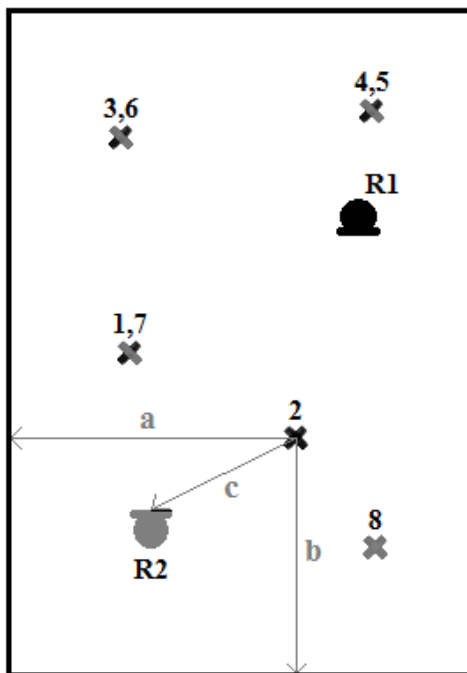


Obrázek č. 25: Zjednodušený bokorys hudebního klubu.

Rozměry místnosti		Výšky stropu		Objem	Plocha stropu
š [m]	d [m]	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	$V$ [ $\text{m}^3$ ]	$S$ [ $\text{m}^2$ ]
6,5	11,5	3,5	2,8	249,3	74,8

Tabulka č. 15: Změřené parametry hudebního klubu.

Schéma rozmístění měřicí aparatury je vidět na obrázku č. 26 a liší se od předchozích (kromě velké posluchárny) z důvodu větších rozměrů místnosti. V tabulce č. 16 jsou zapsány vlastní hodnoty pro umístění zdroje zvuku a mikrofonu dle tohoto schématu. Měření bylo prováděno stejnou metodou s časem jednoho náměru  $t = 21,8$  s. Podmínky prostředí při provádění měření byly následující: vlhkost vzduchu 40,5 %, tlak 1025 hPa a teplota 18,9 °C.



**Obrázek č. 26:** Schéma rozmístění měřicí aparatury v hudebním klubu - půdorys.

Rozmístění aparatury					
	$a$ [m]	$b$ [m]	$c$ [m]	$x$ [m]	$y$ [m]
1)	2,0	4,0	4,0	4,4	7,0
2)	4,8	3,5	3,5	4,4	7,0
3)	1,6	10,0	4,2	4,4	7,0
4)	4,8	10,0	3,1	4,4	7,0
5)	4,8	10,0	3,1	2,9	3,4
6)	1,6	10,0	6,8	2,9	3,4
7)	2,0	4,0	1,9	2,9	3,4
8)	4,9	3,2	1,1	2,9	3,4

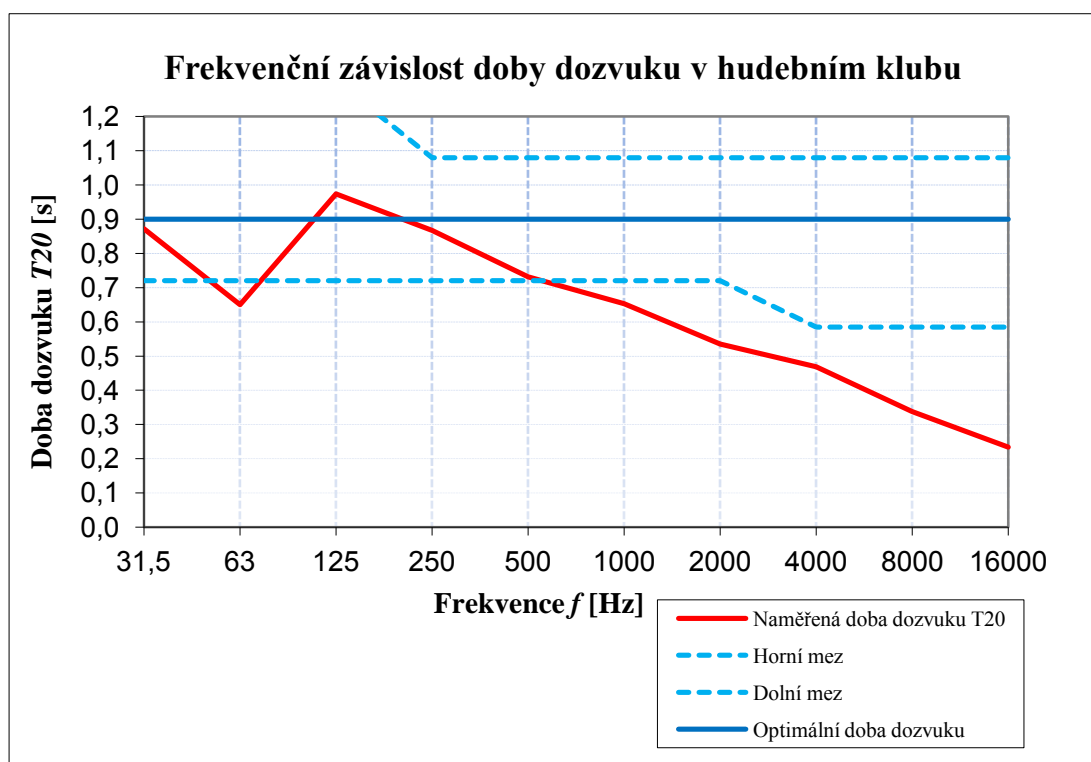
**Tabulka č. 16:** Hodnoty udávající polohu mikrofonu a zdroje zvuku v hudebním klubu.

