



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh akustických úprav malých poslechových prostorů

Autor práce:

Bc. Stanislav Bouzek

Vedoucí práce:

Ing. Martin Schlosser

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav BOUZEK**  
Osobní číslo: **E13N0114P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**  
Název tématu: **Návrh akustických úprav malých poslechových prostorů**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte možnosti akustických úprav malých prostorů s důrazem na tlumení nízkých frekvencí.
2. Navrhněte akustické úpravy vybrané místnosti.
3. Zrealizujte vybraný prvek akustických úprav a ověřte jeho parametry.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Kolmer F., Kyncl J.: Prostorová akustika-kniha. Praha: SNTL , 1982
2. Krňák, M.: Akustické obklady. Praha: VUZORT, 1971
3. Cox T., D'Antonio P.: Acoustic Absorbers and Diffusers 2 Rev Ed. United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2009
4. Vaverka J.: Stavební fyzika I. Brno: VUT, 1998
5. Kuttruff H.: Room Acoustics. Oxfordshire: Spon Press, 2009


Vedoucí diplomové práce: **Martin Schlosser**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

# Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na akustické úpravy malých poslechových prostorů. V úvodu práce jsou probrány základní teoretické znalosti z prostorové akustiky a měření parametrů prostorů. Jedna kapitola je věnována přehledu používaných akustických prvků. Další část práce se zabývá řešením akustických parametrů vybrané místnosti. Na základě měření bylo navrženo několik akustických prvků. Pohltivé panely byly zkonstruovány a jejich parametry byly ověřeny v dozvukové komoře. Výsledky měření jsou shrnuty v závěru práce.

## Klíčová slova

prostorová akustika, doba dozvuku, vlastní kmity, akustické prvky, Helmholtzův rezonátor, RPG difuzor, QRD difuzor

# Abstract

Bouzek, Stanislav. *Acoustic treatments of small listening rooms* [*Návrh akustických úprav malých poslechových prostorů*]. Pilsen, 2015. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Martin Schlosser

---

This master thesis deals with acoustic treatments of small listening rooms. The introduction discusses the basic theoretical knowledges of room acoustics and measurement of room parameters. The fourth chapter is involved to an overview of the acoustic elements. Another part deals with the solution of acoustic parameters of the chosen room. It has been proposed several acoustic elements on the basis of measurements. The absorbing panels were constructed and their parameters were verified in a reverberation chamber. The measurement results are summarized in the conclusion.

## Keywords

room acoustics, reverberation time, room modes, acoustic elements, Helmholtz resonator, RPG diffuser, QRD diffuser

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11. května 2015

Bc. Stanislav Bouzek

.....

Podpis

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Základní pojmy prostorové akustiky</b>	<b>3</b>
2.1 Doba dozvuku . . . . .	3
2.2 Vlastní kmitů prostoru . . . . .	4
<b>3 Měření v prostorové akustice</b>	<b>6</b>
3.1 Měření doby dozvuku . . . . .	6
3.1.1 Metoda přerušovaného šumu . . . . .	6
3.1.2 Metoda integrované impulzní odezvy . . . . .	7
3.1.3 Další metody měření doby dozvuku . . . . .	7
3.2 Měření vlastních kmitů prostoru . . . . .	8
<b>4 Materiály a prvky používané pro akustické úpravy</b>	<b>9</b>
4.1 Porézní materiály . . . . .	9
4.2 Kmitající panely a membrány . . . . .	10
4.3 Rezonátory . . . . .	12
4.4 Rozptylové prvky . . . . .	13
<b>5 Současný stav prostoru</b>	<b>15</b>
5.1 Výběr poslechového místa . . . . .	15
5.2 Předpokládané úpravy . . . . .	18
5.3 Měření doby dozvuku . . . . .	18
5.4 Měření vlastních kmitů místnosti . . . . .	19
<b>6 Návrh akustických úprav</b>	<b>23</b>
6.1 Rezonátor pro pásmo do 200 Hz . . . . .	23
6.2 Pohltivé panely . . . . .	26

6.3	Rozptylové prvky . . . . .	30
6.3.1	Návrh RPG difuzoru . . . . .	30
6.3.2	Návrh 2D-QRD difuzoru . . . . .	33
<b>7</b>	<b>Měření pohltivých panelů v dozvukové komoře</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>39</b>
	Reference, použitá literatura	41
	Přílohy	43
<b>A</b>	<b>Výkresy</b>	<b>43</b>
<b>B</b>	<b>Pohltivé panely</b>	<b>50</b>
<b>C</b>	<b>Měření vlastních kmitů</b>	<b>55</b>
<b>D</b>	<b>Tabulky</b>	<b>59</b>



# Seznam obrázků

2.1	Časový průběh doby dozvuku, převzato s úpravami z [1] . . . . .	3
2.2	Doporučené poměry stran prostoru z hlediska akustiky, převzato s úpravami z [2] . . . . .	5
4.1	Použití porézního materiálu - a) tloušťka materiálu 25 mm, b) tloušťka materiálu 50 mm, c) tloušťka materiálu 25 mm, vzduchový polštář 30 mm, d) tloušťka materiálu 50 mm, vzduchový polštář 30 mm, převzato s úpravami z [1] . . . . .	10
4.2	Kmitající panel, převzato s úpravami z [1] . . . . .	11
4.3	Helmholtzův rezonátor, převzato z [8] . . . . .	12
4.4	Korekce délky otvoru . . . . .	13
4.5	Závislost činitele pohltivosti $\alpha$ Helmholtzova rezonátoru na poměru $Re_z/z_0$ , převzato s úpravami z [1] . . . . .	14
4.6	Typy difuzorů . . . . .	14
5.1	Pohled na poslechové místo . . . . .	16
5.2	Pohled z poslechového místa . . . . .	16
5.3	Varianty poslechových míst . . . . .	17
5.4	Rozmístění mikrofonů a zdrojů zvuku pro měření doby dozvuku . . . . .	19
5.5	Doba dozvuku prostoru - porovnání výsledků . . . . .	20
5.6	Blokové schéma měření doby dozvuku pomocí analyzátoru . . . . .	20
5.7	Blokové schéma měření vlastních kmitů . . . . .	21
5.8	Vlastní kmity - poslechové místo . . . . .	22
5.9	Porovnání vlastních frekvencí měřených mikrofonem a vibrací stěny . . . . .	22
6.1	Akustické úpravy zvoleného prostoru . . . . .	24
6.2	Vlastní kmity prostoru v oblasti 50 až 300 Hz . . . . .	25
6.3	Vliv tlumení rezonátoru na $\alpha_0$ , převzato z [4] . . . . .	26
6.4	Pohltivé panely . . . . .	27
6.5	Skladba pohltivého panelu . . . . .	28
6.6	Doba dozvuku před a po aplikaci pohltivých panelů a jehlanů . . . . .	29
6.7	Rozptyl doby dozvuku - měření systémem Pulse . . . . .	30
6.8	Skladba hranolů 2D RPG difuzoru . . . . .	33

6.9	Vizualizace umístění akustických prvků 1 . . . . .	34
6.10	Vizualizace umístění akustických prvků 2 . . . . .	34
7.1	Blokové schéma zapojení měření doby dozvuku v dozvukové komoře . . . . .	36
7.2	Měření panelů v dozvukové komoře . . . . .	36
7.3	Závislost ekvivalentní pohltivé plochy realizovaného panelu na frekvenci . . . . .	37
A.1	Půdorys řešeného prostoru . . . . .	43
A.2	Bokorys řešeného prostoru . . . . .	44
A.3	Polohy mikrofonů pro měření doby dozvuku a vlastních kmitů prostoru . . . . .	44
A.4	Polohy mikrofonů pro měření vlastních kmitů v rozích prostoru . . . . .	45
A.5	Polohy mikrofonů pro měření rozložení pole kolem poslechového místa . . . . .	45
A.6	Polohy akcelerometrů pro měření vibrací stěn - půdorys . . . . .	46
A.7	Polohy akcelerometrů pro měření vibrací stěn - bokorys . . . . .	46
A.8	Polohy akcelerometrů pro měření vibrací stěn - nárys . . . . .	47
A.9	Rozměry dozvukové komory, polohy mikrofonů . . . . .	48
A.10	Rezonátor - výkres přední desky . . . . .	49
B.1	Pohltivý panel - výkres . . . . .	50
B.2	Deska T-MA3 - katalogový list 1 . . . . .	51
B.3	Deska T-MA3 - katalogový list 2 . . . . .	52
B.4	Konstrukce pohltivého panelu - síť pro vymezení vzdálenosti od přední desky . . . . .	53
B.5	Konstrukce pohltivého panelu - celkový pohled . . . . .	53
B.6	Akustické jehly, výška 70 mm - katalogový list, převzato z [15] . . . . .	54
C.1	Vlastních kmity v pozici M5 - poslechové místo . . . . .	55
C.2	Vlastních kmity v pozici M3 . . . . .	56
C.3	Vlastních kmity v pozici 17 . . . . .	56
C.4	Vlastních kmity v pozici 18 . . . . .	57
C.5	Vlastních kmity v pozici 22 . . . . .	57
C.6	Vlastních kmity v pozici 23 . . . . .	58

# Seznam tabulek

5.1	Materiály použité v místnosti . . . . .	17
5.2	Měřicí přístroje - měření prostoru . . . . .	20
6.1	Návrh rezonátoru - rozměry otvorů . . . . .	25
6.2	Katalogové hodnoty zvukové pohltivosti $\alpha$ akustických panelů T-MA3, varianty o tloušťce 100 mm . . . . .	27
6.3	Skladba pohltivého panelu . . . . .	28
6.4	Rozměry difuzorů . . . . .	32
6.5	Difuzor 1 - hloubky šachet . . . . .	32
6.6	Difuzor 2 - hloubky šachet . . . . .	32
6.7	2D RPG difuzor - délky hranolů . . . . .	33
6.8	Přehled zamýšlených akustických prvků . . . . .	33
7.1	Měřicí přístroje - měření v dozvukové komoře . . . . .	35
D.1	Doba dozvuku prostoru . . . . .	59
D.2	Polohy mikrofonů v dozvukové komoře . . . . .	60
D.3	Polohy zdroje v dozvukové komoře . . . . .	60
D.4	Měření v dozvukové komoře - skupiny mikrofonů . . . . .	60
D.5	Měření v dozvukové komoře - měřicí podmínky a konfigurace . . . . .	61
D.6	Měření v dozvukové komoře - doba dozvuku . . . . .	61

# Seznam symbolů a zkratek

$T_E$ .....	Doba dozvuku podle Eirynga.
$T_S$ .....	Doba dozvuku podle Sabineho.
$c_0$ .....	Rychlost šíření zvuku ve vzduchu.
$f_k$ .....	Kritická frekvence prostoru.
$f_m$ .....	Mezní frekvence účinnosti porézního materiálu.
$f_r$ .....	Rezonanční frekvence.
$\alpha$ .....	Činitel zvukové pohltivosti.
$\alpha_S$ .....	Činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad.
$\alpha_N$ .....	Činitel zvukové pohltivosti pro kolmý dopad.
$T_{30}$ .....	Doba dozvuku, měřeno pro pokles o 30 dB.
MLS signály .....	Maximal length sequence. Binární sekvence s délkou $2n-1$ bitů.
SS signály .....	Sweep sine. Rozmítané sinusové signály.
$\lambda$ .....	Vlnová délka.
$\alpha$ .....	Činitel zvukové pohltivosti.
$f_r$ .....	Rezonanční frekvence.
$Q$ .....	Činitel jakosti rezonátoru.
RPG .....	Reflection Phase Grating. Akustická difrakční mřížka.
2D QRD .....	Two dimensional Quadratic Residue Diffuser. Dvourozměrný kvadratický difuzor.
PVC .....	Polyvinylchlorid - umělá hmota.
OSB .....	Oriented strand board. Lisovaná deska z velkoplošných třísek.
near-field monitory ..	Monitory pro poslech v blízkém poli.
CPB .....	Constant Percentage Bandwidth. Analýza s konstantní šířkou pásma.
FFT .....	Fast Fourier Transform. Rychlá Fourierova transformace.
DTD .....	Dřevotřísková deska.
DTD .....	Dřevotřísková deska.

# 1

## Úvod

Při řešení poslechu, ať už v domácích podmínkách nebo amatérských studiích, se často klade důraz pouze na výběr kvalitní reprosoustavy. Akustické parametry využívaného prostoru nebývají řešeny hlavně z důvodu neznalosti základních pojmů prostorové akustiky. Může se tak stát, že i po nákupu kvalitní a finančně nákladné reprosoustavy dojem ze zvukového projevu nesplní očekávání. Na vině může být akustika prostoru, ale například i nevhodné umístění reproduktorů příliš blízko stěn. Jen umístěním reproduktorů v příliš malé vzdálenosti od stěny dojde k nárůstu nízkých frekvencí, při umístění v rohu místnosti může tento nárůst dosáhnout až 9 dB. Z tohoto důvodu mají některé typy reproduktorů možnost korekce na basových frekvencích o -3, -6 a -9 dB. Každý prostor má díky svým rozměrům, použitým materiálům, ale i konstrukci stěn a vnitřnímu vybavení vliv na zvukový projev použité reprosoustavy. Určitá frekvenční pásma mohou být prostorem tlumena více než ostatní a mohou tak zhoršovat průběh frekvenční charakteristiky zdroje zvuku. Pokud v prostoru není dostatek ploch pohltivých materiálů může být vinou delší doby dozvuku zhoršena srozumitelnost. Dalším důležitým parametrem je například rovnoměrné rozložení akustického pole alespoň v prostoru kolem uvažovaného poslechového místa. Z těchto několika uvedených příkladů je vidět, že vliv na perfektní zvuk nemá pouze vlastní reproduktorová soustava a další technika v poslechovém řetězci ale i poslechový prostor. Řešení nemusí být vždy složité, nákladné nebo nevzhledné, zlepšit akustiku prostoru lze například vhodným umístěním nábytku, závěsy nebo zajímavě provedenými akustickými prvky.

Tématem prostorové akustiky se zabývá i poměrně mnoho česky psaných publikací převážně staršího data vydání. Některé knihy obsahují i příklady řešení jednotlivých prvků včetně změřených parametrů a konstrukčních detailů. Výběrem některého z takto popsaných prvků je možné si ušetřit cestu složitého návrhu. Zahraniční literatura obsahuje často i složitější postupy, které nejsou shrnuty jen empirickým vztahem a umožňují tak přesnější návrh za cenu vyšší složitosti výpočtů. V dnešní době výpočetní techniky existuje mnoho softwarových kalkulátorů umožňujících rychlý návrh, často ale není uvedeno podle jakého postupu software prvek navrhuje. Je vhodné porovnat výsledky z více kalkulátorů nebo i s vlastním výpočtem podle některé z ověřených knih.

V práci budou nejprve probrány základní pojmy z prostorové akustiky, včetně měřících postupů pro získání důležitých akustických parametrů prostorů. Na základě měření je pak možné stanovit problematická místa a navrhnout vhodná řešení. Další část bude zaměřena na úpravy prostoru a akustické prvky pro snížení doby dozvuku a zrovnoměnění rozložení akustického pole. Pro vybranou místnost budou na základě výsledků měření navrženy akustické úpravy, jeden z navržených prvků bude realizován a jeho parametry budou ověřeny měřením. Teoretická část práce je rešerší uvedených zdrojů, praktická část vychází ze znalostí získaných při samostudiu doporučené literatury a z učiva zaměřeného na akustiku v bakalářském a navazujícím studiu.

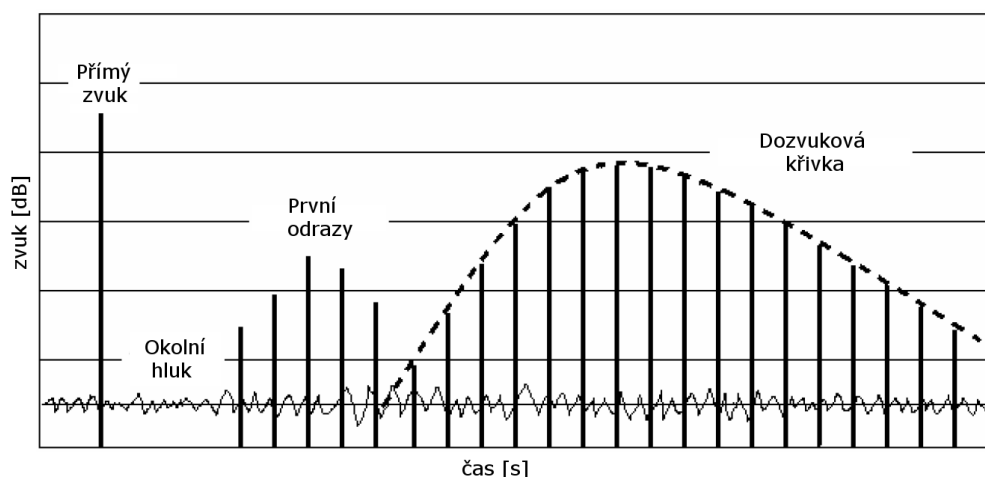
## 2

# Základní pojmy prostorové akustiky

V této kapitole je čerpáno převážně z [1].

## 2.1 Doba dozvuku

V uzavřeném prostoru může nastat tzv. ustálený stav, kdy akustický zdroj dodává právě tolik energie, aby pokryl energii pohlcenou stěnami a udržel konstantní hodnotu akustické energie v prostoru. Po vypnutí akustického zdroje je energie pohlcována až zcela zanikne. Doba za kterou klesne intenzita akustického pole uvnitř prostoru o 60 dB je označována jako doba dozvuku, zvuk v šířící se v prostoru po vypnutí zdroje jako dozvuk. Do časového průběhu doby dozvuku se promítne nejprve přímý zvuk od zdroje a následně další odrazy z různých směrů, idealizovaný časový průběh je na obrázku 2.1.



**Obr. 2.1:** Časový průběh doby dozvuku, převzato s úpravami z [1]

Doba dozvuku je jedním z charakteristických parametrů pro určení vlastností prostoru. Při znalosti použitých materiálů v prostoru ji lze poměrně přesně určit výpočtem. V praxi se ustálilo několik vztahů, které jsou vhodné pro různé prostory. Norma ČSN 73 0525 doporučuje pro výpočet doby dozvuku Eyringův vztah (2.1), ten je vhodný pro materiály

stěn s vyšší zvukovou pohltivostí.

$$T_{\mathbf{E}} = \frac{0.164 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{\mathbf{S}}) + 4 \cdot m \cdot V} \quad (2.1)$$

kde:

$T_{\mathbf{E}}$	doba dozvuku v s
$V$	objem místnosti v m <sup>3</sup>
$S$	celková plocha ohraničujících stěn v m <sup>2</sup>
$\alpha$	střední činitel pohltivosti
$m$	činitel útlumu ve vzduchu (m <sup>-1</sup> ), který se uplatní nad 2 kHz a u velkých prostorů

Pro materiály s nízkou průměrnou zvukovou pohltivostí je vhodnější vztah 2.2 podle Sabineho. Celkovou pohltivost  $\alpha$  lze určit z dílčích ploch a odpovídajících pohltivostí vztahem 2.3.

$$T_{\mathbf{S}} = \frac{0.164 \cdot V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad (2.2)$$

$$A = \frac{1}{S} \sum \alpha_i \cdot S_i \quad (2.3)$$

kde:

$A$	celková pohltivost v m <sup>2</sup>
$T_{\mathbf{S}}$	doba dozvuku v s
$V$	objem prostoru v m <sup>3</sup>
$S_i$	plocha dílčího materiálu v m <sup>2</sup>
$\alpha_i$	činitel pohltivosti dílčího materiálu
$m$	činitel útlumu ve vzduchu (m <sup>-1</sup> ), který se uplatní nad 2 kHz a u velkých prostorů

## 2.2 Vlastní kmity prostoru

V uzavřeném prostoru vznikají na frekvencích odpovídajících jeho rozměrům vlastní kmity. Tyto vlastní frekvence jsou pro případ kvádrového prostoru dány vztahem 2.4

$$f_{\text{mathbf{N}}} = \frac{c_{\text{mathbf{f}0}}}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [Hz] \quad (2.4)$$

kde:

$c_0$	rychlost šíření zvuku ve vzduchu (340 m.s <sup>-1</sup> )
$l_x, l_y, l_z$	rozměry prostoru v m
$n_x, n_y, n_z$	celá čísla



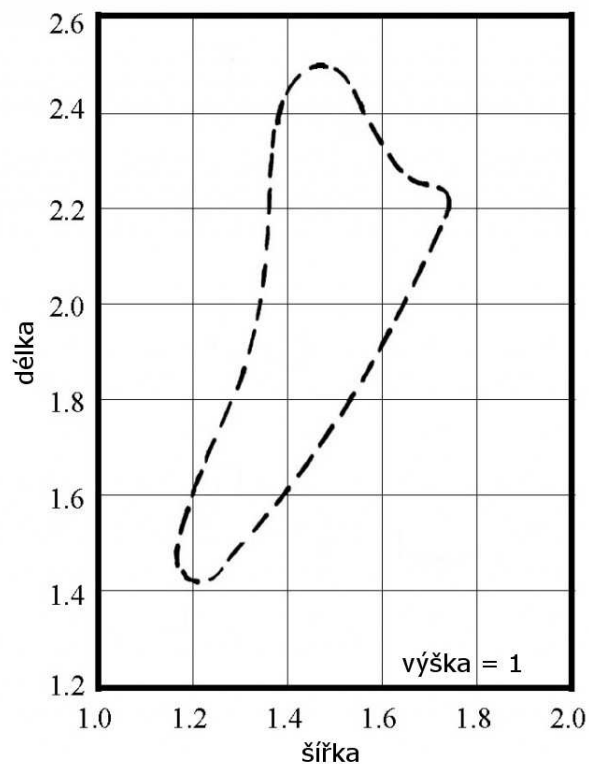
Z pohledu prostorové akustiky je požadováno, aby vlastní frekvence a jejich vyšší harmonické byly co možná nejrovnoměrněji rozloženy, zcela nevhodné jsou prostory kde je jeden rozměr celistvým násobkem druhého. Rovnoměrné rozložení kmitů nelze dodržet v oblasti nejnižších frekvencí, kmitočet od kterého je možné uvažovat vyrovnanost akustického pole je nazýván kritickým a je možné ho určit z doby dozvuku a objemu prostoru vztahem 2.5.

