

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh akustických úprav poslechové místnosti

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin PŮTA**
Osobní číslo: **E16N0069P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Návrh akustických úprav poslechové místnosti**
Zadávací 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. Změřte akustické parametry zvoleného prostoru.
2. Navrhněte akustické úpravy tak, aby prostor bylo možné provozovat jako poslechovou místnost.
3. Proveďte alespoň částečnou realizaci navržených úprav a ověřte změnu akustických parametrů měření.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Handbook of Acoustics, Malcolm J. Crocker, ISBN: 978-0-471-25293-1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem a částečnou realizací akustických úprav místnosti v bytě tak, aby bylo možné prostor používat jako poslechovou místnost. Cílem je kvalitní přednes hudby v plánovaném poslechovém místě. Navzdory malým rozměrům zvoleného prostoru je snahou zlepšit akustickou kvalitu i na nízkých frekvencích. Návrh úprav je založen na vypočtených i naměřených akustických parametrech. Jsou zvoleny takové stavební úpravy, které je možné instalovat v bytových prostorách, a jsou demontovatelné. Z navržených akustických úprav jsou vybrány k realizaci nízkofrekvenční absorpční panely, které jsou postaveny svépomocí. Jejich funkce je ověřena měřeními.

Klíčová slova

Prostorová akustika, akustické prvky, doba dozvuku, vlastní kmity, Helmholtzův rezonátor, absorbér, difuzor

Abstract

Půta, Martin. *Design of acoustic treatments for listening room [Návrh akustických úprav pro poslechovou místnost]*. Pilsen, 2019. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications.

Supervisor: Ing. Oldřich Tureček, PhD.

Goal of this master thesis is to design and partially realize acoustic treatments of a room in the apartment so it can be used as a listening room. The aim is to deliver high quality music in the planned listening spot. Despite the small size of the chosen room, the effort is to improve the acoustic quality even at low frequencies. The design of acoustic treatments is based on both calculated and measured acoustic parameters. Constructions that do not interfere with walls nor floor and are demountable are chosen. Low-frequency absorption panels are chosen for the implementation from the designed acoustic treatments. Construction of panels is a personal design. Their function is verified by measurement.

Keywords

room acoustics, acoustic elements, reverberation time, room modes, Helmholtz resonator, absorber, diffuser

Prohlášení

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 autorského zákona č. 121/2000Sb, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §270 trestního zákona č. 40/2009Sb.

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

.....
podpis

V Plzni dne 29.5.2019

Bc. Martin Půta

Obsah

OBSAH	IV
SEZNAM OBRÁZKŮ	VI
SEZNAM TABULEK	IX
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	X
1 ÚVOD	1
2 ÚVOD DO PROSTOROVÉ AKUSTIKY	3
2.1 DOBA DOZVUKU	3
2.2 VLIV ROZMĚRŮ MÍSTNOSTI NA AKUSTIKU	5
2.3 VLASTNÍ KMITY PROSTORU A KRITICKÁ FREKVENCE	6
3 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ V UZAVŘENÉM PROSTORU	9
3.1 MĚŘENÍ VLASTNÍCH KMITŮ PROSTORU	9
3.2 METODY MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	9
3.2.1 <i>Metoda integrované impulzní odezvy</i>	10
3.2.2 <i>Metoda přerušovaného šumu</i>	10
4 MATERIÁLY A KONSTRUKCE POUŽÍVANÉ PRO AKUSTICKÉ ÚPRAVY	12
4.1 PORÉZNÍ A VLÁKNITÉ MATERIÁLY	12
4.2 KMITAJÍCÍ PANELE A MEMBRÁNY	14
4.3 HELMHOLTZŮV REZONÁTOR	15
4.4 ROZPTYLOVÉ PRVKY	18
5 ANALÝZA PROSTORU	21
5.1 ZVOLENÝ PROSTOR	21
5.2 POSLECHOVÉ MÍSTO	22
5.3 VÝPOČET DOBY DOZVUKU	23
5.4 VÝPOČET VLASTNÍCH KMITŮ	24
5.5 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	26
6 NÁVRH A REALIZACE AKUSTICKÝCH ÚPRAV	30
6.1 ZHODNOCENÍ STÁVAJÍCÍHO STAVU PROSTORU	30
6.2 NÁVRH	32
6.2.1 <i>Helmholtzův laťový rezonátor</i>	33
6.2.2 <i>Oblast středních a vysokých frekvencí</i>	37
6.2.3 <i>Vyhodnocení návrhu</i>	41
6.3 REALIZACE	42
6.4 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU PO INSTALACI ÚPRAV	45

ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50
PŘÍLOHA A.....	51
PŘÍLOHA B.....	59