V hudebním klubu bylo měření provedeno celkem pro 8 různých rozestavení aparatury a to pro 2 polohy zdroje a 5 různé polohy mikrofonu (viz obr. č. 26). Měření pro každou polohu

mikrofonu bylo opakováno celkem 2x. Při měření byly v místnosti přítomny 3 osoby. Výsledky měření vybraných parametrů jsou uvedeny v tabulce č. 17 a v grafech číslo 9 a 10.

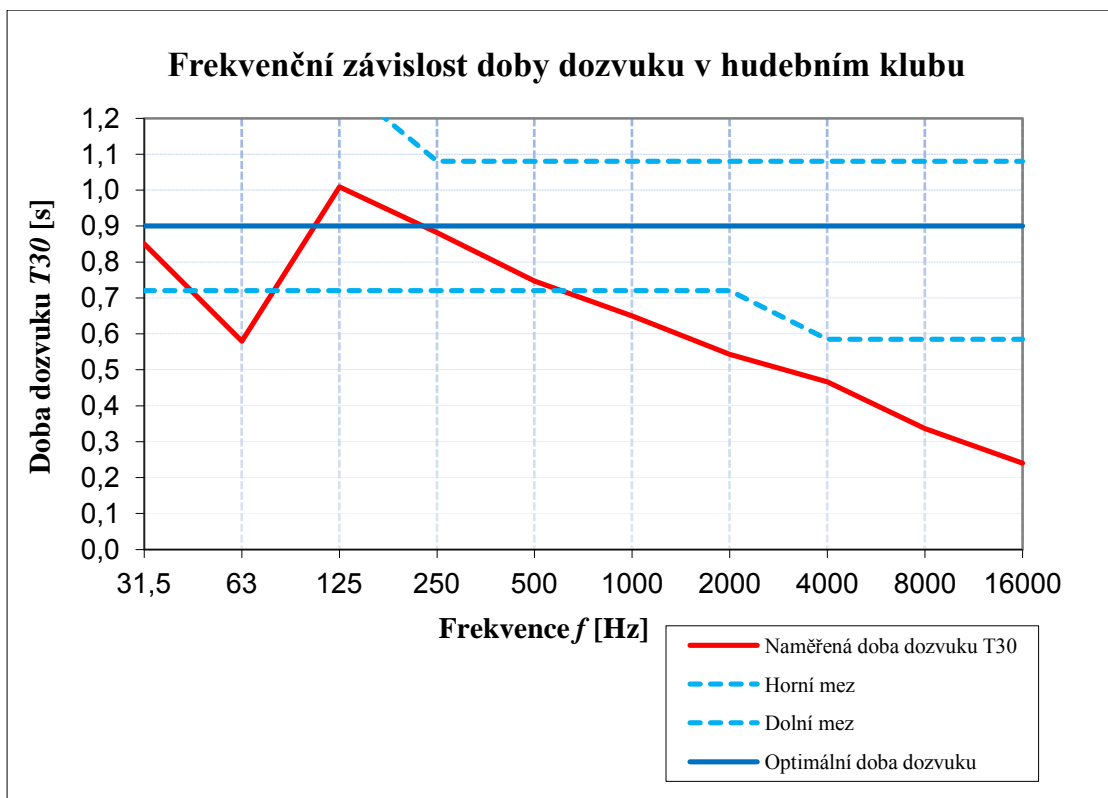
Výsledný index přenosu řeči		Srozumitelnost
STI ženy	0,72	dobrá
STI muži	0,71	dobrá

**Tabulka č. 17:** Výsledné hodnoty STI a vyhodnocení srozumitelnosti v hudebním klubu.



**Graf č. 9:** Výsledné hodnoty  $T_{20}$  v oktákových pásmech naměřené v hudebním klubu vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.





**Graf č. 10:** Výsledné hodnoty  $T_{30}$  v oktávoých pásmech naměřené v hudebním klubu vyznačenou doporučenou dobou dozvuku a tolerančním pásmem dle ČSN 73 0527.

Dle ČSN 73 0527 byla optimální doba dozvuku této místnosti pro kategorii víceúčelový sál, zkušebna orchestru, sboru, stanovena na  $T_{opt} = 0,9$  s (při zaokrouhlení objemu sálu na nejmenší uvedenou hodnotu). Z grafů výsledných hodnot pro  $T_{20}$  i  $T_{30}$  je vidět, že ve frekvenčních pásmech 125 Hz – 500 Hz naměřená doba dozvuku spadá do tolerančního pásma od optimální stanovené doby dozvuku  $T_{opt}$ , ale již pro vyšší frekvence strmě klesá pod doporučenou dolní mez. Z obou grafů je patrné výrazné maximum ve frekvenčním pásmu 125 Hz, které značí neideální vlastnosti prostoru pro reprodukovanou hudbu. Výsledné hodnoty STI jsou zde nejlepší ze všech uskutečněných měření, jelikož v tomto měření bylo dosaženo hodnocení srozumitelnosti jako „dobrá“ pro ženský i mužský hlas s hodnotami STI vyššími než 0,7.