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.5)$$

kde:

$T$  doba dozvuku v s  
 $V$  objem prostoru v m<sup>3</sup>

Při stavbě nového prostoru je vhodné uvažovat i nad akustickými parametry a vycházet z doporučených poměrů stěn, ty mohou být zadány tabulkou nebo graficky (viz například obrázek 2.2, kde jsou doporučené poměry stran kvádřového prostoru uzavřeny čárkovanou křivkou). Také je vhodné z důvodů zamezení vzniku stojatého vlnění nedodržovat rovnoběžnost protilehlých stěn, ale alespoň jednu ze stěn natočit o 2° až 5°.



**Obr. 2.2:** Doporučené poměry stran prostoru z hlediska akustiky, převzato s úpravami z [2]

# 3

## Měření v prostorové akustice

Informace do této kapitoly byly čerpány převážně z [9], [6] a [7].

### 3.1 Měření doby dozvuku

Dobu dozvuku prostoru je možné určit výpočtem, jak je popsáno v [1] - kapitola 6.1.1. Pokud ale neznáme přesné hodnoty zvukové pohltivosti  $\alpha$  všech použitých materiálů, nemusí vypočtená doba dozvuku odpovídat reálné době dozvuku prostoru. Mnohem přesnější výsledky lze získat měřením doby dozvuku. Podmínky a postup měření jsou stanoveny normami. Při měření doby dozvuku poslechového prostoru lze vycházet z normy ČSN EN ISO 3382-1 Měření parametrů prostorové akustiky - Prostory pro přednes hudby a řeči. Dobu dozvuku je možné měřit několika metodami, norma [6] uvádí metodu přerušovaného šumu a metodu integrované impulsové odezvy, dále je možné využít například metody měření pomocí MLS a SS signálů.

#### 3.1.1 Metoda přerušovaného šumu

Jedná se o jednu z nejnámějších a nejpoužívanějších metod měření doby dozvuku. K vybudení uzavřeného prostoru se používá všesměrový zdroj zvuku. Budícím signálem je širokopásmový náhodný nebo pseudonáhodný šum. Prostor je nutné pro měření  $T_{30}$  (pokles o 30 dB) vybudit minimálně o 45 dB nad úroveň tlaku hlukového pozadí. Po ustálení stavu dojde k vypnutí zdroje šumu a zaznamenávají se poklesové křivky. Minimální doba ustálení závisí na rozměrech prostoru a neměla by být menší než polovina předpokládané doby dozvuku. Norma udává použití všesměrových mikrofonů s průměrem membrány maximálně 13 mm. Poklesové křivky se zaznamenávají pro střední kmitočty buď v oktávových pásmech od 125 Hz do 4000 Hz nebo v třetinooktávových pásmech od 100 Hz do 5000 Hz. Protože je prostor buzen náhodným šumovým signálem, je nutné provádět několik měření pro jednu konfiguraci mikrofonů a zdroje zvuku a naměřené hodnoty průměrovat - tzv. skupinové průměrování. Za účelem eliminace nerovnoměrného rozložení zvukového pole se měří ve více bodech prostoru. Počet pozic mikrofonu závisí na rozměrech prostoru, ale

měřicí body by měly pokrýt celý prostor. Mikrofony by se ideálně měly nacházet ve vzdálenosti minimálně 1 m od okolních odrazivých překážek, včetně podlahy a minimálně 2 m od sebe. Tyto hodnoty vychází z poloviny a čtvrtiny vlnové délky nejnižší měřené frekvence. Měnit by se v průběhu měření měla i poloha měřicího zdroje zvuku, umístění je vhodné volit podle používané nebo zamýšlené polohy zdroje zvuku. Měření v jedné konfiguraci zdroje zvuku a poloh mikrofónů je také vhodné několikrát opakovat. Výsledkem je pak průměr získaný jako střední hodnota doby dozvuku z jednotlivých měřicích konfigurací. Výhodou je jednoduchost metody a snadné vyhodnocení výsledku z poklesových křivek. Metoda je ale časově náročná, protože vyžaduje velké množství opakování z důvodu průměrování, nevýhodou je i potřeba vysoké úrovně akustického tlaku pro dostatečné buzení nad hlukem pozadí.

### 3.1.2 Metoda integrované impulzní odezvy

Prostor není buzen do ustáleného stavu šumem jako v předchozí metodě, ale pouze krátkým impulzem s vysokou úrovní. Teoreticky by byl nejvýhodnější nekonečně krátký impulz s nekonečně velkou energií, tzv. Diracův impulz. Toho ale není možné reálně dosáhnout, proto se používá například výstřelu z pistole nebo speciálních druhů pulzů a sledů. Při měření je zaznamenána impulzní odezva, která je dále zpracována výpočetním systémem podle vztahů uvedených v normě [6]. Postup není složitý a bylo ho i v dřívějších dobách možné realizovat analogově. Hlavní výhodou oproti měření přerušovaným šumem je nekolidování výsledků z jednotlivých měření. Jedno impulzní měření odpovídá kvalitativně podle [6] až 10 měřením předchozí metodou. Z naměřené impulzní odezvy je také možné určit další akustické parametry prostoru, například tzv. počáteční dobu dozvuku, která více odpovídá subjektivnímu vnímání doby dozvuku.

### 3.1.3 Další metody měření doby dozvuku

Dalšími metodou je například měření pomocí MLS signálů. Patří také do skupiny impulzních měření. Impulzní odezva měřeného prostoru se získává korelací mezi vyslaným MLS signálem a signálem zaznamenaným mikrofónem, tato metoda je velmi odolná proti rušení. MLS signály jsou nejčastěji posloupností nul a jedniček, generované pomocí posuvného registru se zpětnou vazbou. Další velmi podobnou metodou je měření pomocí SS signálů. Měřicím signálem je rozmítaný harmonický průběh v rozsahu celého akustického pásma. Jako u předchozích měření je nutné být s úrovní dostatečně nad hlukovým pozadím. Délka signálu bývá dvakrát až čtyřikrát delší než nejdelší doba dozvuku prostoru. Odezva místnosti je rozprostřena podél celého signálu. Impulzní odezvu pak získáme dekonvolucí nahraného signálu s původním vysílaným průběhem.

## 3.2 Měření vlastních kmitů prostoru

K měření vlastních kmitů se používá širokopásmový signál, například bílý šum. Úroveň musí vybudit vlastní kmitů a být dostatečně nad hlukovým pozadím. Vlastní kmitů, stojaté vlny, vznikají na frekvencích, kdy se vlnová délka rovná rozměru prostoru. Při buzení prostoru signálem (například poslech hudby) vznikají při rovnosti frekvence budícího signálu a vlastního kmitu rezonance, které vedou na nerovnoměrné rozložení pole. Stojatá vlna má uzly a kmitů, kde je minimum a maximum akustického tlaku. Z měření lze určit rozložení pole v prostoru, proto je vhodné zvolit měřicí body v okolí uvažovaného poslechového místa. Dále se měří v blízkosti zdí nebo v rozích prostoru, kde je maximum akustického tlaku a všechny vlastní kmitů prostoru. Je tedy možné snadněji rozlišit vlastní kmitů místnosti příslušící třem stýkajícím se stěnám. Měření je vhodné provádět dostatečně podrobně, například s rozlišením 0,5 Hz. Je vhodné si předem alespoň výpočtem podle vztahu 2.5 určit kritickou frekvenci prostoru. Nad touto frekvencí uvažujeme difúzní pole s rovnoměrným rozložením, není tedy nutné měřit vlastní kmitů. V jednotlivých zvolených bodech se po vybudění prostoru měří frekvenční charakteristika akustického tlaku. Protože budící šumový signál má náhodné spektrum, je nutné naměřené hodnoty dostatečně průměrovat, minimálně 1000 hodnot pro každý bod.

## 4

# Materiály a prvky používané pro akustické úpravy

K úpravě doby dozvuku, snížení hluku nebo zvýšení srozumitelnosti v určitém prostoru se užívá velké množství typů a uspořádání akustických prvků. Různé konstrukce se nejčastěji používají pro pohlcování a rozptylování zvuku. Při výběru prvků je nutné kromě akustických parametrů dbát i na požadavky konstrukční, hygienické, požární, ale i estetické.

Pohltivost materiálu charakterizuje činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ . Ten je závislý na frekvenci i úhlu dopadající zvukové vlny, činitel  $\alpha_N$  udává pohltivost pro kolmý dopad a nabývá hodnot 0 až 1. Pohltivost pro všesměrový dopad je vyjádřena činitelem  $\alpha_S$ . Činitel pohltivosti materiálu je možné získat při velké ploše vzorků z měření doby dozvuku v dozvukové komoře, pro měření malých vzorků je možné použít interferometry. Měření v interferometru je ale možné určit pohltivost pouze pro kolmý dopad a navíc jen u materiálů, kterým se sledované parametry mění lineárně s rozměrem.

Z hlediska struktury se pohltivé materiály dělí na porézní a vláknité. Akustické prvky je pak možné rozdělit do několika skupin na pohltivé panely, kmitající desky a membrány, rezonátory a rozptylové prvky. Informace do této kapitoly byly čerpány z [1] a [3].

### 4.1 Porézní materiály

K pohlcování akustické energie dochází v porézních materiálech přeměnou na energii tepelnou následujícími principy - třením, relaxací akustického tlaku a nepružnou deformací. Tření vzniká při pohybu částic vzduchu v navzájem propojených pórech materiálu. Mezi tuto skupinu materiálů patří například výrobky ze skelných a minerálních vláken a různé textilie. Při tlumení pomocí porézních materiálů je rozhodující tloušťka materiálu a výška vzduchového polštáře. Podle vztahu 4.1 je možné určit od které frekvence bude pohltivost  $\alpha$  vrstvy materiálu umístěného přímo na stěnu větší než 0,6. Z této rovnice je patrné, že pro pohlcení nízkých frekvencí by bylo nutné používat silné vrstvy materiálu. Vzhledem k tomu, že na stěně je nulová akustická rychlost, dochází zde pouze k malé přeměně

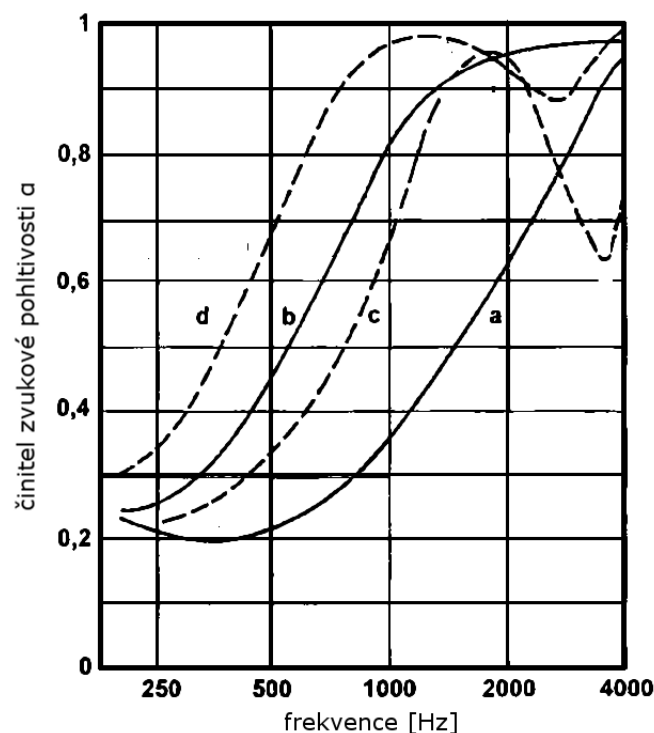
akustické energie na tepelnou. Umístěním materiálu do určité vzdálenosti před stěnu lze podstatně zlepšit efektivitu tlumení. Nejvýhodnější je umístění pohltivého materiálu v místě kde je nejvyšší akustická rychlost, tomu odpovídá vzdálenost  $\lambda/4$  od stěny. Graf 4.1 ukazuje jaký vliv na pásmo pohltivosti má tloušťka materiálu a jeho vzdálenost od stěny.

$$f_m = \frac{1}{10} \cdot \frac{c}{h} \quad [Hz] \quad (4.1)$$

kde:

$c$  rychlost zvuku ve vzduchu v  $m \cdot s^{-1}$

$h$  tloušťka vrstvy v m

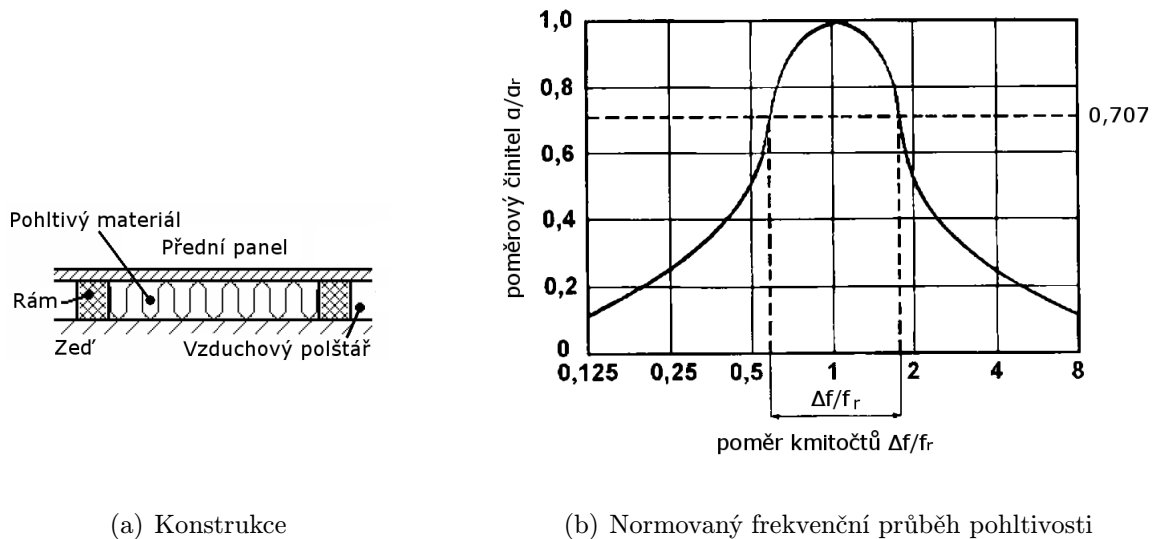


**Obr. 4.1:** Použití porézního materiálu - a) tloušťka materiálu 25 mm, b) tloušťka materiálu 50 mm, c) tloušťka materiálu 25 mm, vzduchový polštář 30 mm, d) tloušťka materiálu 50 mm, vzduchový polštář 30 mm, převzato s úpravami z [1]

## 4.2 Kmitající panely a membrány

Další skupina prvků pracuje na principu přeměny akustické energie na mechanickou a následného utlumení díky tření. Zvukové vlny dopadají na pružně uchycenou desku, která mechanicky kmitá v oblasti zvukových frekvencí. Část mechanické energie se mění opět na akustickou a vyzařuje do prostoru za panelem. Tento prostor je pro větší účinnost tlumení vyplněn porézním nebo vláknitým materiálem a dochází opět k pohlcení akustické energie.

Zbytek mechanické energie je tlumen třením v samotném materiálu a v materiálu uložení panelu do rámu. Celá konstrukce kmitajícího panelu tvoří mechanický rezonanční obvod a rezonanční kmitočet je možné určit podle vztahu 4.2. Řez konstrukcí kmitajícího panelu je na obrázku 4.2 a), průběh činitele pohltivosti  $\alpha$  na obrázku 4.2 b). Rezananční obvod dosahuje tlumení v poměrně úzkém pásmu kmitočtů.



(a) Konstrukce

(b) Normovaný frekvenční průběh pohltivosti

**Obr. 4.2:** Kmitající panel, převzato s úpravami z [1]

Jednoduchý výpočet podle vztahu 4.2 je spíše orientační, protože není možné přesně popsat materiál uložení kmitající desky. Návrh je často zdlouhavý, protože je nutné vyrobit a změřit více prototypů než dojdeme k požadovanému výsledku. Kmitající panely se nejčastěji používají pro pásmo 50 až 300 Hz.

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m' \cdot d}} \quad [Hz] \quad (4.2)$$

kde:

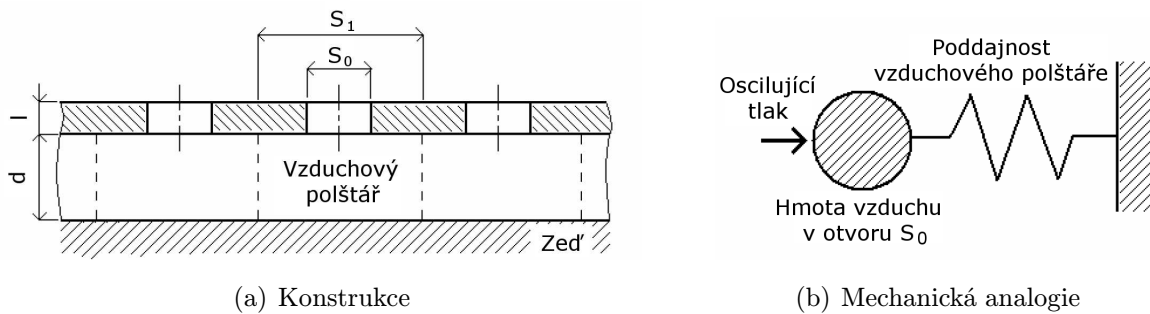
$m'$  plošná hmotnost desky v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

$d$  tloušťka vzduchového polštáře v m

Kmitající membrány fungují na podobném principu. Nejde však o pevné desky, ale o fólie nebo velmi tenké desky s nízkou tuhostí v ohybu. Používají se materiály s nízkou plošnou hmotností, základní rezonanční kmitočet je dán stejným vztahem jako u kmitajících panelů. Navíc se mohou objevit rezonance na vyšších kmitočtech dané poddajností materiálu a rozměry membrány. Účinnost panelu je možné měnit přidáním porézního materiálu do prostoru vzduchového polštáře a je možné dosáhnout vyšší účinnosti v širším kmitočtovém pásmu než u kmitajících panelů. Nejčastěji se používají napnuté textilie, koženky, folie z umělých hmot apod.

## 4.3 Rezonátory

Použitím děrované desky na vzduchovém polštáři dojde k vytvoření rezonanční soustavy označované jako Helmholtzův rezonátor. Schématický řez rezonátorem je na obrázku 4.3 a), obrázek 4.3 b) zobrazuje analogii s mechanickým systémem. Objem vzduchu v otvoru se při dopadu zvukové vlny rozkmitá, nejvíce energie je v soustavě nahromaděno při kmitání na rezonančním kmitočtu.



Obr. 4.3: Helmholtzův rezonátor, převzato z [8]

Rezonanční kmitočet je možné určit podle vztahu 4.3, výsledek lze ovlivnit konstrukcí rezonátoru - plochou otvorů, objemem dutiny za otvorem a tloušťkou přední desky. Pro dostatečnou účinnost rezonátoru je opět nutné prostor v dutině tlumit, v pohltivém materiálu se akusická energie mění na teplo. Protože se jedná o rezonanční obvod, je pásmo pohltivosti poměrně úzké, kmitočtový průběh netlumeného rezonátoru odpovídá průběhu pro kmitající panel na obrázku 4.2 b).

$$f_r = 55 \sqrt{\frac{S_0}{V(l + 2\Delta l)}} \quad [Hz] \quad (4.3)$$

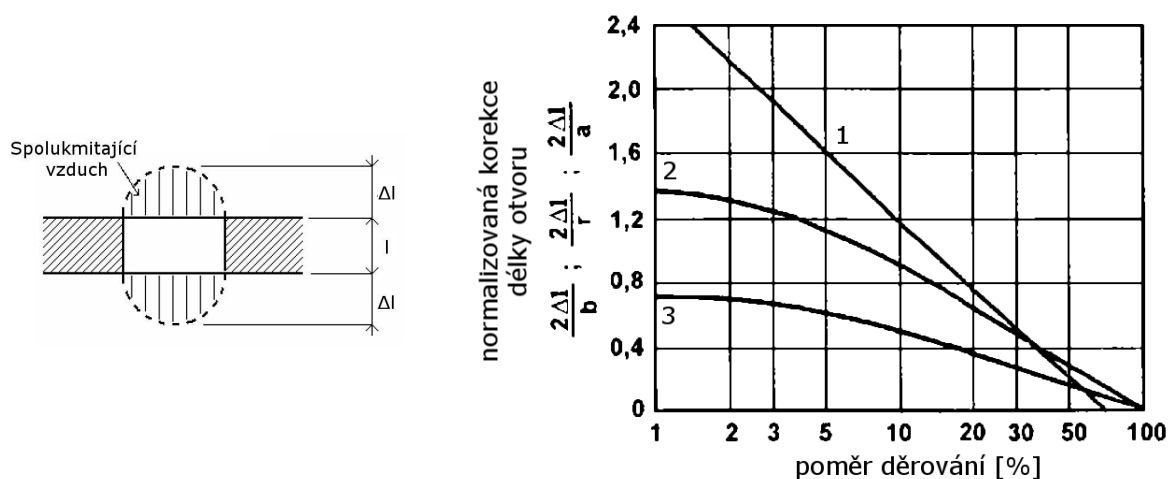
kde:

$S_0$	plocha jednoho otvoru v $m^2$
$V = S_1 \cdot d$	objem dutiny rezonátoru pro jeden otvor v $m^3$
$S_1$	průřez dutiny rezonátoru pro jeden otvor v $m^2$
$d$	hloubka vzduchového polštáře v m
$l$	tloušťka desky s otvory nebo délka hrdla rezonátoru v m
$2\Delta l$	koncová korekce v m

Korekce délky otvoru  $2\Delta l$  je zavedena z důvodu kmitání vzduchu i před a za otvorem (viz obrázek 4.4 a). Korekci je možné určit odečtením z grafu 4.4 b), kde je uvedena v závislosti na hustotě děrování desky  $\varepsilon = S_0/S_1 \cdot 100$  [%]. Korekce je vynesena pro nejpoužívanější druhy otvorů - štěrbinové (1), kruhové (2) a čtvercové (3). Tlumením rezonátoru je možné získat i širší pásmo pohltivosti - nižší činitel jakosti  $Q$ . Výsledný průběh pohltivosti  $\alpha$  závisí na množství, poloze a vlastnostech pohltivého materiálu. Kombinací



zmíněných veličin lze získat rezonátor vhodný pro vysoké hodnoty pohltivosti  $\alpha$  s vysokým činitelem jakosti  $Q$  nebo nižší účinnost v širším frekvenčním pásmu. U vloženého pohltivého materiálu je důležitá hlavně reálná část měrné akustické impedance. Jde o komplexní veličinu vyjadřující poměr akustického tlaku a akustické rychlosti na povrchu materiálu. Na obrázku 4.5 je uvedena závislost činitele pohltivosti  $\alpha$  na poměru reálné složky akustické impedance akustického materiálu  $ReZ$ , k vlnovému odporu vzduchu  $z_0$ . Vlnový odpor vzduchu lze vypočítat jako  $\rho \cdot v$ , kde  $\rho$  je měrná hustota vzduchu a  $v$  rychlost šíření zvuku. Z grafu můžeme vidět že pokud je měrný akustický odpor materiálu roven vlnovému odporu vzduchu, je číselník pohltivosti  $\alpha$  na rezonanční frekvenci roven 1. Veškerá akustická energie na tomto kmitočtu by tedy měla být pohlcena. Rezonátory je možné podle potřeby naladit přibližně od frekvence 200 Hz do 2 kHz. Pro nejnižší kmitočty se často používá jen jeden otvor nebo dlouhá štěrbina a velký objem dutiny.