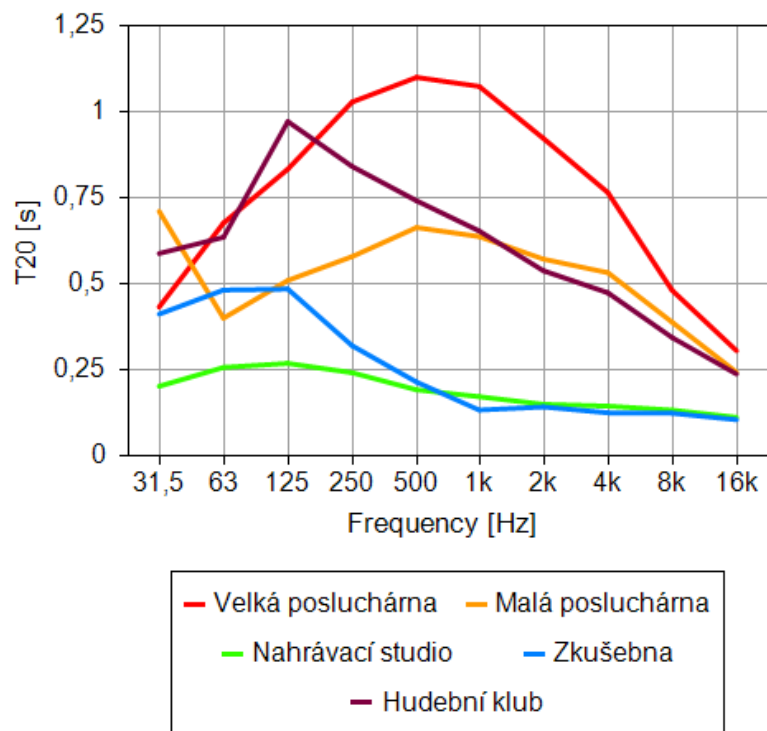
## 6 DISKUZE

Výsledné naměřené hodnoty z malé posluchárny ukazují dobré vlastnosti při využití prostoru jako přednáškové místnosti a to i při měření bez posluchačů. U výsledků z velké posluchárny je nutno brát v potaz, že výsledná nevyhovující doba dozvuku resp. špatná srozumitelnost bude částečně způsobena nepřítomností posluchačů, a tedy při skoro-plném a plném obsazení místnosti by, díky dobré akustické pohltivosti publika, mělo dobu dozvuku a srozumitelnost výrazně zlepšit. Naměřené hodnoty ve velké posluchárně mohou být také ovlivněny velkými rozměry prostoru a menším výkonem používaného zvukového zdroje.

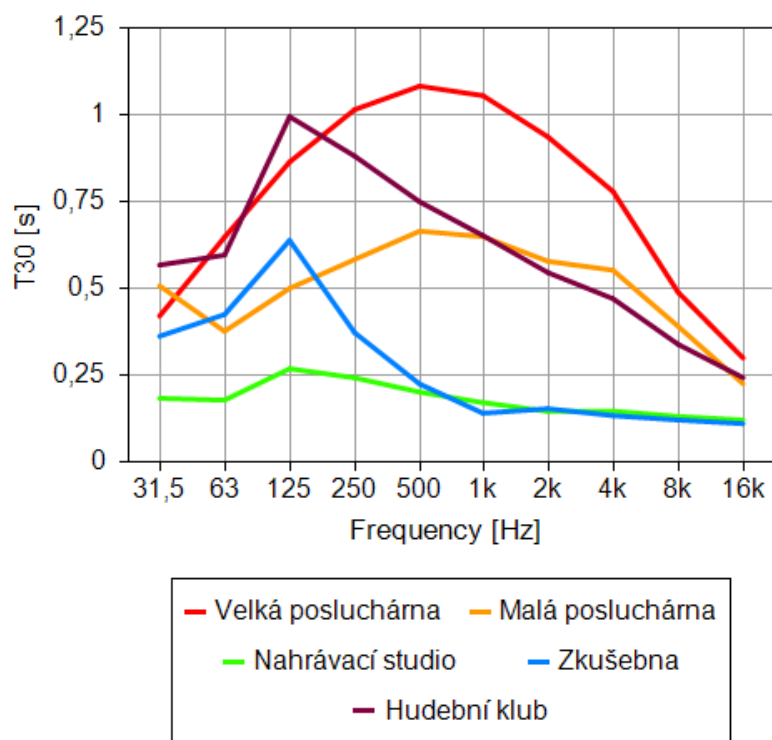
Ve výsledném grafu z měření doby dozvuku v nahrávacím studiu je patrný výkyv nahoru na 125 Hz. Tento výkyv by bylo možné zredukovat vhodnou úpravou interiéru studia akusticky pohltivým materiálem na tyto frekvence a tím dobu dozvuku vyrovnat v celém frekvenčním rozsahu. U změřených hodnot je dobře patrná celkově nejvyrovnanější charakteristika ze všech měřených prostor, což je dáno akustickými úpravami, provedených majiteli studia.

Ve zkušebně je z naměřených výsledných hodnot doby dozvuku patrný podobný výkyv u změřené doby T30 v pásmu 125 Hz a je ovlivněn zřejmě i akusticky nevhodnými rozměry místnosti. Ty jsou téměř soudělnými čísly, a proto lze předpokládat nevyrovnaná měření v různých částech místnosti pro různé frekvence.

Při měření doby dozvuku v sále hudebního klubu se vyskytl v některých částech místnosti problém s naměřením odezvy pro frekvenční pásmo 63 Hz a zřejmě i toto bylo zapříčiněno rozměry sálu. Z výsledného grafu je pak zřejmé, že již úspěšně naměřené hodnoty v tomto pásmu nabývaly i tak výrazně nižších hodnot. Pro vyrovnání doby dozvuku v hudebním klubu by bylo vhodné zvolit úpravu pomocí odrazivých materiálů pro zesílení v tomto pásmu. Zároveň od 5 kHz výše je doba dozvuku pod tolerančním pásmem, což svědčí o přetlumení těchto prostor. Podobně jako u poslucháren je i zde nutno počítat se změnou naměřených hodnot (pokles doby dozvuku, lepší srozumitelnost) při jeho zaplnění publikem. V grafu č. 11 a 12 jsou souhrnně zobrazeny všechny výsledné naměřené doby dozvuku.



**Graf č. 11:** Výsledné hodnoty doby dozvuku T20 v oktávných pásmech naměřené v pěti vybraných prostorech. (exportováno z programu Dirac)



**Graf č. 12:** Výsledné hodnoty doby dozvuku T30 v oktávných pásmech naměřené v pěti vybraných prostorech. (exportováno z programu Dirac)

U velké posluchárny a hudebního klubu je patrná celkově značně nevyrovnaná charakteristika pohybující se v rozmezí skoro jedné sekundy. Jde o prostory s největší kubaturou, a jak bylo uvedeno výše, lze očekávat, že tato nevyrovnanost bude zmírněna obsazeností publikem. Ale s poukazem na značný výkyv doby dozvuku lze usuzovat, že ani po zaplnění nebudou podmínky optimální a že by bylo vhodné se u nich zaměřit na proměření a provedení akustických úprav.

Všechny naměřené hodnoty pro vyhodnocení srozumitelnosti řeči jsou uvedeny v tabulce č. 18. Z výsledných naměřených hodnot indexu přenosu řeči STI lze usuzovat, že obsazení prostoru lidmi má velký vliv na jeho výslednou hodnotu. Patrné je to u výsledných hodnot STI u obou poslucháren, které by měly mít hodnotu 0,7 – 0,9, avšak naměřeny byly hodnoty velmi nízké. Měření v plně obsazeném prostoru pro porovnání výsledků není obsahem této práce.

<b>Výsledné naměřené hodnoty STI</b>			
<b>Prostor</b>	<b>STI ženy</b>	<b>STI muži</b>	<b>Srozumitelnost</b>
Malá posluchárna	0,58	0,59	dostatečná
Velká posluchárna	0,51	0,51	dostatečná
Nahrávací studio	0,68	0,69	dobrá
Zkušebna	0,69	0,69	dobrá
Hudební klub	0,72	0,71	dobrá

**Tabulka č. 18:** Výsledné hodnoty indexu přenosu ženské a mužské řeči naměřené v pěti vybraných prostorech.

#### **IV. ZÁVĚR**

V této práci byla změřena doba dozvuku T20 a T30 a koeficient přenosu řeči STI pro různé druhy prostorů s využitím zvukového analyzátoru B&K 2250L. Doby dozvuku a STI byly získány metodou impulsové odezvy. Z naměřených výsledků byla určena vhodnost či nevhodnost prostoru k určenému účelu a případně doporučeny jednoduché úpravy pro zlepšení akustické kvality (vyrovnanější doba dozvuku, zvýšení STI, ad.). Všechny výsledné naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafu č. 11 a 12 a v tabulce č. 18. V příloze jsou pak uvedeny v tabulkách veškeré naměřené hodnoty ze všech provedených měření a jejich příslušné odchylky.

## V. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [2] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 146 s. ISBN 80-010-2460-1.
- [3] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Překlad Jan Obdržálek, Petr Dub. Brno: Vutium, 2000, s. viii, 330-576. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [4] KAŇKA, Jan. *Akustika stavebních objektů*. Vyd. 1. Brno: Era, 2009, 145 s. ISBN 978-80-7366-140-3.
- [5] NOVÁK, Jan. *Akustická kvalita a pohoda ve výstavbě*. Vyd. 1. Brno: TISK, knižní výroba, n.p., 1981, 160 s. ISBN 04-720-81.
- [6] NOVÝ, Richard. Šíření akustických vln ve volném prostoru. In: *Inteligentní budovy ČVUT* [online]. [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: [http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/SHV/SHV\\_outdoor.pdf](http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/SHV_outdoor.pdf)
- [7] JIŘÍČEK, Ondřej, Marek BROTHÁNEK a Vojtěch JANDÁK. Zvukoměr / akustický analyzátor. In: *Otevřená věda* [online]. [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: [http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/21\\_jiricek.pdf](http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/Fyzika/21_jiricek.pdf)
- [8] MIKULČÁK, J., B. KLIMEŠ, J. ŠIROKÝ, V. ŠŮLA a F. ZEMÁNEK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Vyd. 4. Praha: Prometheus, 2008, 206 s. Pomocné knihy pro žáky. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [9] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2008, 440 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.
- [10] JAN PEŠTA, David Tesař. *Diagnostika staveb: hydroizolace, termografie, blower door test, akustika*. Vyd. 1. Praha: DEKTRADE, 2011. ISBN 978-808-7215-098.