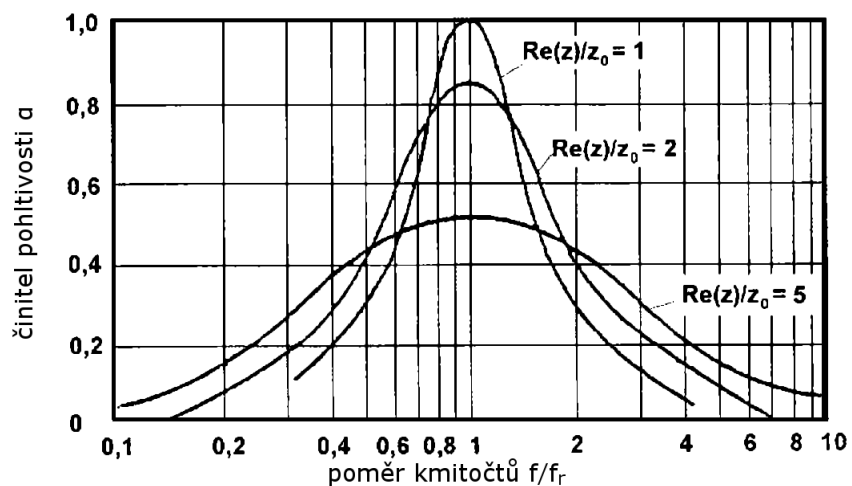
(a) Kmitání vzduchu kolem otvoru, převzato z [8]

(b) Graf pro určení korekce délky otvoru převzato s úpravami z [1]

**Obr. 4.4:** Korekce délky otvoru

## 4.4 Rozptylové prvky

Pro vytvoření difuzního akustického pole se používají rozptylové prvky, jinak také označované jako difuzory. Mají za úkol dopadající zvuk odrazit zpět do prostoru tak, aby akustické vlny přicházely na místo v prostoru rovnoměrně z co možná nejvíce směrů a nedocházelo tak ke vzniku stojatého vlnění. Realizace difuzorů je nejčastěji v podobě jehlanů, vypouklých nebo lomených ploch, které jsou vhodně, často periodicky, uspořádány. Rozměr ploch difuzorů musí být větší nebo roven vlnové délce, která má být odražena. V praxi se i při řešení jednoho prostoru používá více druhů difuzorů. K často používaným patří pro svou vysokou účinnost RPG difuzory, pracující na principu akustické difrakční mřížky. Jedná se o konstrukci stejně širokých, ale různě hlubokých šachet oddělených ten-



**Obr. 4.5:** Závislost činitele pohltivosti  $\alpha$  Helmholtzova rezonátoru na poměru  $Re_z/z_0$ , převzato s úpravami z [1]

kou příčkou. Dalším typem je soustava různě dlouhých čtvercových hranolů, tento typ je zajímavý i esteticky. Příklady zmíněných difuzorů jsou na obrázcích 4.6.



(a) RPG difuzor, převzato z [11]



(b) 2D QRD difuzor, převzato z [12]

**Obr. 4.6:** Typy difuzorů

# 5

## Současný stav prostoru

Návrh úprav bude prováděn pro prostor ve tvaru L v podkroví novostavby rodinného domu (fotografie 5.1, 5.2). Vzhledem k dispozicím podkroví jde o poměrně členitý prostor. Půdorys prostoru je na obrázku 5.3, přesnější výkres včetně všech rozměrů pak v příloze A.1 a A.2. Pokoj by měl po úpravách sloužit jako obytná a poslechová místnost. Všechny stěny jsou tvořeny sádkartonem, větší část na dřevěném roštu, příčky se sousedními místnostmi pak na konstrukci z ocelových profilů. Kromě červeně vyznačených stěn jsou všechny ostatní vyplněny 10 až 20 cm minerální vaty. Podlaha se skládá z 7 mm PVC plovoucí podlahy, vrstvy mirelonu, 18 mm OSB desek, 30 mm vrstvy kročejové izolace a další 18 mm vrstvy OSB desek. Výpis ploch materiálů v prázdné místnosti je v tabulce 5.1. Díky pohltivosti sádkartonových stěn a rozměrům prostoru se předpokládá nízká doba dozvuku. Doba dozvuku lze obecně při znalosti vlastností materiálů a dílčích ploch použitých v místnosti spočítat podle [1] - kapitola 6.1.1, může ale dojít k nemalé chybě, pokud nejsme schopni přesně určit frekvenční závislost pohltivosti jednotlivých materiálů. I z tohoto důvodu je vhodnější dobu dozvuku změřit některou z normami doporučených metod.

### 5.1 Výběr poslechového místa

Pro malé rozměry, tvar a další plánované využití prostoru není na výběr z mnoha poslechových míst. V úvahu připadají pouze 3 možnosti vyznačené na obrázku 5.3. Uvažujeme doporučené umístění reproduktorů, kdy spojnice posluchače a jednotlivých reproduktorů dvoukanálového systému tvoří rovnostranný trojúhelník. Nejlépe se jeví varianta 2, která poskytne nejvíce prostoru pro pracovní plochu a umožní nejvhodnější umístění reproduktorů. I pro tuto variantu ale bude nutné počítat s poslechem v blízkém poli a vybrat vhodnou reprosoustavu z kategorie stereo near-field poslechových monitorů. Vzhledem k plánovanému použití bude cílem snížení doby dozvuku do mezí doporučených pro poslechové prostory v normě ČSN 73 0526 a zajištění rovnoměrně rozloženého akustického pole kolem zvoleného poslechového místa.



(a)



(b)

Obr. 5.1: Pohled na poslechové místo

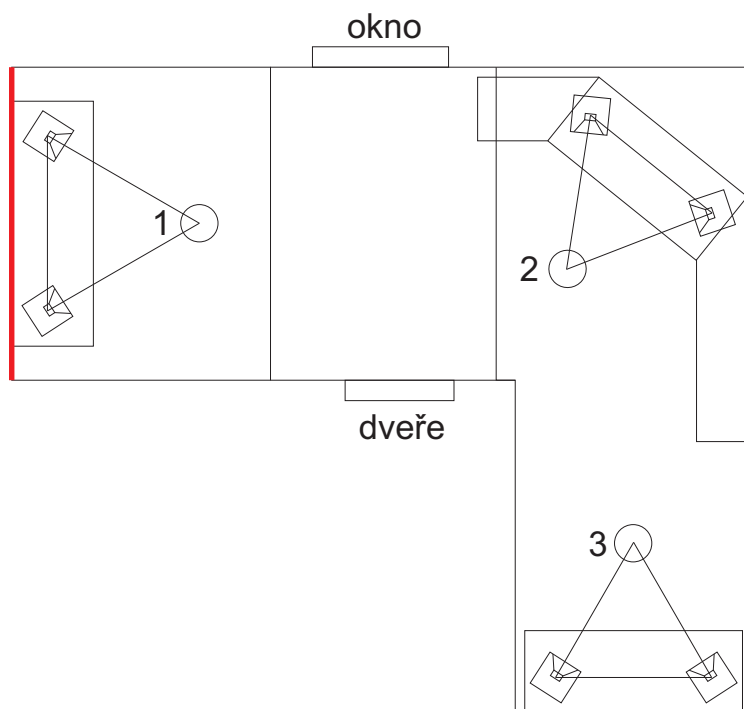


(a)



(b)

Obr. 5.2: Pohled z poslechového místa



**Obr. 5.3:** Varianty poslechových míst

materiál	plocha [m <sup>2</sup> ]
sádrokarton bez vaty	8,0
sádrokarton s vatou	45,0
podlaha	16,8
okno	1,7
dveře	1,9
celková plocha	73,4
objem [m <sup>3</sup> ]	33,6

**Tab. 5.1:** Materiály použité v místnosti

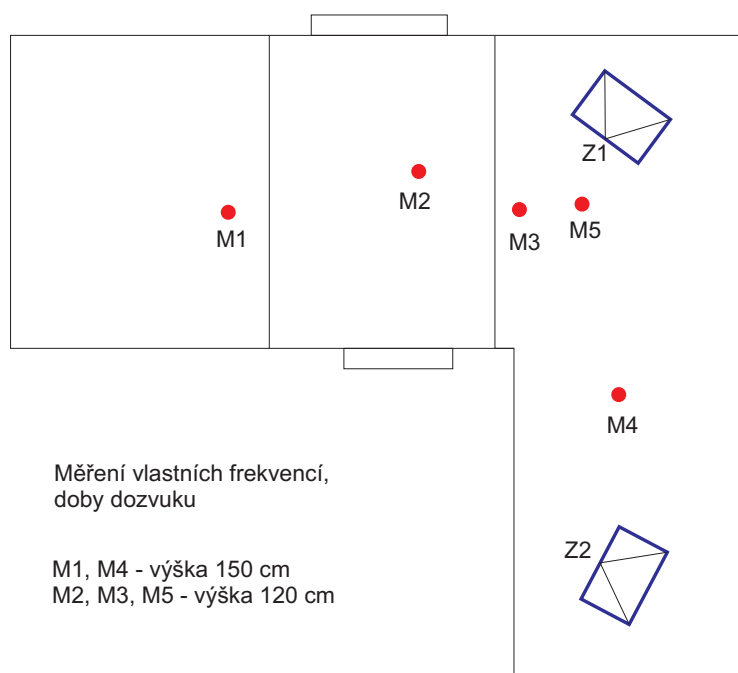
## 5.2 Předpokládané úpravy

Vzhledem k vybranému poslechovému místu a umístění reprosoustavy by bylo vhodné zamezit možným zpětným odrazům z míst 1 a 3. V místě 3 je plánována vestavná skříň pokrývající celou plochu stěny, ta by měla sama o sobě představovat dostatečnou pohltivost. Pokud by se toto řešení ukázalo jako nedostatečné, bylo by možné přidat na čelní plochu skříňe vhodné akustické prvky nebo před skříň umístít závěs. V místě 1 je počítáno s umístěním postele, případně pohovky. Bude tak nutné řešit hlavně šikmou plochu stropu. Jako vhodná varianta se jeví použití některého druhu pohltivých panelů, zavěšených pod strop. I přes konstrukci stěn ze sádkartonu se předpokládá problém v pásmu nejnižších kmitočtů, který je nutné řešit téměř u všech prostorů. Řešením často bývá instalace kmitajících panelů nebo rezonátorů naladěných na problémové frekvence. Pro poslech je vhodnější tzv. difúzní pole - akustické pole s mnohonásobným a náhodným odrazem. Díky zvolené variantě poslechového místa bude možné využít protilehlého rohu k odrazům zvukových vln. Pro zvýšení tohoto efektu by také bylo vhodné umístít na zmíněný roh a některé stěny různé varianty používaných difuzorů. Difuzory se v praxi umísťují do míst kde při šíření zvuku od zdroje dochází k prvotním odrazům. Pro upřesnění parametrů a případné další úpravy je nutné provést měření doby dozvuku a rozložení vlastních kmitů.

## 5.3 Měření doby dozvuku

Podle zásad a postupu uvedeném v bodě 3.1 bylo provedeno měření doby dozvuku. V místnosti bylo při měření několik kusů nábytku - psací stůl, dvoulůžková postel, menší skříň a dvě osoby. Pomocí ručního měřicího přístroje Bruel&Kjaer 2260 s nastavením "Program pro prostorovou akustiku BZ7207" byla změřena nejprve doba dozvuku metodou integrované impulzní odezvy. Prostor byl vybuzen střelbou z malé plynové pistole Slavia CAL 6 mm Start. Rozmístění mikrofonů a zdroje zvuku je na obrázku 5.4 (přesnější výkres v příloze A.3). Měřeno bylo na pozicích mikrofonů M1 až M4 se zdrojem zvuku nejdříve na pozici Z1 a poté Z2. Vzhledem k rozměrům prostoru a šikmým stropům nebylo v některých případech možné dodržet podmínku vzdálenosti mikrofonu 1 m od stěn. Měřena byla doba  $T_{30}$  v třetinooktávových pásmech se středními frekvencemi od 100 Hz do 5 kHz. Výstupem z přístroje jsou přímo dílčí doby dozvuku pro jednotlivá pásma. Měření probíhalo při teplotě 19 °C a vlhkosti vzduchu 68,1%.

Na stejných pozicích byla změřena doba dozvuku ještě metodou přerušovaného šumu pomocí analyzátoru B&K PULSE 3560C a následně i pomocí ručního měřicího přístroje B&K 2260. Prostor byl buzen aktivním monitorem RCF NX 10-SMA, umístěným postupně na pozicích Z1 a Z2, budícím signálem byl růžový šum. Z důvodu všesměrovějšího pokrytí prostoru byl monitor směřován šikmo na stěnu. Po ustálení hladiny akustického tlaku v prostoru byl zdroj šumu vypnut a byly zaznamenávány poklesové křivky. Blo-



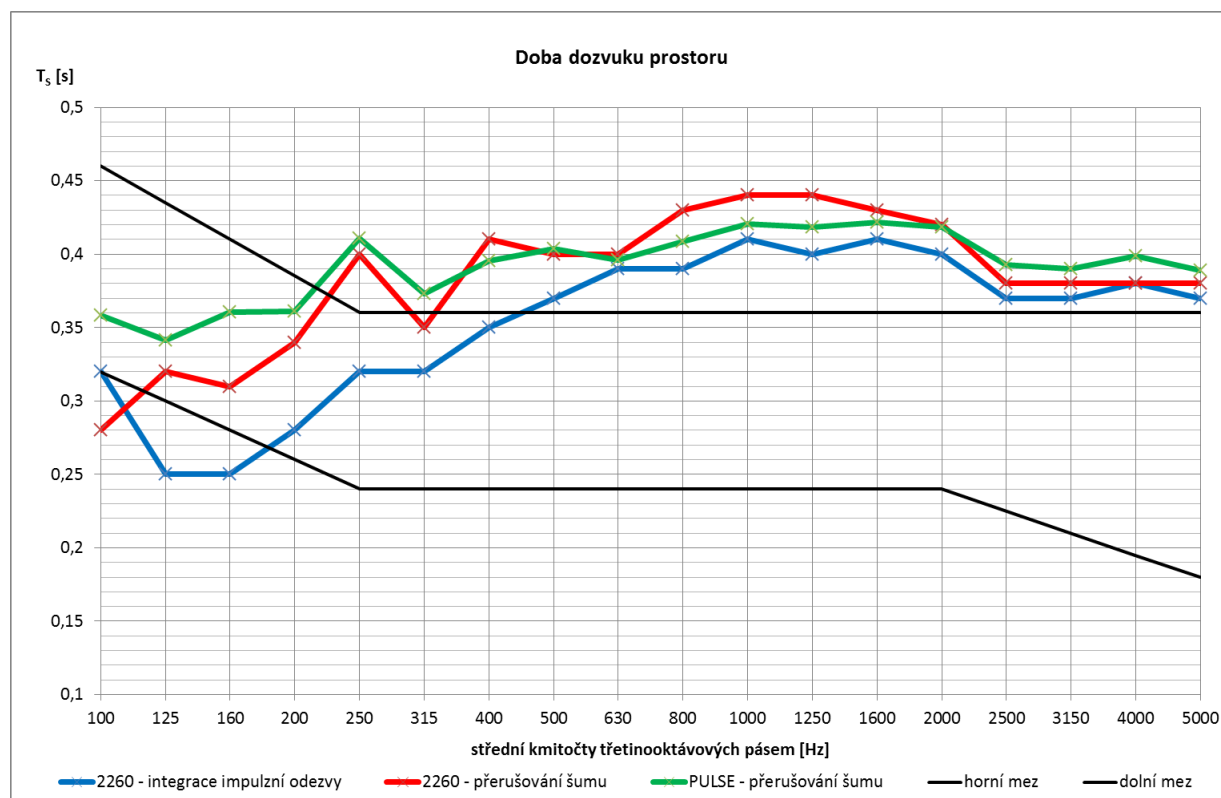
**Obr. 5.4:** Rozmístění mikrofónů a zdrojů zvuku pro měření doby dozvuku

kové schéma zapojení pro měření metodou přerušování šumu pomocí analyzátoru je na obrázku 5.6, v tabulce 5.2 jsou uvedeny použité přístroje. CPB analýza byla provedena pro 18 třetinooktávných pásem se středními frekvencemi od 100 Hz do 5 kHz.

Graf 5.5 zobrazuje výsledné průběhy ze všech třech měření, číselné hodnoty jsou uvedeny v tabulce D.1 v příloze. Hodnoty získané metodou integrace impulzní odezvy jsou na nízkých frekvencích nižší a rovnoměrnější. Výstřel nejspíše nemá v tomto frekvenčním pásmu dostatek energie pro vybudování vlastních kmitů místnosti, které se zde pravděpodobně vyskytují. Naměřená doba dozvuku je tedy nižší. Pro vyšší frekvence už jsou naměřené hodnoty ze všech třech měření podobnější. I když je doba dozvuku bez úprav poměrně nízká (vždy pod 0,5 s), požadavkům normy pro poslechové prostory nevyhovuje. Jedním z cílů v kapitole 6 tedy bude i snížení doby dozvuku.