- [11] Application Note: Measuring Speech Intelligibility using DIRAC Type 7841. In: *Brüel & Kjaer* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bo0521.pdf>
- [12] Srozumitelnost lidské řeči. In: *Rockwool Rockfon* [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://cz.rwrockfonvia.inforce.dk/akustika/jak+funguj%C3%AD+akustick%C3%A9+regul%C3%A1tory/srozumitelnost+lidsk%C3%A9+%C5%99e%C4%8Di>
- [13] ZE-0948 USB Audio Interface. In: *Brüel & Kjaer* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/analysis-software/acoustics/building-acoustics/room-acoustic-measurement-dirac/usb-audio-interface-ze-0948>
- [14] PSUTKA, J., J. MATOUŠEK, L. MULLER a V. RADOVÁ. *Mluvíme s počítačem česky*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2006, 746 s. ISBN 80-200-1309-1.
- [15] JUNEK, P., D. POTUŽNÍKOVÁ, T. HELLMUTH, L. PÍŠA a I. KUČERA. Nízkofrekvenční z venkovní produkce hudby a jeho vliv na zdraví nezúčastněných osob v okolí. *Hygiena*. 2011, roč. 2011, č. 56, s. 17. Dostupné z: <http://apps.szu.cz/svi/hygiena/archiv/h2011-1-03-full.pdf>
- [16] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1980, 244 s.

## VI. PŘÍLOHY

### 7 TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

#### 7.1 Měření doby dozvuku T20

Naměřené hodnoty T20 v malé posluchárně										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]
<b>1</b>	0,515	0,389	0,562	0,708	0,657	0,622	0,579	0,546	0,397	0,221
<b>2</b>	1,524	0,424	0,560	0,701	0,666	0,599	0,578	0,543	0,393	0,233
<b>3</b>	0,675	0,400	0,476	0,534	0,679	0,659	0,569	0,525	0,368	0,227
<b>4</b>	0,566	0,386	0,466	0,517	0,683	0,660	0,579	0,519	0,366	0,229
<b>5</b>	0,579	0,356	0,466	0,519	0,683	0,663	0,583	0,521	0,368	0,238
<b>6</b>	0,876	0,425	0,509	0,541	0,635	0,617	0,546	0,525	0,399	0,264
<b>7</b>	0,356	0,366	0,511	0,547	0,644	0,630	0,559	0,528	0,397	0,270
<b>8</b>	0,578	0,437	0,509	0,547	0,643	0,631	0,562	0,533	0,399	0,244
<b>Odchylka</b>	0,361	0,029	0,038	0,080	0,019	0,023	0,013	0,010	0,015	0,018
<b>Minimum</b>	0,356	0,356	0,466	0,517	0,635	0,599	0,546	0,519	0,366	0,221
<b>Maximum</b>	1,524	0,437	0,562	0,708	0,683	0,663	0,583	0,546	0,399	0,270
<b>Průměr</b>	0,709	0,398	0,507	0,577	0,661	0,635	0,569	0,530	0,386	0,241

Naměřené hodnoty T20 ve velké posluchárně										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]	<i>T</i> 20 [s]
<b>1</b>	0,647	0,621	0,846	1,048	1,130	1,091	0,935	0,772	0,503	0,274
<b>2</b>	0,461	0,658	0,863	1,049	1,127	1,092	0,935	0,768	0,502	0,268
<b>3</b>	0,894	0,637	0,872	1,044	1,125	1,069	0,948	0,756	0,503	0,283
<b>4</b>	0,269	0,819	0,809	1,094	1,081	1,031	0,897	0,763	0,468	0,295
<b>5</b>	0,273	0,627	0,799	1,095	1,095	1,033	0,900	0,761	0,467	0,331
<b>6</b>	0,183	0,787	0,807	1,097	1,084	1,041	0,900	0,762	0,471	0,282
<b>7</b>	0,509	0,581	0,823	0,892	1,070	1,103	0,925	0,761	0,460	0,322
<b>8</b>	0,207	0,666	0,829	0,889	1,069	1,113	0,919	0,760	0,454	0,371
<b>Odchylka</b>	0,248	0,084	0,027	0,087	0,026	0,033	0,019	0,005	0,021	0,036
<b>Minimum</b>	0,183	0,581	0,799	0,889	1,069	1,031	0,897	0,756	0,454	0,268
<b>Maximum</b>	0,894	0,819	0,872	1,097	1,130	1,113	0,948	0,772	0,503	0,371
<b>Průměr</b>	0,430	0,674	0,831	1,026	1,098	1,071	0,920	0,763	0,478	0,303



Naměřené hodnoty T20 v nahrávacím studiu										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]
<b>1</b>	0,154	0,365	0,282	0,177	0,189	0,174	0,148	0,148	0,135	0,127
<b>2</b>	0,175	0,312	0,283	0,177	0,193	0,175	0,150	0,128	0,135	0,126
<b>3</b>	0,060	0,031	0,237	0,251	0,180	0,191	0,136	0,153	0,130	0,117
<b>4</b>	0,060	0,032	0,238	0,247	0,181	0,194	0,132	0,149	0,125	0,115
<b>5</b>	0,467	0,294	0,266	0,261	0,188	0,147	0,158	0,146	0,139	0,086
<b>6</b>	0,441	0,303	0,266	0,267	0,186	0,174	0,157	0,148	0,138	0,084
<b>7</b>	0,323	0,375	0,292	0,270	0,144	0,127	0,148	0,162	0,124	0,139
<b>8</b>	0,061	0,279	0,266	0,252	0,223	0,173	0,149	0,125	0,123	0,097
<b>9</b>	0,058	0,303	0,268	0,253	0,222	0,171	0,148	0,122	0,127	0,096
<b>Odchylka</b>	0,168	0,131	0,019	0,036	0,024	0,021	0,009	0,014	0,006	0,020
<b>Minimum</b>	0,058	0,031	0,237	0,177	0,144	0,127	0,132	0,122	0,123	0,084
<b>Maximum</b>	0,467	0,375	0,292	0,270	0,223	0,194	0,158	0,162	0,139	0,139
<b>Průměr</b>	0,200	0,255	0,266	0,239	0,190	0,170	0,147	0,142	0,131	0,110