## 5.4 Měření vlastních kmitů místnosti

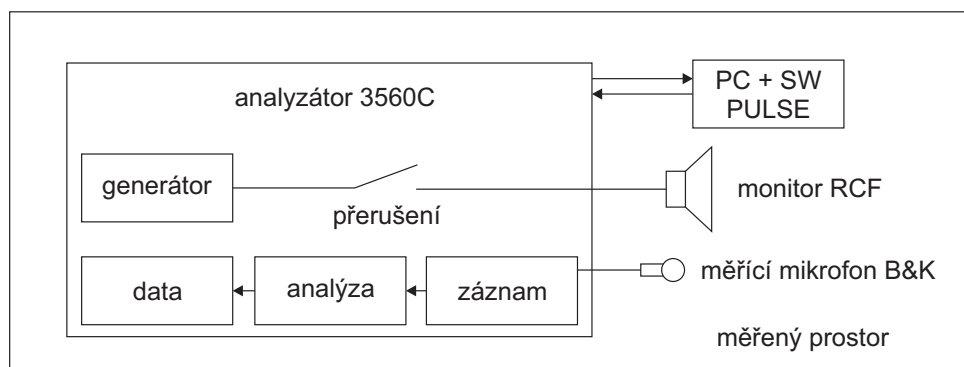
K měření vlastních kmitů byl použit opět analyzátor B&K 3560C, jako budící signál bílý šum, zesilovaný opět monitorem RCF NX 10-SMA. Měřeno bylo na pozicích M1 až M5 a navíc ještě v rozích místnosti (ve vzdálenosti cca 10 cm) a od poslechového místa po 0,5m intervalech ve 2 hlavních směrech. Měřící místa zobrazují obrázky A.4, A.5 v příloze. Kromě měření mikrofónem ve zmiňovaných bodech byly ještě akcelerometry B&K 4507 měřeny vibrace jednotlivých stěn (polohy akcelerometrů na jednotlivých stěnách jsou v



**Obr. 5.5:** Doba dozvuku prostoru - porovnání výsledků

	výrobce	seriové číslo
analyzátor 3560C	Brüel & Kjaer	2241811
mikrofon 4943-C-0001	Brüel & Kjaer	2517059
ruční měřicí přístroj 2260	Brüel & Kjaer	2426360
aktivní monitor NX 10-SMA	RCF	NBXZ16498
akcelerometr 4507-B-004	Brüel & Kjaer	10248
akcelerometr 4507-B-004	Brüel & Kjaer	10245
akcelerometr 4507-B-004	Brüel & Kjaer	32864
software Labshop PULSE	Brüel & Kjaer	

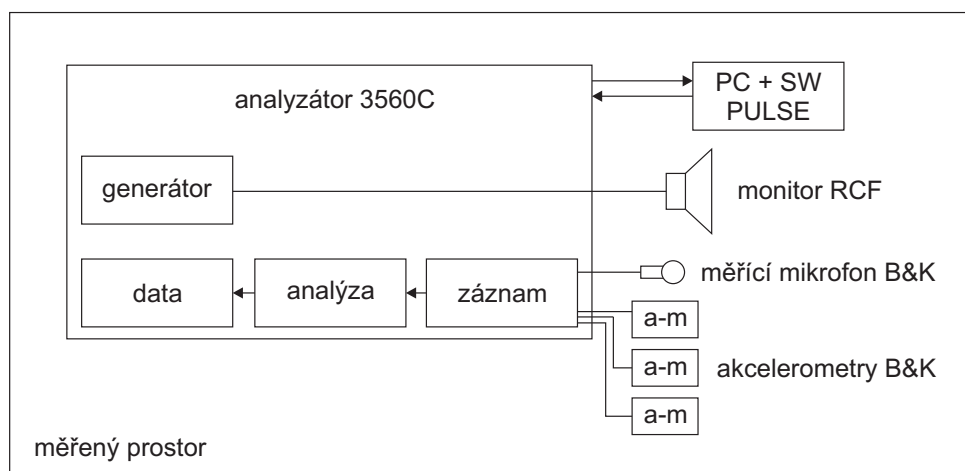
**Tab. 5.2:** Měřicí přístroje - měření prostoru



**Obr. 5.6:** Blokové schéma měření doby dozvuku pomocí analyzátoru

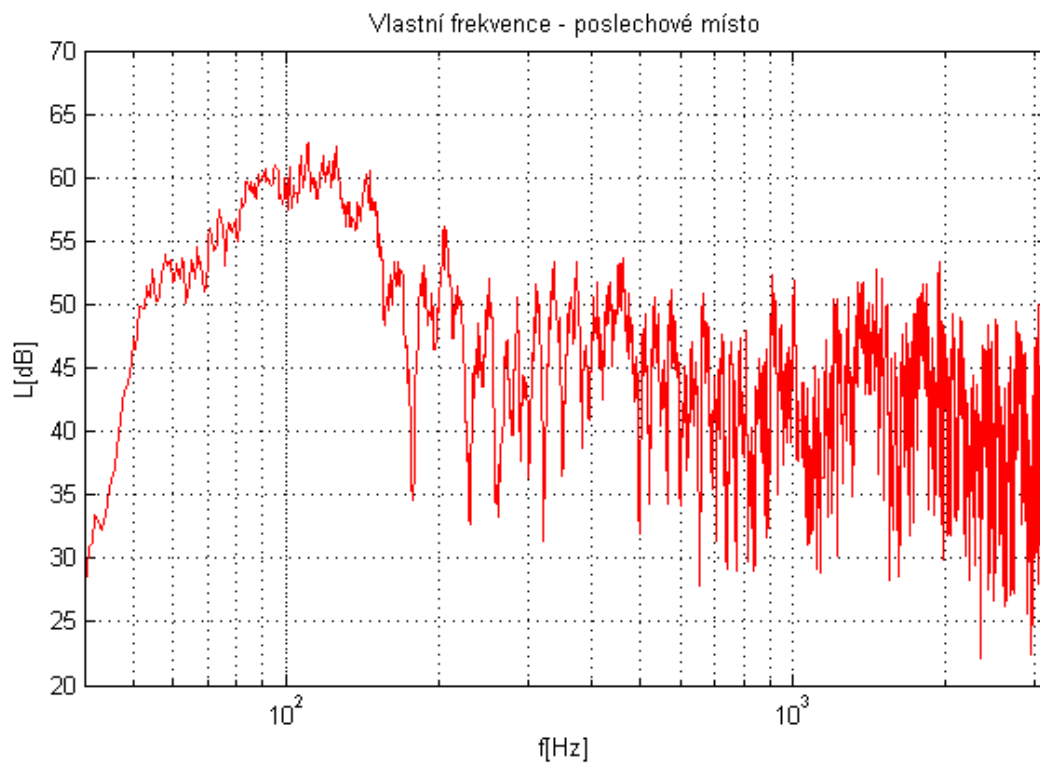


přílohách A.6, A.7 a A.8). Díky tomu je možné přesněji lokalizovat případnou problémovou stěnu. Akcelerometry byly na stěny přichyceny pomocí oboustranné lepicí pásky 3M, a to v místech mimo nosnou konstrukci stěn z důvodu snímání kmitání desky sádrokartonu. Naměřená data jsou výsledkem FFT analýzy, zpracovávající frekvence od 0 do 3200 Hz s krokem 0,5 Hz. Měření bylo průměrováno z velkého počtu naměřených hodnot. V přílohách práce jsou zařazeny pouze průběhy kolem poslechového místa (příloha C), rozsáhlé tabulky hodnot jsou dostupné v elektronické podobě.

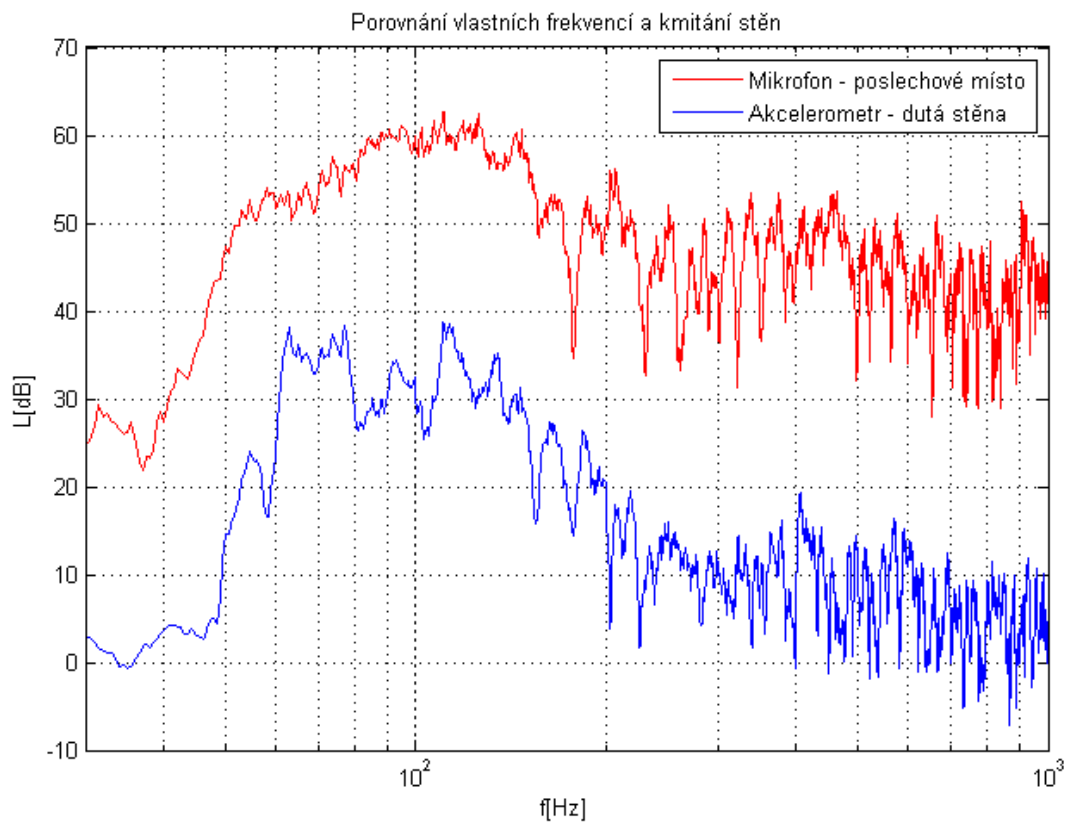


**Obr. 5.7:** Blokové schéma měření vlastních kmitů

Naměřené vlastní kmity v pozici poslechového místa jsou na obrázku 5.8. Z průběhu je patrné, že pásmo od 50 do 160 Hz je oproti ostatním silně zesíleno (až o 12 dB). To může být dáno konstrukcí sádrokartonových stěn. Na obrázku 5.9 je porovnání vlastních kmitů v poslechovém místě a akcelerometrem snímaných vibrací vedlejší duté stěny. Můžeme se domnívat že právě kmitání stěny má za následek zmiňovaný nárůst. Řešením by bylo zpevnění konstrukce stěny, vylumení vatou z rubové strany nebo přilepení závaží, které by přeladilo frekvenci vlastního kmitání desky. Naopak výrazně je utlumeno úzké pásmo kolem frekvence 180 Hz ( $\lambda = 1,88$  m). Tento propad je i na dalších měřících pozicích z měření rozložení pole - 17, 18, 19 (příloha A.5). Protože jde o měřící body v jedné řadě, je možné že tento propad je dán umístěním mikrofónu (výška 120 cm). Na pozici M3, která je pouze 0,4 m od poslechového místa už tento propad není. Další výraznější propady jsou i na vyšších frekvencích (230 a 260 Hz). Celkově jsou amplitudy vlastních kmitů značně nerovnoměrné, to ukazuje na nerovnoměrné rozložení pole v prostoru. Pro zlepšení difuzity pole by bylo vhodné využít některé z difuzorů, zmiňovaných v kapitole 4.4.



Obr. 5.8: Vlastní kmitý - poslechové místo



Obr. 5.9: Porovnání vlastních frekvencí měřených mikrofonem a vibrační stěny

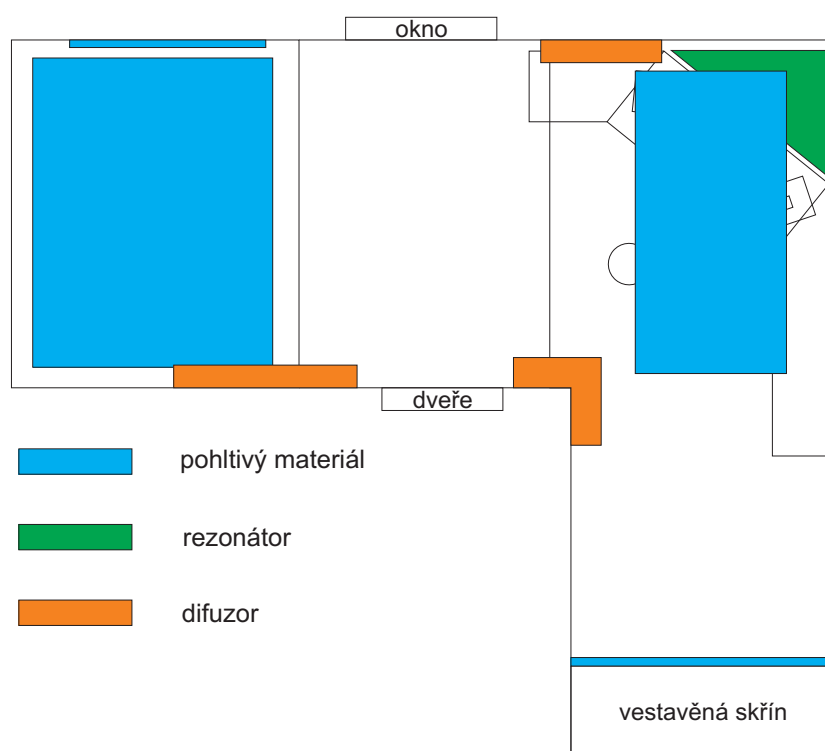
# 6

## Návrh akustických úprav

Z provedeného měření doby dozvuku, vlastních frekvencí a rozložení akustického pole kolem poslechového místa je možné určit potřebné úpravy pro zlepšení poslechové kvality prostoru. Z měření vlastních frekvencí je vidět několik významných netlumených vlastních kmitů v oblasti 50 Hz až 200 Hz. Tato oblast je problematická u většiny prostorů, pro vyrovnání vlastních kmitů bude navržen rezonátor s dostatečnou pohltivostí minimálně od 100 do 180 Hz. Řešení pod 100 Hz se neuvažuje. Rezonátor bude umístěn v rohu místnosti za šikmo stojícím pracovním stolem. Další částí úprav bude pokrytí šikmé plochy stropu nad postelí pohltivým materiálem pro omezení odrazů zpět směrem k poslechovému místu. Tím dojde k zlepšení akustické kvality prostoru a zároveň snížení doby dozvuku. V druhém rohu místnosti bude pohltivou plochu tvořit samotná vestavná skříň. Vzhledem k zajištění lepšího rozložení akustického pole kolem poslechového místa by bylo vhodné umístit difuzory do prostoru prvotního dopadu zvuku šířícího se od reprosoustavy, ale i na některé další plochy místnosti. Všechny uvažované úpravy jsou znázorněny a popsány v obrázku 6.1, tabulka 6.8 obsahuje soupis všech zamýšlených použitých akustických prvků. Vzhledem ke složitosti prostoru není možné stanovit vlastní kmity prostoru pomocí vzorce 2.4, kritická frekvence prostoru tedy byla určena alespoň ze známého objemu a průměrné doby dozvuku podle vztahu 2.5 na 200 Hz.

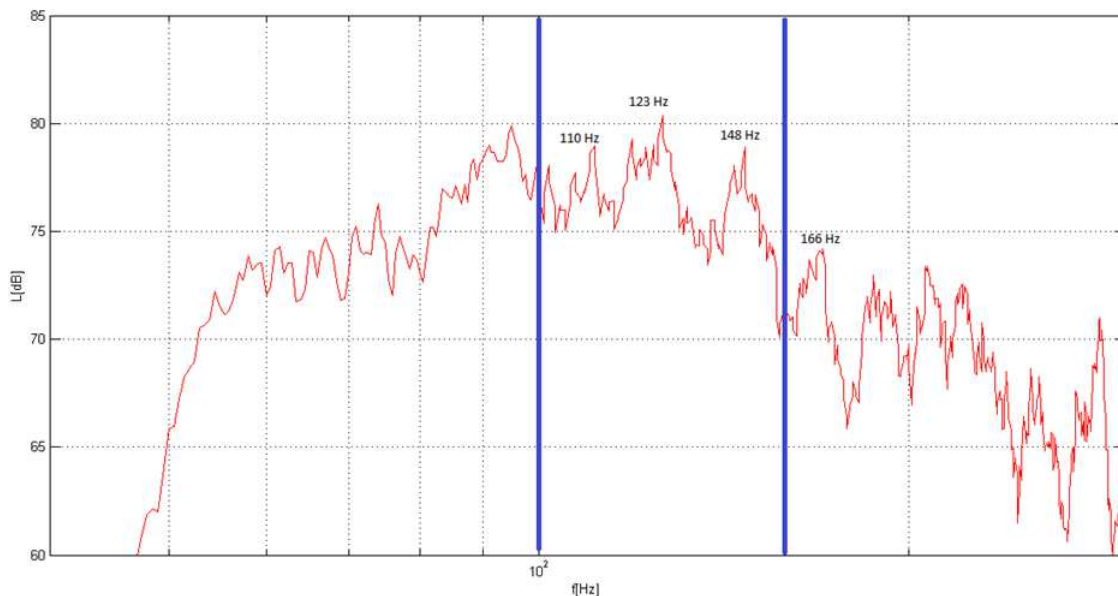
### 6.1 Rezonátor pro pásmo do 200 Hz

Při řešení pásma nízkých frekvencí přichází v úvahu dvě možnosti - kmitající panel nebo Helmholtzův rezonátor. Již dříve bylo popsáno, že realizace kmitajícího panelu je s ohledem na neznalost vlastností uchycení panelu do rámu složitější a vyžaduje často více zkušebních vzorků než se povede dosáhnout požadovaných výsledků. Z tohoto pohledu je přesnější návrh a realizace Helmholtzova rezonátoru. Návrh je popsán v mnoha publikacích, diplomová práce L. Posekaného [10] uvádí porovnání změřeného zkušebního vzorku štěrbinového rezonátoru se 4 výpočty podle různých autorů a postupů. Nejblíže změřenému výsledku je výpočet podle knihy Prostorová akustika od autorů Kolmer a Kyncl [4], který uvažuje s přičtením 40% k vypočítané frekvenci z důvodu zahrnutí všesměrového



Obr. 6.1: Akustické úpravy zvoleného prostoru

dopadu. Při návrhu tedy bude počítáno podle uvedeného postupu. Na zvětšeném průběhu z měření vlastních kmitů prostoru v okolí poslechového místa na obrázku 6.2 jsou vidět nejvýraznější netlumené vlastní kmity kolem frekvencí 110, 123, 148 a 166 Hz. Vzhledem k nedostatku místa pro umístění dalších rezonátorů bude navrhován jeden typ na frekvenci 120 Hz s širším pásmem pohlcení pro utlumení i ostatních blízkých vlastních kmitů.



**Obr. 6.2:** Vlastní kmity prostoru v oblasti 50 až 300 Hz

Maximální rozměry rezonátoru jsou dány prostorem v rohu za pracovním stolem. Podstava bude ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku s délkou ramen 0,90 m, výška je omezena šikmou plochou stropu na 1,1 m. Maximální vnitřní objem rezonátoru vychází na 410 litrů při ploše přední desky 1,06 x 1,24 m. Vztah 4.3 pro výpočet rezonanční frekvence byl přepsán do programu Microsoft Excel, pro výpočet je nutné odečíst z grafu hodnotu koncové korekce. K výsledku je připočítána korekce +40% pro uvažovaný všesměrový dopad. Výsledky návrhu pro štěrbinový rezonátor jsou uvedeny v tabulce 6.1. Šířka štěrbin by měla být větší než tloušťka přední desky.

objem rezonátoru	410 l
plocha přední desky	1,31 m <sup>2</sup>
tloušťka přední desky	10 mm
počet štěrbin	4
šířka štěrbin	20 mm
délka štěrbin	0,6 m

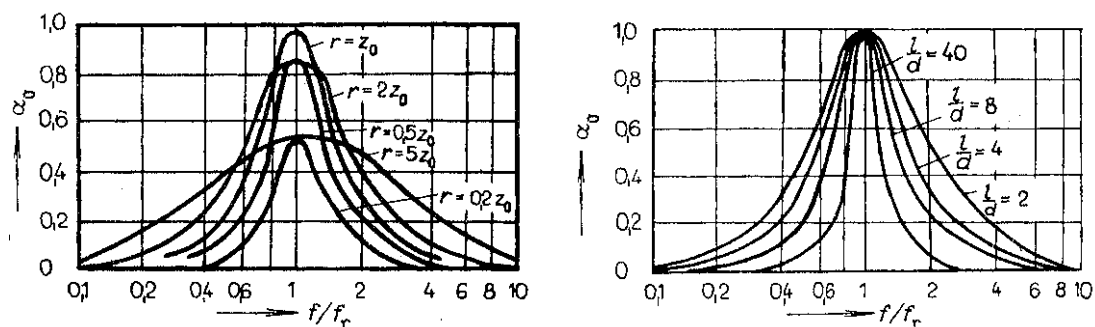
**Tab. 6.1:** Návrh rezonátoru - rozměry otvorů

Rezananční frekvence je tedy určena poměrně jednoduchým výpočtem. Dalším důležitým parametrem rezonátoru je činitel jakosti  $Q$ , udávající šířku pohltivého pásma kolem

rezonanční frekvence. Vzhledem k zamýšlenému použití rezonátoru je požadováno nízké  $Q$ . V knize [4] je uvedena závislost činitele  $Q$  na poměru  $l/d$ , kde  $l$  je tloušťka přední desky a  $d$  výška vzduchového polštáře. Vyšší poměr vede na vyšší činitel jakosti  $Q$ . Pro nízké  $Q$  (široké pásmo pohltivosti) by pak bylo vhodné použít tenčí přední desku. Z uvedených příkladů ale není jasné jestli vzdálenost  $d$  udává celkovou výšku vzduchového polštáře mezi přední deskou a zadní stěnou rezonátoru nebo pouze mezi přední deskou a tlumícím materiálem.

Tlumení rezonátoru je značně závislé na velikosti měrného akustického odporu  $r$ . Maximální pohltivosti můžeme dosáhnout, pokud se tlumící odpor rovná vlnovému odporu vzduchu  $z = \rho \cdot c$ . Pokud je  $r$  větší než  $z$ , klesá pohltivost, ale rozšiřuje se pásmo účinnosti. Vliv různých tlumení je na obrázcích 6.3. Rozšířit pásmo tlumení rezonátoru lze například umístěním vrstvy látky nebo hedvábí přímo za přední děrovanou desku. Jedním z dalších způsobů návrhu rezonátoru je grafická metoda s použitím nomogramů (popsáno v [3]). V průběhu výpočtu je možné si zvolit činitel jakosti  $Q$ , výsledkem je požadovaný měrný odpor látky vložené za otvory. Tento parametr se běžně u látek neuvádí, je nutné získat ho měřením vzorku látky. Určit vše potřebné pro konstrukci rezonátoru pouze výpočtem je velmi složité, návrh je většinou zapotřebí doladit po změření parametrů prototypu.