Naměřené hodnoty T20 ve zkušebně										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]
<b>1</b>	0,555	0,413	0,410	0,402	0,182	0,131	0,107	0,098	0,122	0,083
<b>2</b>	0,651	0,435	0,406	0,394	0,203	0,129	0,141	0,095	0,119	0,085
<b>3</b>	0,478	0,434	0,356	0,396	0,188	0,127	0,099	0,095	0,120	0,085
<b>4</b>	0,535	0,504	0,390	0,240	0,230	0,151	0,165	0,126	0,119	0,116
<b>5</b>	0,356	0,567	0,406	0,234	0,229	0,149	0,161	0,123	0,121	0,118
<b>6</b>	0,346	0,373	0,401	0,232	0,225	0,145	0,159	0,125	0,120	0,118
<b>7</b>	0,400	0,433	0,546	0,251	0,206	0,125	0,155	0,132	0,120	0,103
<b>8</b>	0,508	0,594	0,544	0,252	0,203	0,126	0,157	0,133	0,122	0,083
<b>9</b>	0,411	0,623	0,546	0,254	0,203	0,126	0,157	0,133	0,122	0,103
<b>10</b>	0,060	0,265	0,712	0,350	0,236	0,122	0,135	0,140	0,114	0,106
<b>11</b>	0,067	0,261	0,433	0,223	0,177	0,121	0,164	0,136	0,115	0,108
<b>12</b>	0,065	0,251	0,385	0,233	0,166	0,122	0,123	0,131	0,111	0,106
<b>13</b>	0,351	0,849	0,392	0,374	0,273	0,133	0,137	0,123	0,119	0,108
<b>14</b>	0,374	0,540	0,394	0,374	0,273	0,134	0,137	0,123	0,120	0,112
<b>15</b>	0,388	0,804	0,390	0,374	0,274	0,134	0,135	0,121	0,123	0,110
<b>16</b>	0,612	0,359	0,631	0,341	0,189	0,131	0,135	0,126	0,132	0,104
<b>17</b>	0,551	0,411	0,631	0,343	0,190	0,130	0,135	0,124	0,132	0,105
<b>18</b>	0,600	0,408	0,631	0,367	0,190	0,132	0,132	0,124	0,135	0,106
<b>Odchylka</b>	0,184	0,168	0,112	0,069	0,034	0,009	0,019	0,013	0,006	0,012
<b>Minimum</b>	0,060	0,251	0,356	0,223	0,166	0,121	0,099	0,095	0,111	0,083
<b>Maximum</b>	0,651	0,849	0,712	0,402	0,274	0,151	0,165	0,140	0,135	0,118
<b>Průměr</b>	0,406	0,474	0,478	0,313	0,213	0,131	0,141	0,123	0,121	0,103

Naměřené hodnoty T20 v hudebním klubu										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]	T20 [s]
<b>1</b>	0,27	0,564	1,13	0,862	0,829	0,637	0,538	0,457	0,337	0,243
<b>2</b>	0,969	0,802	0,863	0,803	0,727	0,663	0,557	0,476	0,333	0,252
<b>3</b>	1,283	0,746	0,935	0,775	0,78	0,638	0,517	0,474	0,314	0,245
<b>4</b>	0,153	0,696	0,923	0,806	0,787	0,632	0,53	0,465	0,369	0,247
<b>5</b>	1,254	0,399	1,038	0,939	0,69	0,648	0,552	0,48	0,336	0,210
<b>6</b>	0,497	0,830	1,011	0,881	0,686	0,650	0,545	0,476	0,336	0,182
<b>7</b>	0,084	0,285	0,954	0,851	0,692	0,678	0,512	0,472	0,339	0,236
<b>8</b>	3,16	0,721	1,023	1,104	0,729	0,646	0,522	0,439	0,334	0,236
<b>9</b>	0,195	0,739	0,993	0,849	0,673	0,672	0,516	0,474	0,344	0,240
<b>10</b>	0,065	0,721	0,868	0,804	0,728	0,661	0,56	0,474	0,334	0,253
<b>Odchylka</b>	0,908	0,179	0,082	0,096	0,051	0,016	0,018	0,012	0,013	0,022
<b>Minimum</b>	0,065	0,285	0,863	0,775	0,673	0,632	0,512	0,439	0,314	0,182
<b>Maximum</b>	3,160	0,830	1,130	1,104	0,829	0,678	0,56	0,48	0,369	0,253
<b>Průměr</b>	0,872	0,650	0,974	0,867	0,732	0,653	0,535	0,469	0,338	0,234