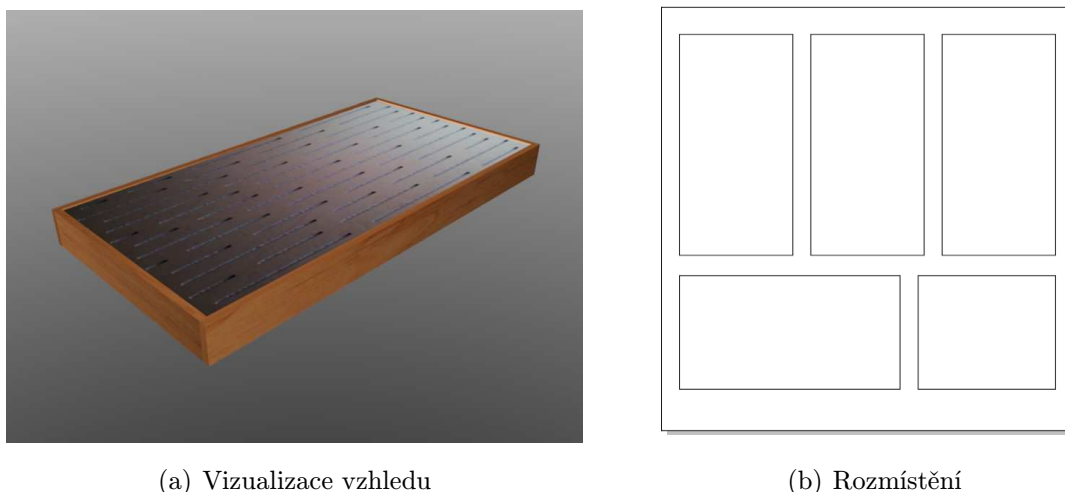
Pro první verzi navrhovaného rezonátoru je uvažováno natažení jedné vrstvy bavlněné látky na rub přední desky. Přední desku rezonátoru bude možné z důvodu ladění vyjmout. Výkres přední desky rezonátoru je na obrázku A.10 v příloze. Štěrbiny jsou posunuty o 110 mm nad střed desky z důvodu umístění rezonátoru v rohu místnosti za stolem.

(a) Závislost  $\alpha_0$  pro různá tlumení rezonátoru(b) Závislost  $\alpha_0$  na poměru  $l/d$ Obr. 6.3: Vliv tlumení rezonátoru na  $\alpha_0$ , převzato z [4]

## 6.2 Pohltivé panely

Jako pohltivý prvek by bylo možné použít samotný porézní materiál upevněný přímo na stěnu. Podle vztahu 4.1 uvedeného v kapitole 4.1 by ale bylo nutné použít pro 200 Hz tloušťku minimálně 17 cm aby pohltivost  $\alpha$  byla větší než 0,6. Při použití takové tloušťky materiálu by došlo k podstatnému snížení výšky stropu. Navíc pokrytí celé šikmé plochy stropu o ploše 5,45 m<sup>2</sup> by bylo vzhledem k ceně porézních materiálů poměrně nákladné.

Rozměrově méně náročné a levnější by bylo řešení pohltivé plochy pomocí akustických



**Obr. 6.4:** Pohltivé panely

panelů fungujících na principu Helmholtzových rezonátorů. Náklady na použitý materiál nejsou vysoké a panely lze vyrobit svépomocí. Jde o panely s přední děrovanou deskou na vzduchovém polštáři, který je částečně vyplněn tlumícím materiálem. Skladby panelů včetně změřených frekvenčních průběhů pohltivosti  $\alpha$  je možné nalézt v katalogu některých firem nebo například v [3]. Děrování může být tvořeno kruhovými, čtvercovými nebo šterbinovými otvory. Nejjednodušším řešením je použití za tímto účelem vyráběných sololitových desek Akulit o tloušťce 3,2 mm, které jsou k dostání s různou roztečí 5 mm otvorů. Dalším řešením jsou například speciálně frézované desky s kruhovými otvory o různých průměrech nebo šterbinami s různou délkou. Díky různorodosti otvorů mají vyšší pohltivost v širším frekvenčním pásmu.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$\alpha_s$	0,43	0,49	0,50	0,57	0,99	0,95	0,96	0,91	0,82
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$\alpha_s$	0,73	0,62	0,52	0,44	0,38	0,34	0,33	0,35	0,38

**Tab. 6.2:** Katalogové hodnoty zvukové pohltivosti  $\alpha$  akustických panelů T-MA3, varianta o tloušťce 100 mm

Z katalogu firmy Soning byla vybrána varianta o celkové tloušťce 100 mm s přední deskou T-MA3 s různě dlouhými šterbinovými otvory (katalogové listy jsou v přílohách B.2 a B.3. Vzduchový polštář bude z části vyplněn minerální vatou o tloušťce 40 mm. Přední deska bude zapuštěna o 3 mm do rámu o tloušťce 100 mm, vyrobeného z 18mm laminovaných DTD desek. Vizualizace vzhledu hotového panelu je na obrázku 6.4(a). Skladba panelu je znázorněna na obrázku 6.5, popisky jednotlivých částí jsou v tabulce 6.3.



Obr. 6.5: Skladba pohltivého panelu

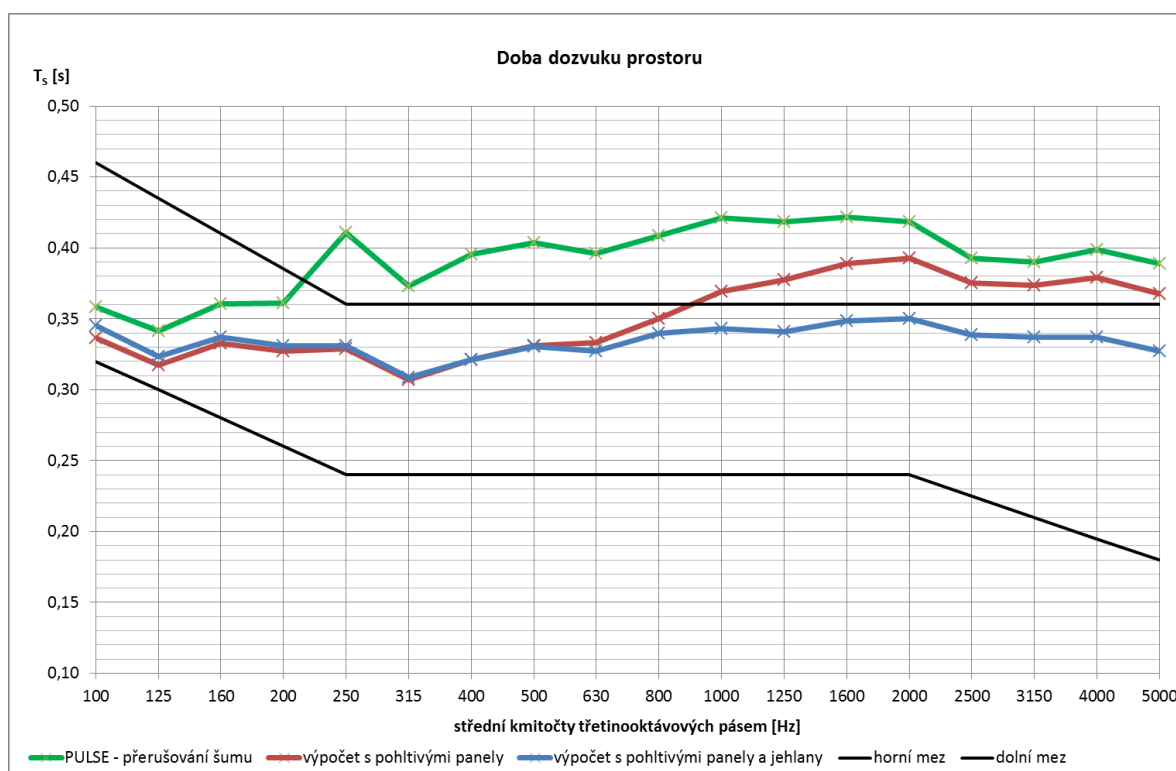
1	deska T-MA3	zapuštěna o 3 mm do rámu
2	minerální vata 40 mm	zabaleno v mikrotenu
3	provázek napnutý za vatou	zajištění polohy vaty u přední desky
4	rám z 18 mm laminované DTD desky	rozměry 63,6 x 123,6 x 10 cm
5	hranoly upevněné na stěnu	montáž panelu šrouby skrz bok

Tab. 6.3: Skladba pohltivého panelu



Mezi přední deskou a minerální vatou je nutné udržet z důvodu spolukmitajícího vzduchu za otvorem mezeru, to bude zajištěno provázkovou sítí napnutou mezi boky rámu ve vzdálenosti 10 mm od přední desky. Vata bude z hygienických důvodů zabalena do tenkého mikrotenu. Přední deska bude k rámu upevněna na truhlářské kolíčky a zaklížena.

Vybrané přední desky jsou dodávány v rozměru 120 x 60 cm. Na uvažovanou část stropu o ploše 2,31 x 2,37 m budou umístěny 4 celé panely a jeden menší, uvažované rozmístění panelů na stěnu ukazuje obrázek 6.4(b). Umístění panelů bude mít kromě snížení odrazivosti stěny vliv i na snížení doby dozvuku v prostoru. Katalogové hodnoty pohltivosti udávané pro třetinooktávová pásma (viz tabulka 6.2) byly zahrnuty do výpočtu doby dozvuku po úpravách. Z naměřené doby dozvuku prostoru se vypočte průměrná pohltivost plochy stěn. Část plochy se poté nahradí plochou odpovídající úpravám s vlastní frekvenční závislostí pohltivosti a opět se dopočte výsledná doba dozvuku. Podrobný postup tohoto výpočtu je uveden v [1]. Frekvenční průběh naměřené doby dozvuku a dopočítané doby dozvuku po aplikaci pohltivých panelů a 2 m<sup>2</sup> akustických jehlanů zobrazuje obrázek 6.6.



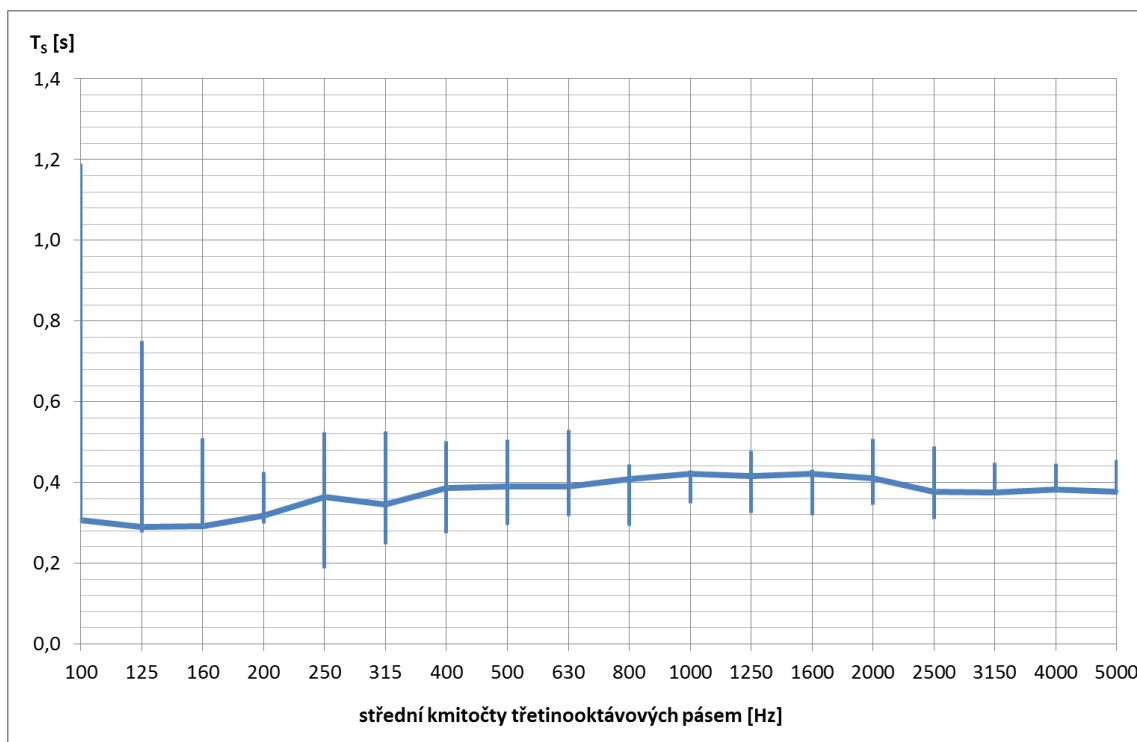
**Obr. 6.6:** Doba dozvuku před a po aplikaci pohltivých panelů a jehlanů

Z dopočítané doby dozvuku je vidět že po aplikaci výše zmíněných panelů by doba dozvuku měla až do frekvence 800 Hz vyhovovat doporučeným mezím pro poslechové prostory. Pro řešení vyšší části frekvenčního pásma jsou do výpočtu zahrnuty 2 m<sup>2</sup> akustických jehlanů o výšce 70 mm. Katalogový list k uvažovaným jehlanům je v příloze B.6. Pro umístění dalších porézních panelů je dostatek prostoru ještě na stropech, stěnách, případně i na zmiňované čelní ploše vestavné skříně. Z hlediska rozložení akustického pole

by bylo vhodnější rozmístění menších ploch na několika místech v prostoru.

### 6.3 Rozptylové prvky

Z naměřených dob dozvuku ze všech měřecích míst byl sestaven graf 6.7 zobrazující rozptyl minimální a maximální hodnoty doby dozvuku pro třetinooktávová pásma, křivka vyznačuje průměr ze všech měření, jedná se o data naměřená systémem Pulse. Pole lze považovat za difúzní od frekvence kdy se rozptyl doby nemění. Z uvedeného grafu lze soudit že pole za difúzní považovat nelze, možná na konci měřeného pásma od oblasti 3 kHz. Proto by bylo vhodné umístit do prostoru rozptylové prvky pokrývající co nejširší frekvenční pásmo.



Obr. 6.7: Rozptyl doby dozvuku - měření systémem Pulse

#### 6.3.1 Návrh RPG difuzoru

Na roh místnosti proti poslechovému místu bude umístěn RPG difuzor. Tvořen bude dvěma díly postavenými do tvaru L s délkou ramen maximálně 50 cm a maximální hloubkou šachet 25 cm, tyto rozměry jsou dány prostorem. Aby nebylo nutné řešit uchycení poměrně těžkých difuzorů na stěnu budou jednotlivé díly skládány přímo na podlahu. Difuzor můžeme považovat za dostatečně účinný pokud je počet hlavních směrů odrazu  $p$  určený vztahem 6.1 alespoň 5. Uvažujeme odrazy v polovině před difuzorem a vztah

je dán pro nejnižší frekvenci návrhu, pro vyšší frekvence se počet odrazů zvyšuje.

Veličiny uvedené ve vzorcích:

$f_{\min}$	nejnižší frekvence v Hz
$f_{\max}$	nejvyšší frekvence v Hz
$N$	počet šachet
$b$	šířka šachty v m
$c$	rychlost zvuku v m.s <sup>-1</sup>

$$p = \frac{2 \cdot f_{\min} \cdot N \cdot b}{c} + 1 \quad (6.1)$$

Šířku šachty je možné spočítat podle vztahu 6.2 a je závislá na zvolené horní frekvenci difuzoru. Rozložení šachet je často symetrické podle středu, při nedostatku prostoru je ale možné jednu z krajních šachet vynechat bez většího vlivu na výslednou účinnost. Počet šachet je pro správnou funkci volen jako nejbližší vyšší prvočíslo + 1 k výsledku rovnice 6.3. Z rovnice 6.4 je možné určit hloubku jednotlivých šachet, vzdálenosti odpovídají rozložení kvadratické řady. Koeficient  $S_n$  je určen rozdílem  $n^2 - kN$ ,  $n$  je pořadové číslo šachty (číslováno od 0),  $N$  celkový počet šachet, a  $k$  je celá část podílu  $n^2/N$ . Maximální hloubka šachet dosahuje přibližně poloviny vlnové délky nejnižší frekvence difuzoru. Na součinu  $N \cdot b$  závisí rovnoměrnost rozptylu difuzoru. Širokopásmového účinku lze dosáhnout při velkém počtu úzkých hlubokých šachet.

$$b = \frac{c}{2 \cdot f_{\max}} \quad (6.2)$$

$$N = (p - 1) \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (6.3)$$

$$d_n = S_n \frac{c}{2 \cdot N \cdot f_{\min}} \quad (6.4)$$

Pro zamýšlené použití by bylo vhodné dosáhnout co nejširšího pásma účinnosti. Vzhledem k omezené šířce a hloubce difuzoru není možné pokrýt pásmo nízkých kmitočtů, difuzor bude mít pro nižší frekvence menší účinnost. Pro rozšíření šířky pásma lze použít ještě další menší konstrukci uvnitř šachty difuzoru, tato možnost je popsána v [5]. Jde ale o pracnější řešení, pokud uvažujeme výrobu difuzorů svépomocí.

Pro pokrytí zmíněného rohu budou využity dva typy difuzorů prostřídáné v jednotlivých patrech. Frekvenční rozsah je značně omezen maximálními rozměry difuzoru, budou použity dva typy s různým počtem šachet pracujících v pásmu 1 - 4,5 kHz a 1 - 2,7 kHz. Difuzory fungují i v pásmu nižším než uvedeném, pouze odráží do méně směrů. Výpočet byl proveden v programu Microsoft Excel podle výše uvedených vzorců. Rozměry difuzorů jsou uvedené v tabulce 6.4, hloubky šachet v tabulkách 6.5 a 6.6. Vizualizace 6.9 zachycuje z pohledu pracovního stolu.

	difuzor 1	difuzor 2
frekvenční pásmo	1 - 4,5 kHz	1 - 2,7 kHz
šířka šachty	37 mm	63 mm
počet šachet	8	12
výška šachet	50 cm	50 cm
tloušťka příček	6 mm	6 mm
tloušťka rámu	12 mm	12 mm

**Tab. 6.4:** Rozměry difuzorů

šachta	0	1	2	3	4	5	6	7
hloubka [mm]	0	24,3	97,1	48,6	48,6	97,1	24,3	0

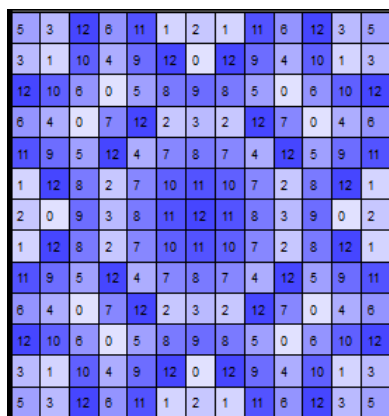
**Tab. 6.5:** Difuzor 1 - hloubky šachet

šachta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
hloubka [mm]	0	9,4	37,5	85,3	46,8	28,1	28,1	46,8	85,3	37,5	9,4	0

**Tab. 6.6:** Difuzor 2 - hloubky šachet

### 6.3.2 Návrh 2D-QRD difuzoru

Jako další rozptylové prvky budou použity již dříve zmíněné panely na principu 2D RPG difuzorů pověšené na zeď. Pro návrh je možné využít některý z dostupných kalkulátorů, například program QRDude [14] nebo online kalkulátor dostupný na [13]. V kalkulátorech bývá možnost výpočtu podle požadovaného rozsahu frekvencí nebo maximální hloubky panelu a průřezu jednotlivých dílčích ploch. Panely budou vyrobeny bez dělicích příček z různě dlouhých hranolů o průřezu 30x30 mm. Návrh proběhl v programu QRdude, s maximální délkou hranolů 175 mm a 13 hranoly na hranu. Tomu odpovídá frekvenční rozsah 900 Hz až 5,7 kHz. Rozložení výšek panelů zobrazuje obrázek 6.8, číslům odpovídají délky jednotlivých prvků uvedené v tabulce 6.7.



Obr. 6.8: Skladba hranolů 2D RPG difuzoru

hranol	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
délka [mm]	15	29	44	58	73	88	102	117	132	146	161	175

Tab. 6.7: 2D RPG difuzor - délky hranolů

prvek	frekvenční rozsah	počet prvků	celková plocha [m <sup>2</sup> ]
RPG difuzor 1	1 - 4,5 kHz	4	1,0
RPG difuzor 2	1 - 2,7 kHz	4	1,0
2D-RPQ difuzor	0,9 - 5,7 kHz	12	1,8
akustické jehliny, výška 70 mm	od 1 kHz výše	8	2,0
akustická pěna, tloušťka 50 mm	od 800 Hz výše	6	1,5
pohltivý panel, deska T-MA3	250 Hz - 700 Hz	5	3,3
rezonátor	do 200 Hz	1	1,3

Tab. 6.8: Přehled zamýšlených akustických prvků



Obr. 6.9: Vizualizace umístění akustických prvků 1



Obr. 6.10: Vizualizace umístění akustických prvků 2

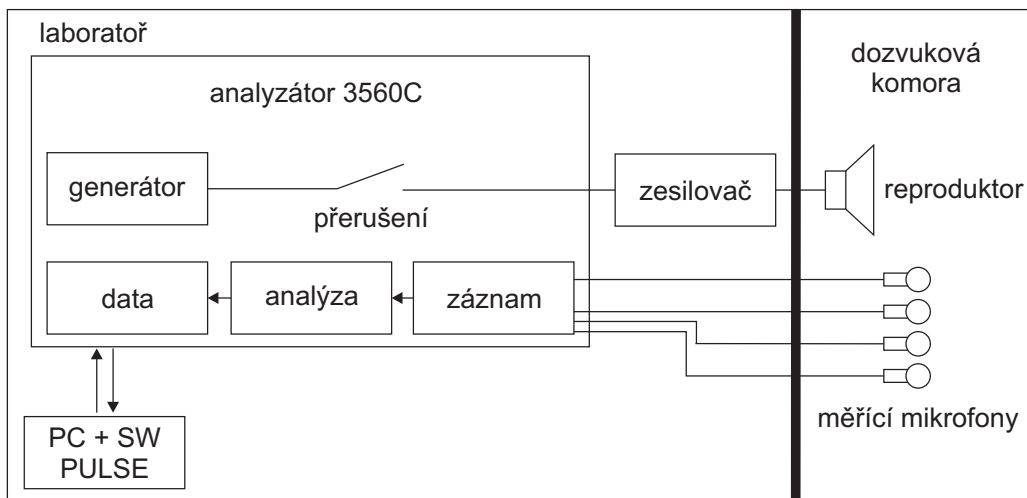
# 7

## Měření pohltivých panelů v dozvukové komoře

Podle návrhu v bodě 6.2 byly realizovány pohltivé panely. Minerální vata Rockwool Airrock ND o tloušťce 40 mm byla z hygienických důvodů zabalena do mikrotenových pytlů a z důvodu spolukmitajícího vzduchu umístěna 10 mm za přední desku. Vymezení vzdáleností je zajištěno napnutou provázkovou sítí. Fotografie konstrukce jsou v přílohách B.4 a B.5. Pro ověření parametrů bylo provedeno měření v dozvukové komoře ZČU v Plzni. Rozměry komory jsou na výkresu v příloze A.9, objem je 214,9 m<sup>3</sup>. Komora má stěny opatřené odrazivým nátěrem a pro zajištění náhodného a mnohonásobného odrazu jsou v ní zavěšeny různé velké a prohnuté plexisklové desky. Doba dozvuku prázdné místnosti se pohybuje až kolem 15 vteřin. Měření je prováděno na 12 pozicích mikrofonů se dvěma polohami zdroje zvuku. K analyzátoru B&K je připojena vždy čtveřice měřících mikrofonů 4943. Z analyzátoru je také řízeno vypínání zdroje zvuku, kterým je reproduktor Yamaha S115 V napájený zesilovačem Yamaha P7000S, budícím signálem je růžový šum. Hodnoty pro jednu konfiguraci poloh mikrofonů a zdroje byly průměrovány z pěti měření. Blokové schéma měření je na obrázku 7.1, tabulka 7.1 obsahuje seznam použité techniky.

	výrobce	seriové číslo
analyzátor 3560C	Brüel & Kjaer	2241811
mikrofon 4943-C-0001	Brüel & Kjaer	2517032
mikrofon 4943-C-0001	Brüel & Kjaer	2517058
mikrofon 4943-C-0001	Brüel & Kjaer	2517059
mikrofon 4943-C-0001	Brüel & Kjaer	2517060
software Labshop PULSE	Brüel & Kjaer	
zesilovač P7000S	Yamaha	HCFMI 01037
reproduktor S 115V 500W	Yamaha	11811700

**Tab. 7.1:** Měřící přístroje - měření v dozvukové komoře



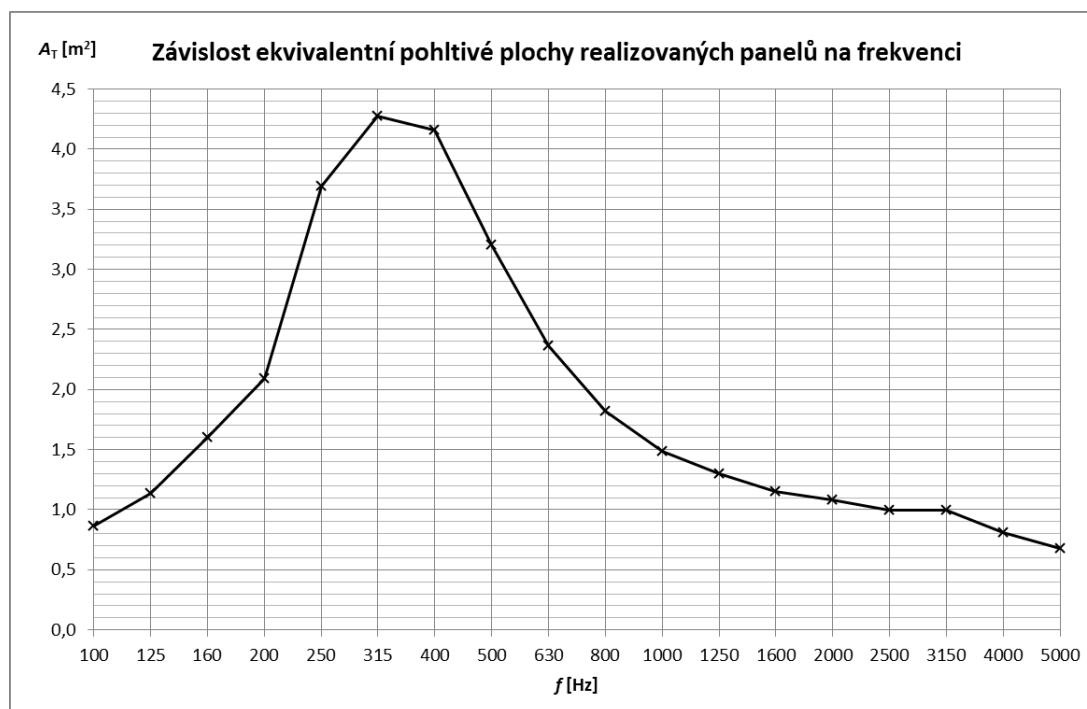
Obr. 7.1: Blokové schéma zapojení měření doby dozvuku v dozvukové komoře



Obr. 7.2: Měření panelů v dozvukové komoře



Panely byly položeny na podlahu komory v konfiguraci jaká je předpokládána pro zavěšení pod strop (viz fotografie A.9). Podle normy ČSN EN ISO 354 by měla být plocha vzorku  $10,8 \text{ m}^2$ . Potřebná plocha panelů pro úpravu místnosti je ale pouze  $3,3 \text{ m}^2$ . Menší měřená plocha bude mít vliv na velikost pohltivosti  $\alpha$ , rezonance panelů by ale měla být změřena správně. Naměřené hodnoty ze všech pozic mikrofonů a zdrojů byly zprůměrovány. Výpočtem založeným na porovnání hodnot s dobou dozvuku prázdné komory byla určena závislost ekvivalentní pohltivé plochy na frekvenci, výsledný průběh je v grafu 7.3.



**Obr. 7.3:** Závislost ekvivalentní pohltivé plochy realizovaného panelu na frekvenci

Protože se nejedná o celistvou plochu měřeného vzorku je do grafu vynesena pouze závislost ekvivalentní pohltivé plochy. Frekvenční průběh odpovídá průběhu zvukové pohltivosti  $\alpha$  a je značně odlišný od průběhu v katalogu, není účinný v tak širokém frekvenčním rozsahu jak bylo předpokládáno. To může být dáno konstrukcí panelu, je možné že vzdálenost vaty od přední stěny (10 mm) je moc velká. Pokud by byla vata, případně mikrotenový obal přímo na rubu přední stěny, docházelo by ke snižování pohltivosti  $\alpha$ . Mezeru je tedy nutné zachovat z důvodu spolukmitajícího vzduchu za otvorem, ale je možné ji zmenšit a pro vymezení vzdálenosti použít například silnější pletivo. Druhým důvodem může být tloušťka obalového mikrotenu, desky vaty jsou zabalené do 2 pytlů přetažených přes sebe (viz fotografie v příloze B.5), takže ve větší části panelu jsou přes sebe dvě vrstvy mikrotenu. To může mít vliv hlavně na vyšších kmitočtech.

Jedná se o první konstrukci tohoto typu panelů, a tak je tento první prototyp uvažován jako testovací. Bude provedena zmiňovaná úprava zmenšení vzdálenosti od přední desky a vymezení pomocí pletiva. Vata bude také zabalena pouze do jedné vrstvy tenké malířské

fólie. Tyto úpravy by mohly mít za následek roztažení pásma pohltivosti panelů. Po odladění akustických parametrů budou panely z estetických důvodů opatřeny jednotným nátěrem.

# 8

## Závěr

Zadáním práce byl návrh akustických úprav vybrané místnosti. V prvních kapitolách jsou rozebrány základní pojmy prostorové akustiky a možnosti měření akustických parametrů prostorů. Další kapitola obsahuje nejpoužívanější akustické prvky určené pro snížení doby dozvuku prostoru a zvýšení difuzivity akustického pole. Na základě získaných teoretických znalostí bylo po vyhodnocení měření pro vybranou místnost navrženo několik akustických úprav. Po jejich realizaci by místnost měla splňovat normou ČSN 73 0526 udávanou dobu dozvuku pro prostory určené k poslechu, zpracování a kontrole zvuku. V kapitole 6 je popsán návrh jednotlivých prvků včetně výpočtů. Pro výpočet některých prvků byly vytvořeny soubory v programu Microsoft Excel, do kterých se zadají základní požadavky a výpočet proběhne automaticky. V programu Blender3D byla vytvořena vizualizace umístění akustických prvků v místnosti.

Z navržených prvků byly pro realizaci vybrány pohltivé panely určené pro pokrytí jedné ze stěn. Panely pracující na principu Helmholtzova rezonátoru s různě velkými otvory v přední desce (výrobek Audition Verso T-MA3 firmy Soning). Tyto desky byly zasazeny do svépomocí vyrobených rámců, jako tlumení za přední deskou byla použita minerální vata Rockwool Airrock ND 40 mm. Pro ověření parametrů panelů bylo provedeno měření v dozvukové komoře ZČU. Plocha  $3,3 \text{ m}^2$  potřebná pro pokrytí stěny ale není dostatečná pro ověření velikosti zvukové pohltivosti. Díky měření byl ale získán frekvenční průběh pohltivosti. Panely pohlcují v užším pásmu než bylo původně podle údajů v katalogu předpokládáno. Důvodem mohou být dvě odlišnosti v konstrukci panelu - větší vzdálenost tlumící vaty od přední desky a tloušťka použitých mikrotenových obalů minerální vaty. Tyto dvě odlišnosti budou opraveny a panely budou společně s dalšími uvažovanými prvky ještě před montáží do místnosti přeměřeny v laboratoři. Po montáži všech navržených akustických prvků bude měřením ověřena i samotná místnost, výsledky budou porovnány s měřením místnosti bez úprav, provedeným v rámci této diplomové práce. Místnost by po dokončení měla sloužit pro poslech a zpracování hudebních snímků. Při návrhu a realizaci úprav malých poslechových místností často narážíme na problém s nedostatkem prostoru pro akustické prvky. Velmi obtížné je tak řešit hlavně oblast nízkých a středních kmitočtů, protože rozměry akustických prvků často závisí na

vlnové délce. Dalším faktorem jsou finanční možnosti, protože prodávané akustické prvky nejsou zrovna levnou záležitostí. Mnoho konstrukcí však není složitých a lze je vyrobit svépomocí. Akustické úpravy malých prostor jsou tak vždy kompromisem mezi požadavky na akustické parametry, prostorovými a finančními možnostmi.

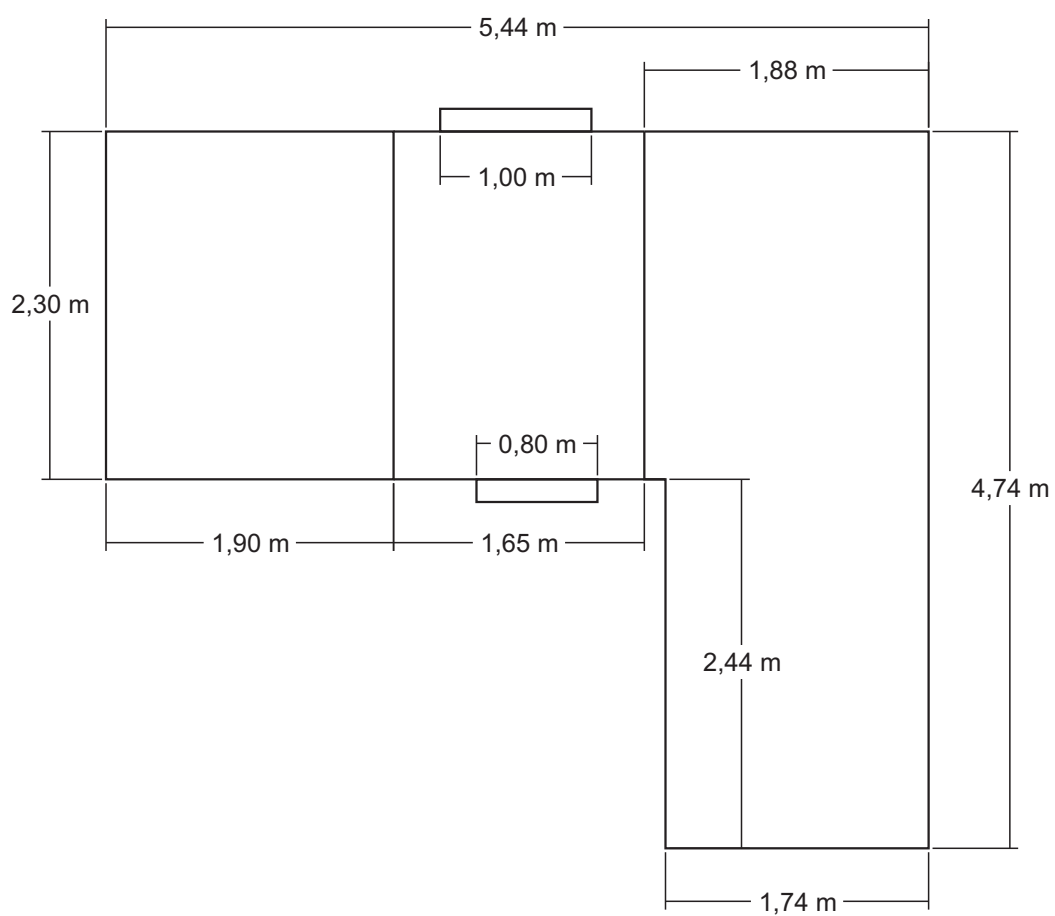
# Literatura

- [1] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika I*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412836.
- [2] EVEREST, F.Alton a POHLMANN, Ken. *Master Handbook of Acoustics - 5th edition*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2009. ISBN 9780071603324.
- [3] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Praha: VÚZORT, 1971.
- [4] KOLMER, F., KYNCL, J. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL, 1982.
- [5] COX, T., D'ANTONIO, P. *Acoustic Absorbers and Diffusers 2 Rev Ed*. United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2009. ISBN-10: 0415471745
- [6] ČSN EN ISO 3382-1. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [7] ČSN EN ISO 3382-2. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [8] ALTMAN, Jan. *Návrh akustických úprav poslechové místnosti*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [9] ŠTENGL, Antonín. *Návrh akustických úprav výukové laboratoře*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [10] POSEKANÝ, Lukáš. *Návrh akustických úprav poslechového prostoru*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [11] ACOUSTIC GRG PRODUCTS. *Acoustic GRG Products: RPG Modffusor*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.rpgeurope.com/images/modffusor/ModffusorProductStripped.jpg>
- [12] OVERTONE ACOUSTICS. *Overtone Acoustics: Sound Diffusers*. [online]. 2015 [cit. 2015-17-03]. Dostupné z: <http://cdn1.bigcommerce.com/server4800/hp6co1s/products/104/images/424/DiffuserA`2`83293.1420215171.1280.1280.jpg?c=2>

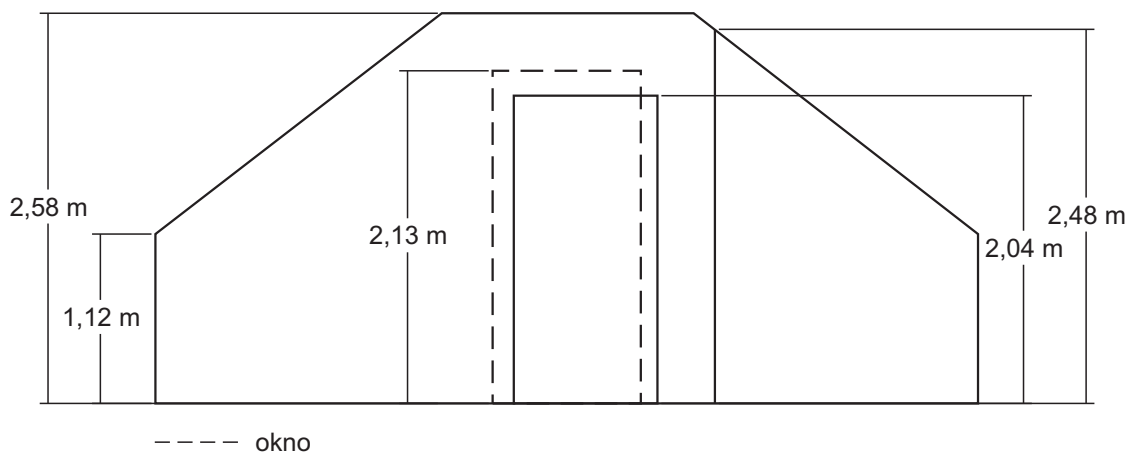
- [13] MH AUDIO. *MH AUDIO: Absorbers & Diffusers*. [online]. 2015 [cit. 2015-24-04]. Dostupné z: <http://www.mh-audio.nl/ACalculators.asp>
- [14] SUBWOOFER-BUILDER. *SUBWOOFER-BUILDER: QR Dude*. [online]. 2010 [cit. 2015-24-04]. Dostupné z: <http://www.subwoofer-builder.com/qrdude.htm>
- [15] AKUSTICKÁ-PĚNA.CZ. *akustická-pěna.cz: Jehlany 7 cm*. [online]. 2015 [cit. 2015-10-04]. Dostupné z: <http://www.akusticka-pena.cz/userfiles/jehlany/protokol-o-mereni-jehlany.pdf>