## 7.2 Měření doby dozvuku T30

Naměřené hodnoty T30 v malé posluchárně										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]
<b>1</b>	0,501	0,410	0,597	0,645	0,649	0,630	0,591	0,562	0,384	0,199
<b>2</b>	0,192	0,406	0,600	0,643	0,649	0,633	0,594	0,566	0,382	0,211
<b>3</b>	0,636	0,341	0,426	0,576	0,674	0,657	0,590	0,556	0,376	0,199
<b>4</b>	0,524	0,330	0,422	0,495	0,684	0,657	0,583	0,557	0,372	0,202
<b>5</b>	0,531	0,331	0,416	0,495	0,684	0,660	0,586	0,558	0,374	0,214
<b>6</b>	0,864	0,387	0,494	0,591	0,654	0,649	0,517	0,496	0,409	0,257
<b>7</b>	0,351	0,364	0,510	0,602	0,654	0,645	0,571	0,552	0,405	0,272
<b>8</b>	0,442	0,423	0,516	0,600	0,653	0,645	0,573	0,555	0,407	0,228
<b>Odchylka</b>	0,197	0,038	0,074	0,058	0,015	0,011	0,025	0,022	0,016	0,028
<b>Minimum</b>	0,192	0,330	0,416	0,495	0,649	0,630	0,517	0,496	0,372	0,199
<b>Maximum</b>	0,864	0,423	0,600	0,645	0,684	0,660	0,594	0,566	0,409	0,272
<b>Průměr</b>	0,505	0,374	0,498	0,581	0,663	0,647	0,576	0,550	0,388	0,223

Naměřené hodnoty T30 ve velké posluchárně										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]
<b>1</b>	0,641	0,671	0,870	1,065	1,113	1,068	0,953	0,777	0,497	0,244
<b>2</b>	0,467	0,603	0,877	1,066	1,111	1,065	0,957	0,778	0,505	0,239
<b>3</b>	0,882	0,594	0,875	1,069	1,111	1,070	0,953	0,771	0,500	0,248
<b>4</b>	0,248	0,803	0,825	1,064	1,063	1,017	0,911	0,774	0,478	0,259
<b>5</b>	0,264	0,572	0,819	1,057	1,064	1,017	0,910	0,773	0,477	0,490
<b>6</b>	0,174	0,713	0,826	1,064	1,062	1,025	0,912	0,775	0,478	0,238
<b>7</b>	0,491	0,574	0,914	0,860	1,059	1,084	0,936	0,785	0,478	0,313
<b>8</b>	0,178	0,632	0,887	0,857	1,059	1,079	0,940	0,780	0,480	0,343
<b>Odchylka</b>	0,251	0,080	0,035	0,096	0,026	0,028	0,021	0,005	0,012	0,087
<b>Minimum</b>	0,174	0,572	0,819	0,857	1,059	1,017	0,910	0,771	0,477	0,238
<b>Maximum</b>	0,882	0,803	0,914	1,069	1,113	1,084	0,957	0,785	0,505	0,490
<b>Průměr</b>	0,418	0,645	0,862	1,013	1,080	1,053	0,934	0,777	0,487	0,297

Naměřené hodnoty T30 v nahrávacím studiu										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]	<i>T</i> 30 [s]
<b>1</b>	0,162	0,221	0,292	0,221	0,201	0,158	0,146	0,144	0,128	0,116
<b>2</b>	0,177	0,240	0,292	0,221	0,204	0,157	0,145	0,144	0,127	0,116
<b>3</b>	0,048	0,093	0,239	0,220	0,196	0,174	0,142	0,147	0,131	0,116
<b>4</b>	0,049	0,093	0,242	0,218	0,196	0,176	0,142	0,145	0,131	0,115
<b>5</b>	0,393	0,311	0,274	0,258	0,212	0,171	0,141	0,142	0,125	0,124
<b>6</b>	0,380	0,302	0,274	0,258	0,212	0,171	0,143	0,141	0,124	0,125
<b>7</b>	0,268	0,299	0,267	0,280	0,142	0,180	0,161	0,172	0,143	0,136
<b>8</b>	0,075	0,011	0,258	0,243	0,215	0,165	0,135	0,133	0,123	0,108
<b>9</b>	0,077	0,012	0,258	0,242	0,212	0,165	0,135	0,130	0,124	0,110
<b>Odchylka</b>	0,137	0,124	0,019	0,022	0,023	0,008	0,008	0,012	0,006	0,009
<b>Minimum</b>	0,048	0,011	0,239	0,218	0,142	0,157	0,135	0,130	0,123	0,108
<b>Maximum</b>	0,393	0,311	0,292	0,280	0,215	0,180	0,161	0,172	0,143	0,136
<b>Průměr</b>	0,181	0,176	0,266	0,240	0,199	0,169	0,143	0,144	0,129	0,118

Naměřené hodnoty T30 ve zkušebně										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]
1	0,444	0,320	0,808	0,187	0,172	0,134	0,154	0,132	0,119	0,107
2	0,486	0,411	0,833	0,690	0,204	0,136	0,153	0,133	0,117	0,105
3	0,420	0,354	0,472	0,681	0,268	0,129	0,155	0,133	0,119	0,106
4	0,331	0,385	0,749	0,194	0,237	0,146	0,158	0,131	0,119	0,110
5	0,334	0,499	0,752	0,209	0,223	0,144	0,153	0,129	0,120	0,112
6	0,331	0,363	0,754	0,206	0,225	0,142	0,152	0,130	0,121	0,111
7	0,328	0,394	0,512	0,215	0,197	0,143	0,154	0,132	0,113	0,103
8	0,466	0,526	0,507	0,216	0,196	0,144	0,155	0,134	0,113	0,104
9	0,367	0,494	0,509	0,218	0,197	0,144	0,156	0,134	0,114	0,104
10	0,059	0,194	0,672	0,343	0,242	0,126	0,152	0,137	0,115	0,106
11	0,066	0,193	0,656	0,325	0,233	0,126	0,149	0,136	0,116	0,107
12	0,063	0,193	0,673	0,327	0,228	0,128	0,147	0,132	0,112	0,107
13	0,272	0,478	0,388	0,344	0,197	0,142	0,149	0,131	0,119	0,109
14	0,240	0,619	0,392	0,345	0,203	0,143	0,148	0,130	0,118	0,111
15	0,375	0,491	0,388	0,345	0,205	0,143	0,147	0,129	0,122	0,109
16	0,584	0,339	0,830	0,551	0,257	0,138	0,145	0,125	0,126	0,111
17	0,732	0,898	0,834	0,551	0,258	0,140	0,145	0,124	0,126	0,110
18	0,548	0,393	0,838	0,553	0,258	0,141	0,146	0,125	0,128	0,113
<b>Odchylka</b>	0,180	0,168	0,169	0,170	0,027	0,007	0,004	0,004	0,005	0,003
<b>Minimum</b>	0,059	0,193	0,388	0,187	0,172	0,126	0,145	0,124	0,112	0,103
<b>Maximum</b>	0,732	0,898	0,838	0,690	0,268	0,146	0,158	0,137	0,128	0,113
<b>Průměr</b>	0,358	0,419	0,643	0,361	0,222	0,138	0,151	0,131	0,119	0,108

Naměřené hodnoty T30 v hudebním klubu										
<i>f</i> [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]	T30 [s]
1	0,251	0,652	1,137	0,889	0,780	0,655	0,542	0,464	0,343	0,242
2	0,960	0,710	0,959	0,860	0,735	0,658	0,548	0,463	0,332	0,252
3	1,235	0,712	0,934	0,831	0,767	0,632	0,536	0,470	0,322	0,232
4	0,148	0,623	0,908	0,865	0,787	0,619	0,536	0,475	0,348	0,258
5	1,194	0,363	1,026	0,886	0,730	0,654	0,544	0,467	0,338	0,225
6	0,484	0,750	1,009	0,873	0,736	0,646	0,540	0,468	0,338	0,226
7		0,242	1,019	0,919	0,726	0,666	0,549	0,472	0,339	0,237
8	3,127	0,460	1,158	0,912	0,749	0,653	0,547	0,450	0,334	0,240
9	0,190	0,690	1,025	0,920	0,723	0,661	0,545	0,470	0,337	0,239
10	0,059	0,598	0,916	0,866	0,739	0,657	0,548	0,463	0,332	0,252
<b>Odchylka</b>	0,969	0,169	0,086	0,029	0,023	0,014	0,005	0,007	0,007	0,011
<b>Minimum</b>	0,059	0,242	0,908	0,831	0,723	0,619	0,536	0,450	0,322	0,225
<b>Maximum</b>	3,127	0,750	1,158	0,920	0,787	0,666	0,549	0,475	0,348	0,258
<b>Průměr</b>	0,850	0,580	1,009	0,882	0,747	0,650	0,543	0,466	0,336	0,240

## 8 FOTOGRAFIE MĚŘENÝCH PROSTOR

### 8.1 Malá posluchárna



## 8.2 Velká posluchárna

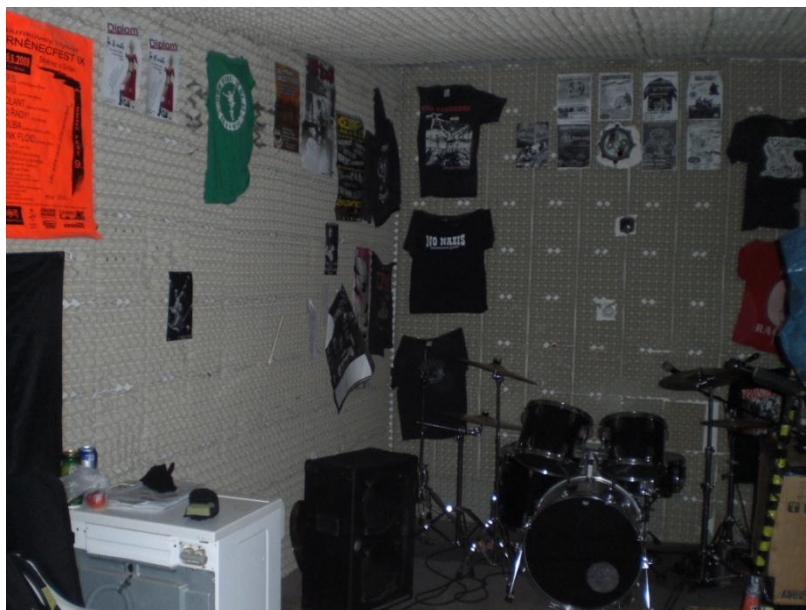


### 8.3 Nahrávací studio





## 8.4 Zkušebna





## 8.5 Hudební klub