# Příloha A

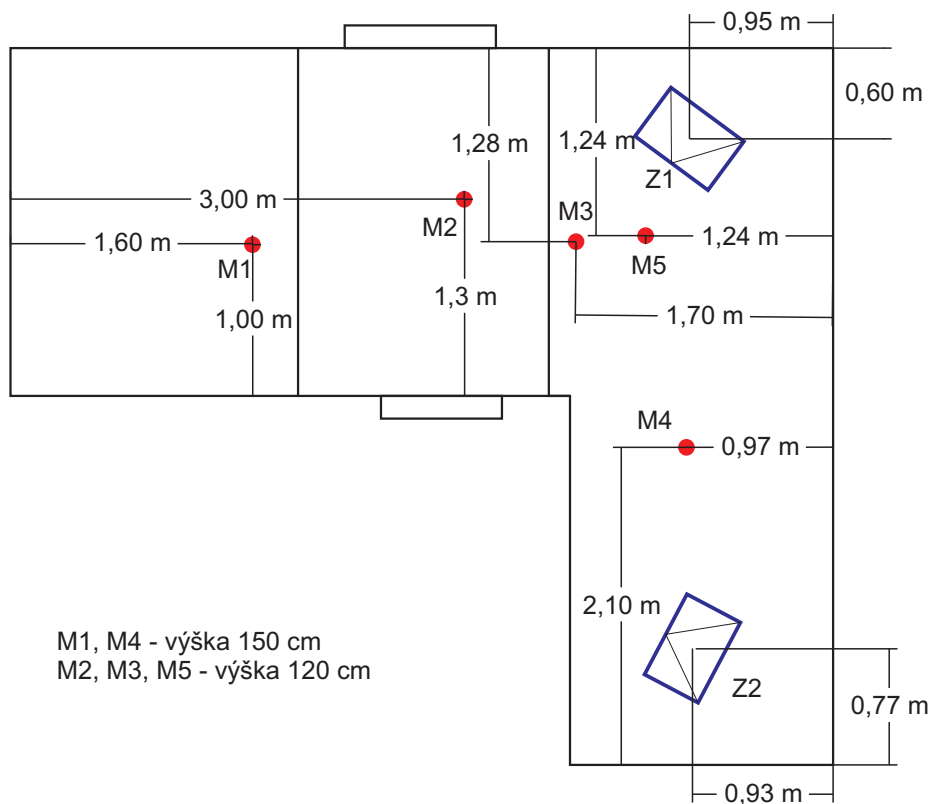
## Výkresy



**Obr. A.1:** Půdorys řešeného prostoru

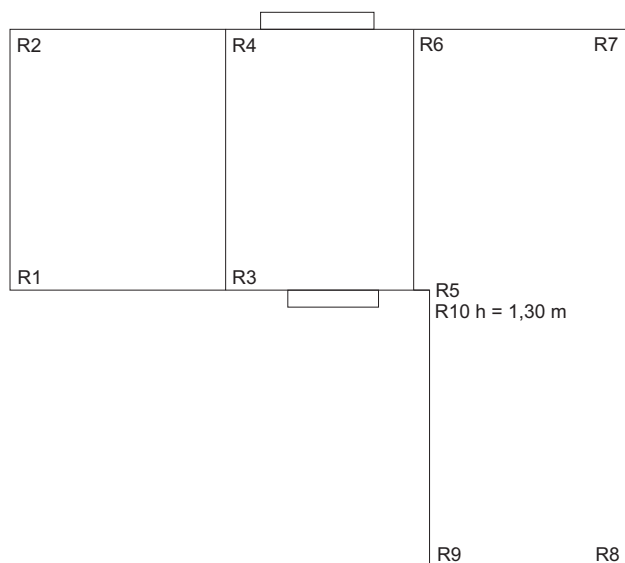


Obr. A.2: Bokorys řešeného prostoru

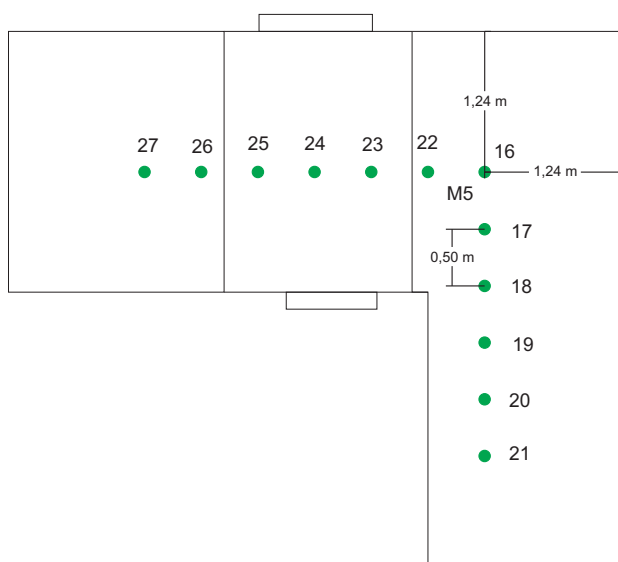


Obr. A.3: Polohy mikrofonů pro měření doby dozvuku a vlastních kmitů prostoru

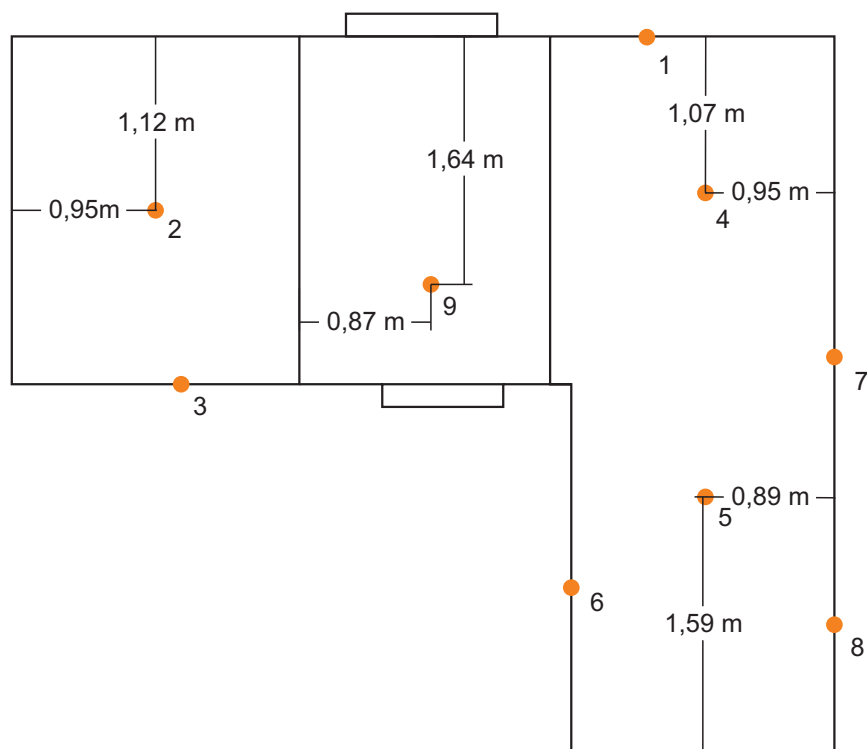




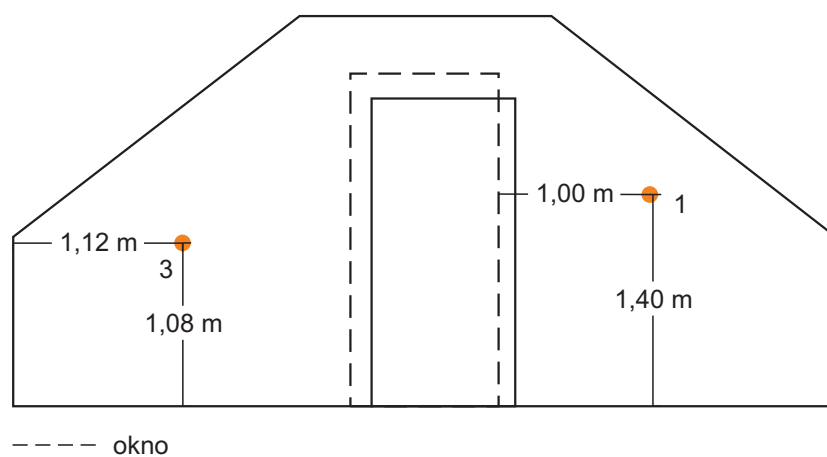
Obr. A.4: Polohy mikrofonů pro měření vlastních kmitů v rozích prostoru



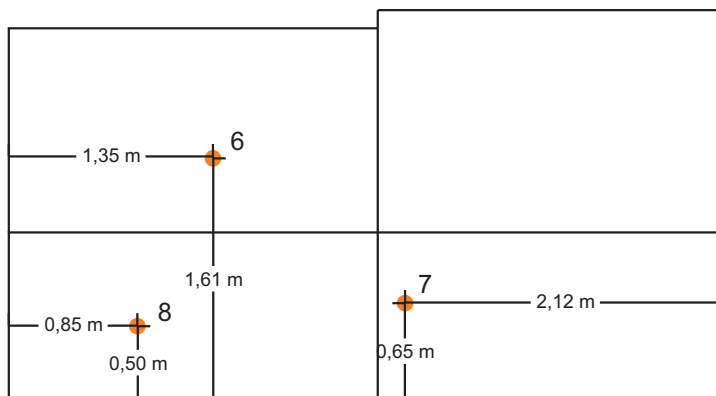
Obr. A.5: Polohy mikrofonů pro měření rozložení pole kolem poslechového místa



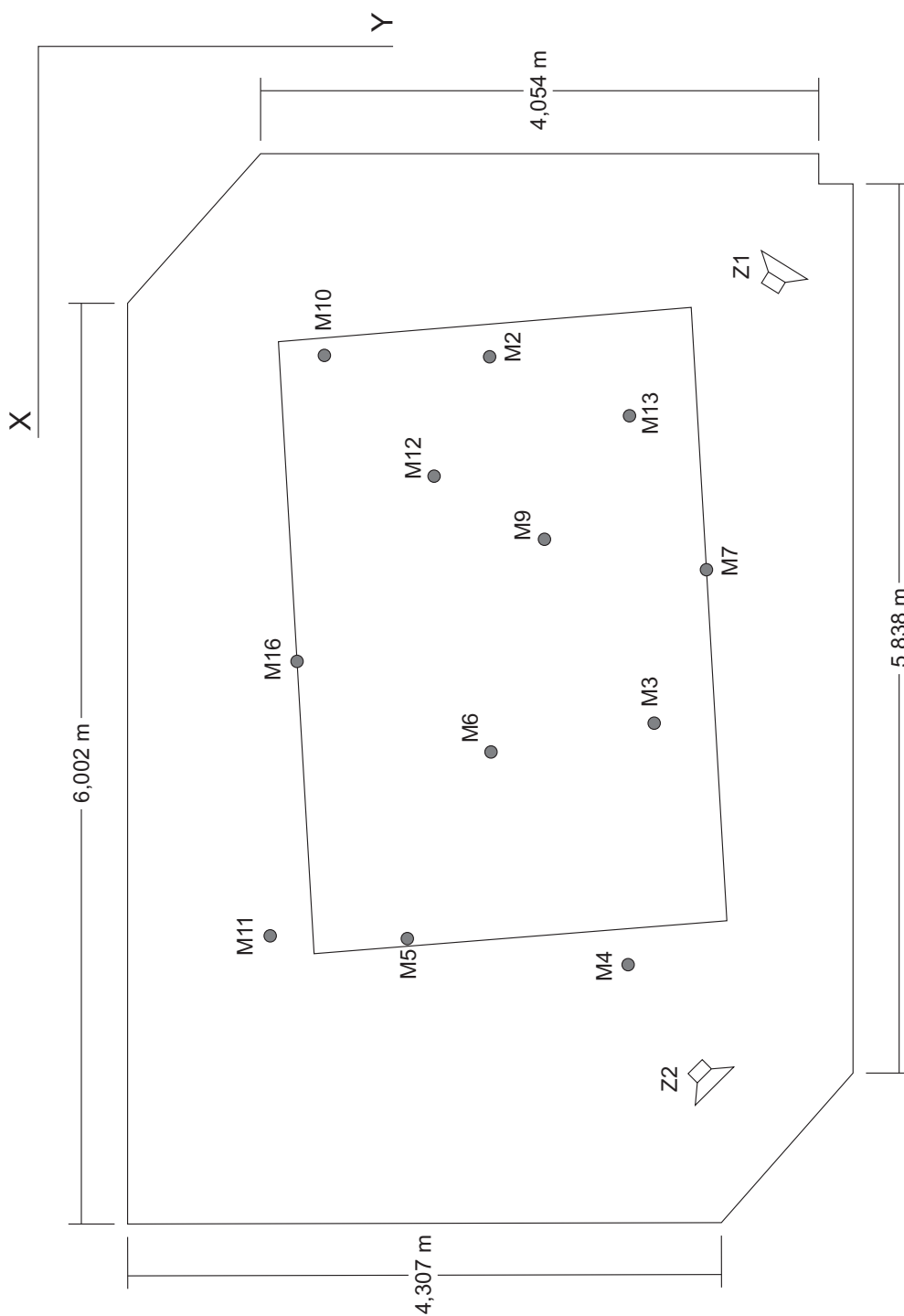
**Obr. A.6:** Polohy akcelerometrů pro měření vibrací stěn - půdorys



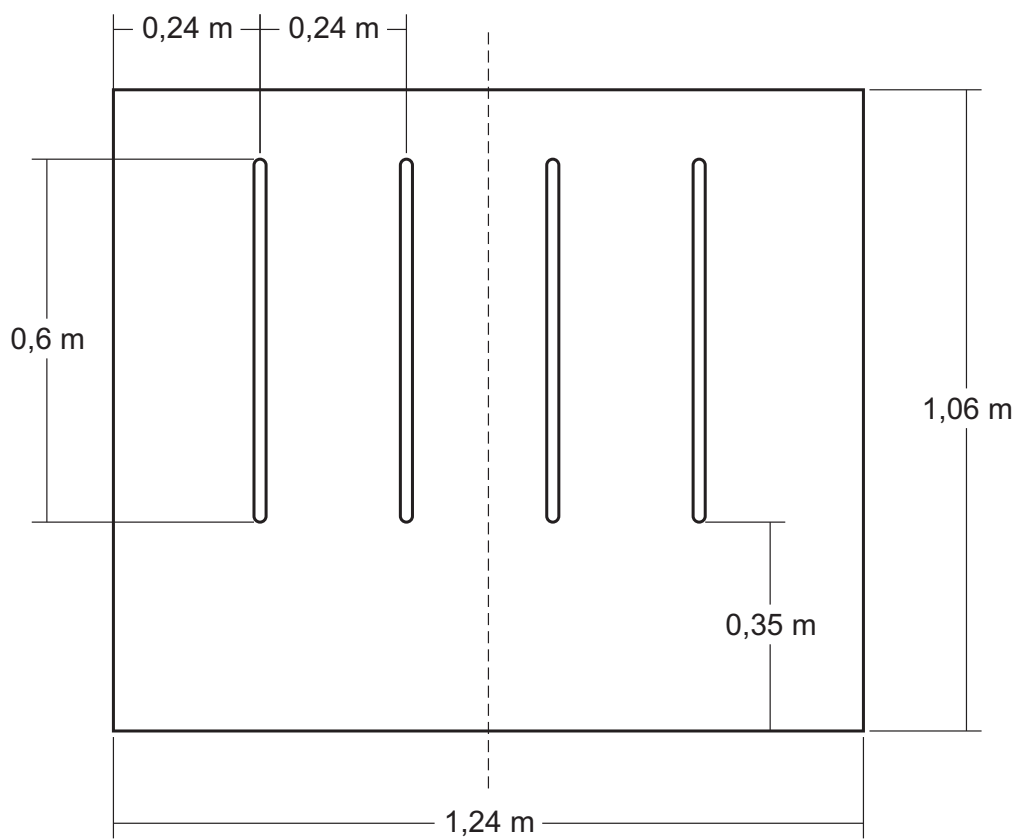
**Obr. A.7:** Polohy akcelerometrů pro měření vibrací stěn - bokorys



Obr. A.8: Polohy akcelerometrů pro měření vibrací stěn - nárys



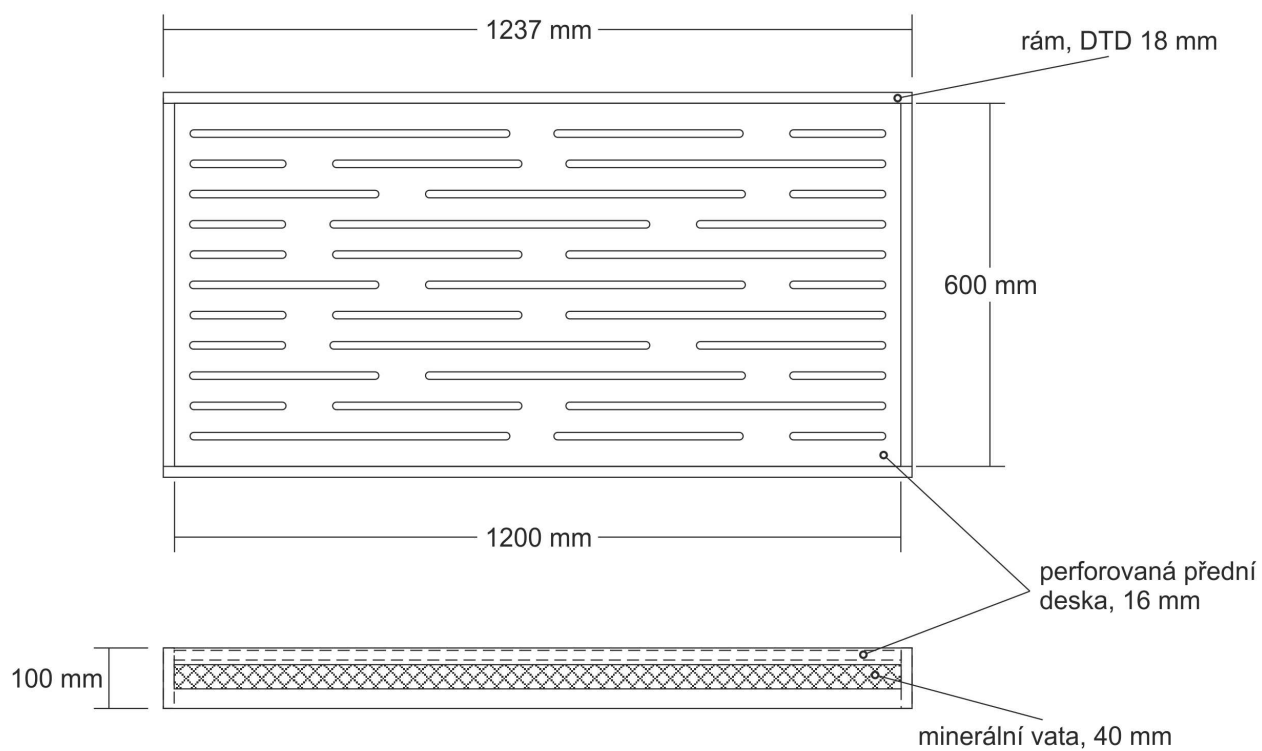
Obr. A.9: Rozměry dozvukové komory, polohy mikrofonů



Obr. A.10: Rezonátor - výkres přední desky

# Příloha B

## Pohltivé panely



Obr. B.1: Pohltivý panel - výkres

## ABSORPČNÍ OBKLAD – AUDITON VERSO T-MA3

### OBECNÉ ÚDAJE

Výrobce/distributor: SONING Praha, a. s.

Zdroj: protokol o zkoušce – laboratoř firmy SONING Praha, a. s.

### POPIS PRVKU

Akustický prvek VERSO T-MA3 je typem deskového perforovaného absorpčního prvku vyrobeného z materiálu na bázi dřeva. Panel VERSO T-MA3 je nutno instalovat na vyrovnávací nosný rošt. Ten může být v závislosti na statických a požárních požadavcích z různého materiálu (např.: kov, dřevo atd.) Povrchová úprava je variabilní v závislosti na estetických požadavcích. Standardně je uvažována dřevěná dýha, barva RAL, vysokotlaký laminát, lamino atd. Obklad je možné vyrobit v provedení s třídou reakce na oheň B – s1, d0.

Prvek VERSO T-MA3 s perforací 12 % je univerzálním stěnovým obkladem využitelným v celé řadě aplikací. Je vhodný jak do výukových prostor (učebny, posluchárny atd.), tak do administrativních prostor (kanceláře, zasedací místnosti, hovorny atd.) Využit jej lze také do prostor s vyšším požadavkem na akustiku a elegantní design. Vzhledem ke značné mechanické odolnosti může být aplikován také ve sportovních halách a tělocvičnách.

### POPIS MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI

Datum provedení zkoušky: a) 22. 6. 2011, b) 9. 6. 2011, c) 15. 6. 2011, d) 22. 6. 2011

Objem dozvukové místnosti: 151 m<sup>3</sup>

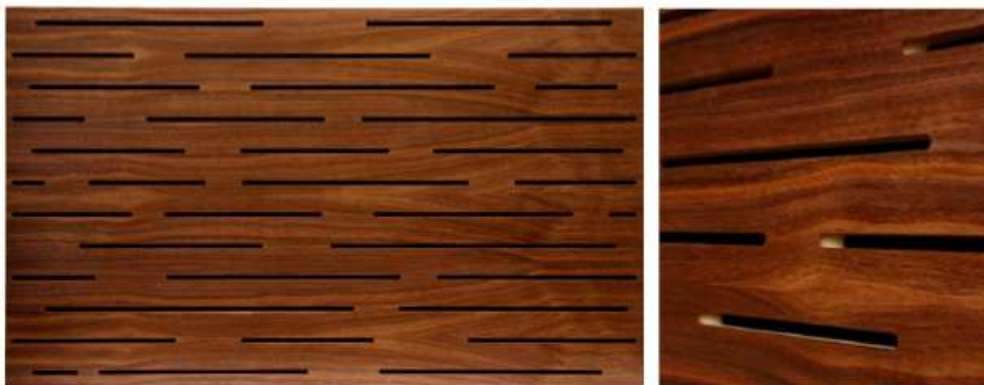
Plocha měřených vzorků: 10,8 m<sup>2</sup>

—+ a) Měřeným vzorkem bylo 15 panelů VERSO T-MA3 o rozměrech 1 200×600 mm. Celková skladebná tloušťka vzorku byla 60 mm. Vzduchová mezera byla zatlumena minerální vlnou tloušťky 40 mm zabalenou v mikrotenu a zasazenou do dřevěných rámu o rozměrech 1 200×600 mm.

—● b) Měřeným vzorkem bylo 15 panelů VERSO T-MA3 o rozměrech 1 200×600 mm umístěných na nosném roštu. Celková skladebná tloušťka vzorku byla 100 mm. Vzduchová mezera byla zatlumena minerální vlnou tloušťky 40 mm zabalenou v mikrotenu a zasazenou do dřevěných rámu o rozměrech 1 200×600 mm. Rámy s minerální vlnou byly přisazeny k rubové straně panelu. Měřený vzorek byl ohraničen ohrádkou z odrazivého materiálu.

—■ c) Stejná konfigurace měření jako v bodě b). Liší se pouze celkovou skladebnou tloušťkou, která v tomto případě byla 150 mm.

—▲ d) Stejná konfigurace měření jako v bodě b). Liší se pouze celkovou skladebnou tloušťkou, která v tomto případě byla 200 mm

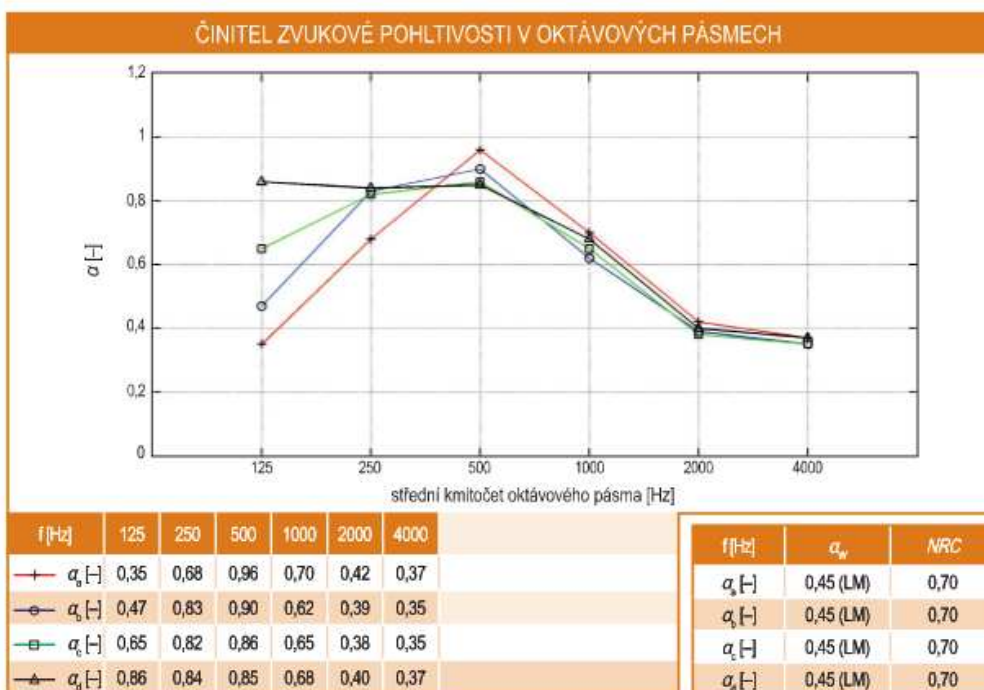
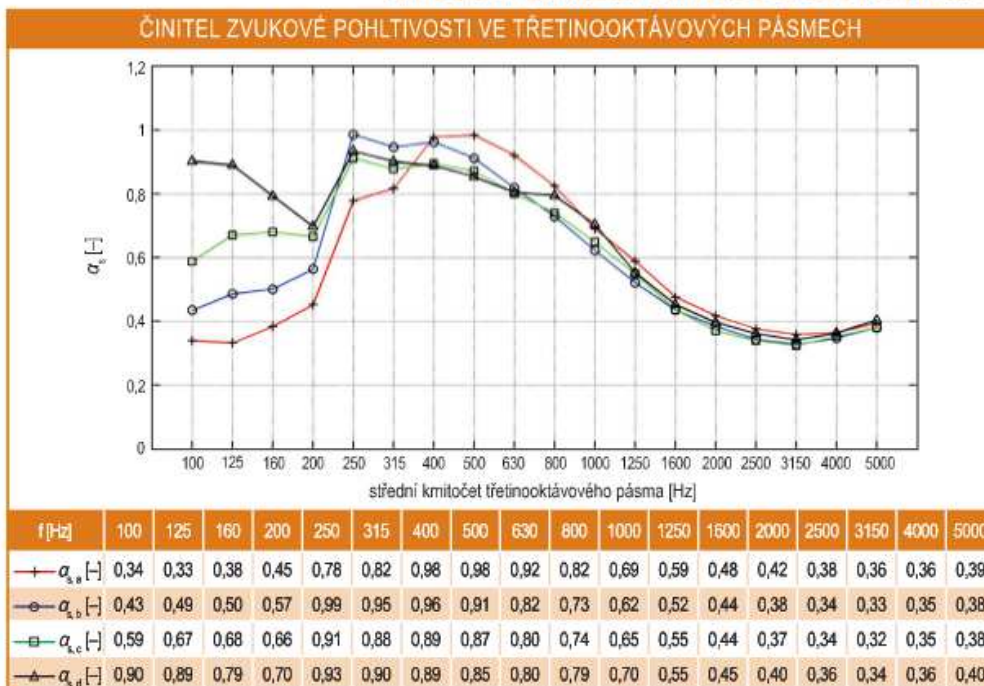


88

Obr. B.2: Deska T-MA3 - katalogový list 1

## ABSORPČNÍ OBKLAD – AUDITON VERSO T-MA3

KMITOČTOVÁ ZÁVISLOST Činitele ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI



89

Obr. B.3: Deska T-MA3 - katalogový list 2





**Obr. B.4:** Konstrukce pohltivého panelu - síť pro vymezení vzdálenosti od přední desky



**Obr. B.5:** Konstrukce pohltivého panelu - celkový pohled

### Protokol o měření

Měřeno v laboratoři VUT Brno – FSI – ústav fyzikálního inženýrství

Datum měření 27.2.2013, Teplota: 23,3°C, tlak: 985 hPa

Prodejce: Alfacoustic.cz

Objemová hustota: 35kg.m<sup>-3</sup>

Obchodní název: Jehlany 7cm

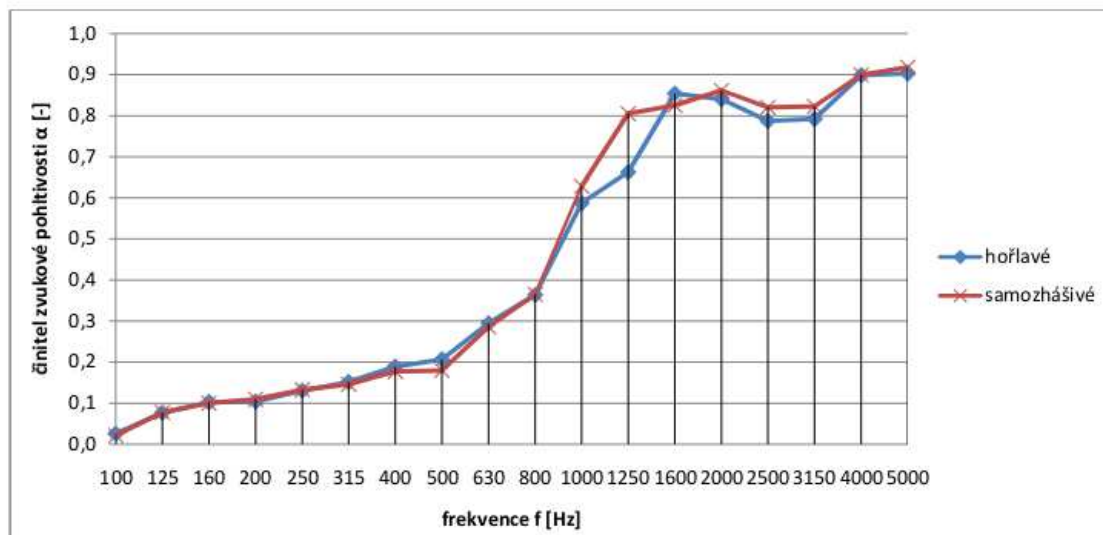
Použití:

výrobní haly, obytné a kancelářské budovy, divadla, kina, studia a veškeré jiné prostory vyžadující akustickou pohodu



kmitočet [Hz]		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
hořlavé	α [-]	0,03	0,08	0,10	0,10	0,13	0,15	0,19	0,21	0,29	0,36	0,59	0,66	0,85	0,84	0,79	0,79	0,90	0,90
samozhášivé	α [-]	0,02	0,08	0,10	0,11	0,13	0,15	0,18	0,18	0,29	0,36	0,63	0,80	0,83	0,86	0,82	0,82	0,90	0,92

Grafický průběh činitele zvukové pohltivosti:



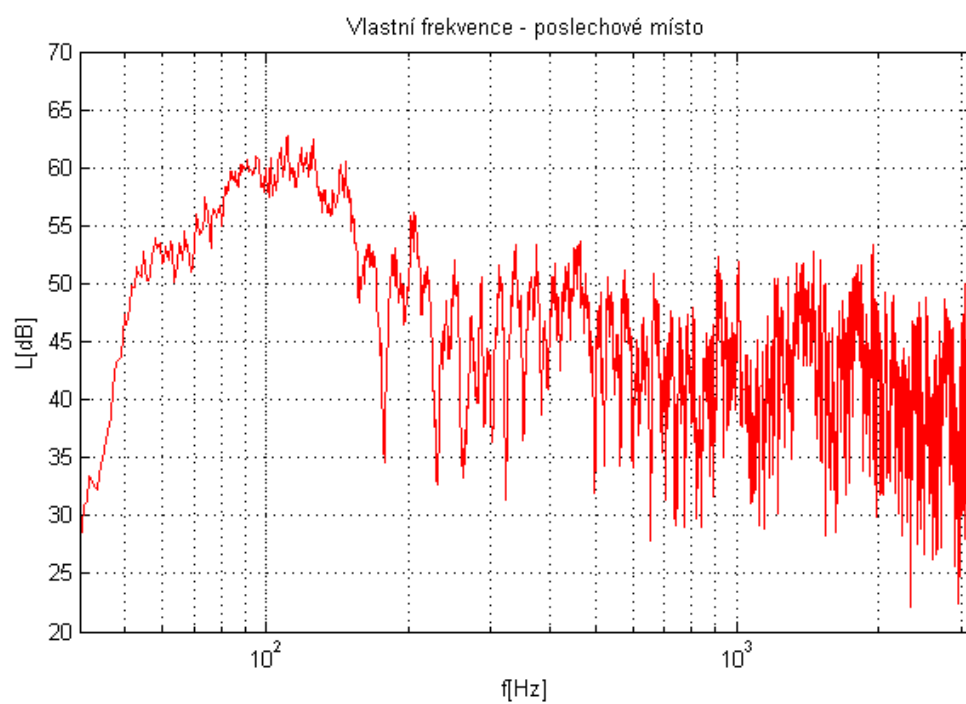
Prohlášení:

Měření bylo uskutečněno v souladu s normou ISO 10534-1, a nebyly zamlčeny žádné údaje

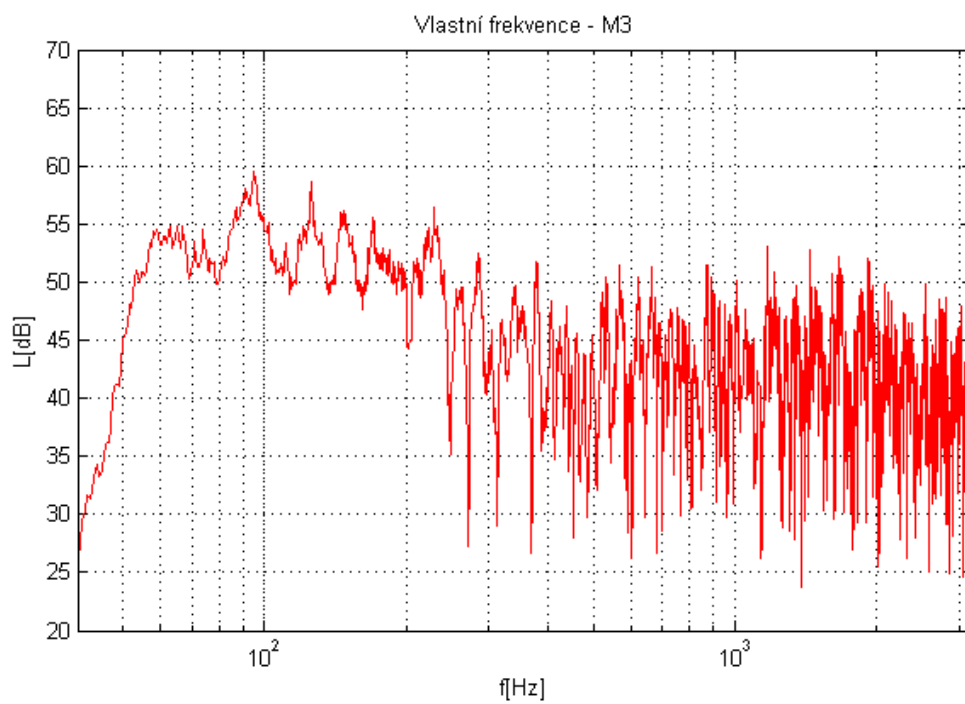
Obr. B.6: Akustické jehlany, výška 70 mm - katalogový list, převzato z [15]

# Příloha C

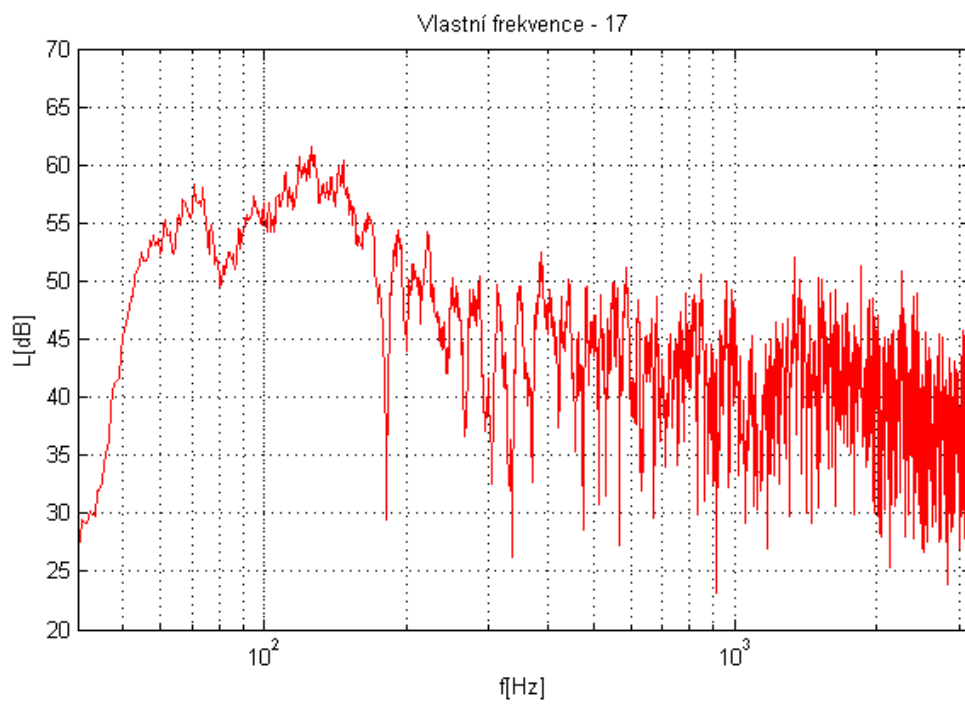
## Měření vlastních kmitů



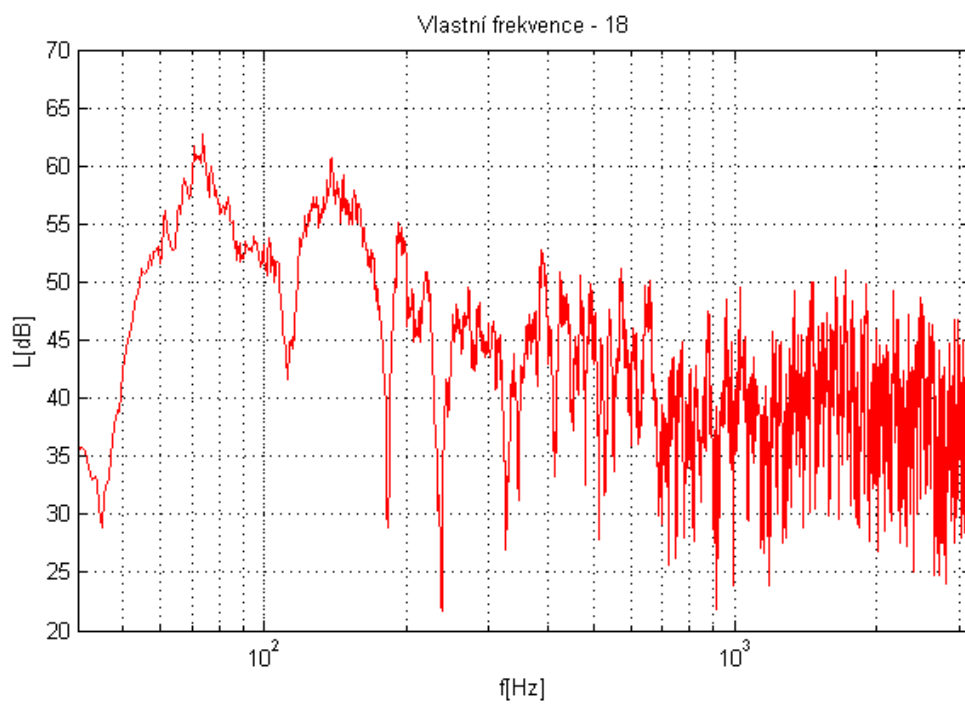
Obr. C.1: Vlastních kmitů v pozici M5 - poslechové místo



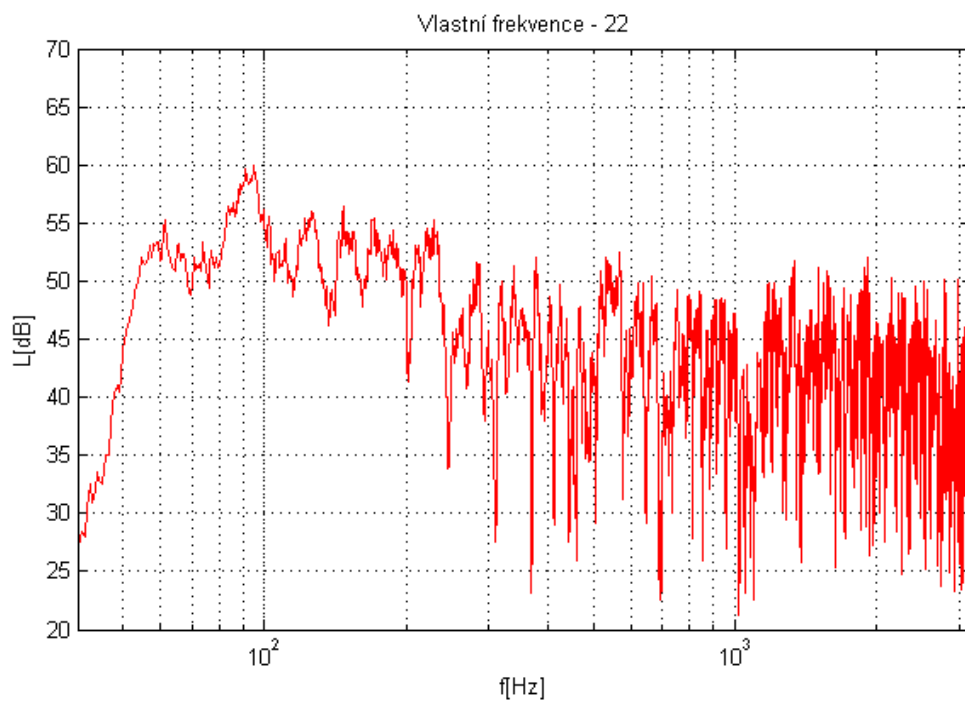
Obr. C.2: Vlastních kmity v pozici M3



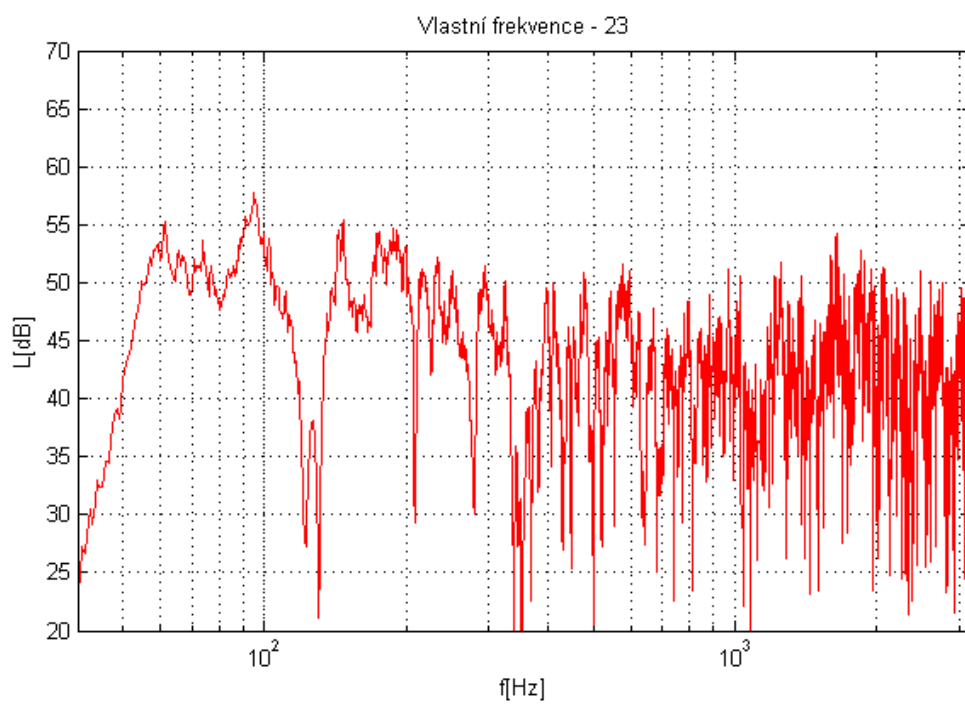
Obr. C.3: Vlastních kmity v pozici 17



Obr. C.4: Vlastních kmity v pozici 18



Obr. C.5: Vlastních kmity v pozici 22



**Obr. C.6:** Vlastních kmity v pozici 23

# Příloha D

## Tabulky

f [Hz]	Metoda integrace impulzní odezvy - 2260 [s]	Metoda přerušovaného šumu - 2260 [s]	Metoda přerušovaného šumu - PULSE [s]
100	0,32	0,28	0,36
125	0,25	0,32	0,34
160	0,25	0,31	0,36
200	0,28	0,34	0,36
250	0,32	0,40	0,41
315	0,32	0,35	0,37
400	0,35	0,41	0,40
500	0,37	0,40	0,40
630	0,39	0,40	0,40
800	0,39	0,43	0,41
1000	0,41	0,44	0,42
1250	0,40	0,44	0,42
1600	0,41	0,43	0,42
2000	0,40	0,42	0,42
2500	0,37	0,38	0,39
3150	0,37	0,38	0,39
4000	0,38	0,38	0,40
5000	0,37	0,38	0,39

**Tab. D.1:** Doba dozvuku prostoru

Mikrofon	x [m]	y [m]	h [m]
M2	1,30	2,64	1,60
M3	3,70	3,84	1,70
M4	5,30	3,64	1,30
M5	5,00	2,04	2,60
M6	3,90	2,64	1,80
M7	2,70	4,24	2,10
M9	2,50	3,04	1,50
M10	1,30	1,44	1,30
M11	5,00	1,04	1,80
M12	2,10	2,24	1,50
M13	1,70	3,64	2,60
M16	3,30	1,24	1,30

Tab. D.2: Polohy mikrofonů v dozvukové komoře

Zdroj	x [m]	y [m]
Z1	0,87	4,62
Z2	5,88	4,07

Tab. D.3: Polohy zdroje v dozvukové komoře

Skupina mikrofonů	Název bodu v prostoru	Mikrofon PULSE
1	M7	2
1	M5	1
1	M16	3
1	M4	4
2	M13	2
2	M3	4
2	M11	3
2	M12	1
3	M6	3
3	M9	2
3	M2	1
3	M10	4

Tab. D.4: Měření v dozvukové komoře - skupiny mikrofonů



Měření	Konfigurace	Pozice zdroje	Skupina mikrofonů	Teplota [°C]	Vlhkost [%]
1	pohltivé panely	Z1	1	20,6	69,4
2	pohltivé panely	Z2	1	20,6	69,5
3	pohltivé panely	Z2	2	20,6	70,6
4	pohltivé panely	Z1	2	20,5	69,8
5	pohltivé panely	Z1	3	20,6	70,5
6	pohltivé panely	Z2	3	20,6	70,7

**Tab. D.5:** Měření v dozvukové komoře - měřicí podmínky a konfigurace

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
$T_S$	9,0	8,5	9,0	7,8	5,4	4,8	4,8	5,2	5,7	6,0
f [Hz]	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000		
$T_S$	6,1	5,9	5,6	5,2	4,7	4,1	3,4	2,8		

**Tab. D.6:** Měření v dozvukové komoře - doba dozvuku