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Doba dozvuku – znázorněn pokles o 60 dB, převzato z [9]	5
Obr. 2.2	Limity pro doporučenou dobu dozvuku normou ITU-R BS.1116-3, převzato z [10].....	5
Obr. 2.3	Poměr stěn pro příznivé rozložení vlastních kmitů místnosti.....	6
Obr. 2.4	Kvádrový model místnosti.....	7
Obr. 2.5	3 druhy odrazu zvukové vlny v místnosti.....	7
Obr. 3.1	Všesměrový zdroj zvuku, převzato z [4]	11
Obr. 4.1	Frekvenční průběh činitele zvukové pohltivosti, převzato s úpravami z [2].....	13
Obr. 4.2	Řez membránou, převzato s úpravami z [6]	15
Obr. 4.3	Řez Helmholtzovým rezonátorem, inspirováno v [2]	16
Obr. 4.4	Mechanická analogie funkce Helmholtzova rezonátoru, převzato s úpravami z [2]	16
Obr. 4.5	Korekce délky otvoru $2\Delta l$ pro různé druhy otvorů vztahující se na šířku štěrbin (1), poloměr otvoru (2) a stranu čtverce (3), převzato s úpravami z [2].....	17
Obr. 4.6	Závislost činitele zvukové pohltivosti Helmholtzova rezonátoru na poměru Rez/z_0 , převzato z [2].....	18
Obr. 4.7	Používané periodické struktury rozptylující zvuk, převzato [2].....	19
Obr. 4.8	RPG Difuzor, převzato z [7].....	19
Obr. 4.9	2D QRD difuzor využívající principu difrakční mřížky, převzato z [8]	20
Obr. 5.1	Půdorys zvolené místnosti	21
Obr. 5.2	Náhled místnosti od dveří směrem k oknům	22
Obr. 5.3	Umístění poslechového místa	23
Obr. 5.4	Závislost vypočtené doby dozvuku prázdné místnosti na frekvenci	24
Obr. 5.5	Rozmístění mikrofonů a zvukových zdrojů.....	27
Obr. 5.6	Rozptyl doby dozvuku prázdné místnosti	28
Obr. 5.7	Doba dozvuku prázdné místnosti, porovnání s teoretickým výpočtem.....	28
Obr. 6.1	Doporučené limity doby dozvuku dle normy ITU-R BS.1116-3 [10]	30
Obr. 6.2	Doba dozvuku prázdné místnosti s limity doporučenými normou ITU-R BS.1116-3	31
Obr. 6.3	Grafické znázornění vypočtených vlastních kmitů místnosti v oblasti 80-130 Hz, červená – axiální, modrá – tangenciální, zelená – šikmé.....	32

Obr. 6.4	Uvažovaná pozice navrhovaného Helmholtzova rezonátoru	33
Obr. 6.5	Frekvenční závislost činitele pohltivosti navrženého rezonátoru.....	35
Obr. 6.6	Názorný řez navrženým rezonátorem.....	36
Obr. 6.7	Předpokládaný průběh doby dozvuku po instalaci navrženého Helmholtzova laťového rezonátoru v porovnání s naměřenou dobou dozvuku prázdné místnosti	37
Obr. 6.8	Předpokládaný průběh doby dozvuku po instalaci navrženého Helmholtzova laťového rezonátoru	38
Obr. 6.9	Znázornění oblastí zvolené pro akustické úpravy	39
Obr. 6.10	Závislosti činitelů pohltivosti prvků zvolených pro úpravy	40
Obr. 6.11	Závislost předpokládané doby dozvuku na frekvenci po aplikaci navržených úprav	41
Obr. 6.12	Absorbéry, které mohou být užitečné ve finální fázi úprav	42
Obr. 6.13	Konstrukce navrženého Helmholtzova rezonátoru na levé stěně.....	43
Obr. 6.14	Pohled na zhotovené 4 konstrukce Helmholtzových rezonátorů.....	44
Obr. 6.15	Rozmístění mikrofonů a zvukových zdrojů pro měření po instalaci Helmholtzova rezonátoru	45
Obr. 6.16	Rozptyl doby dozvuku místnosti po instalaci Helmholtzova rezonátoru	46
Obr. 6.17	Doba dozvuku naměřená po instalaci Helmholtzova rezonátoru. Porovnání s předpokládanou dobou dozvuku dle výpočtu.....	46
Obr. A. 1	Půdorys zvoleného prostoru	52
Obr. A. 2	Rozmístění pozic mikrofonů při měření doby dozvuku v prázdné místnosti.....	53
Obr. A. 3	Rozmístění pozic mikrofonů při měření doby dozvuku po instalaci úprav.....	54
Obr. A. 4	Konstrukce navrženého Helmholtzova rezonátoru – boční stěna.....	55
Obr. A. 5	Rozmístění latí na přední stěně Helmholtzova rezonátoru – stěna vlevo.....	56
Obr. A. 6	Konstrukce navrženého Helmholtzova rezonátoru – zadní stěna.....	57
Obr. A. 7	Rozmístění latí na přední stěně Helmholtzova rezonátoru – levý zadní	58
Obr. B. 1	Položení koberce Rambo 78	60
Obr. B. 2	Uchycení střešních latí	60
Obr. B. 3	Detail uchycení ke zdi.....	60
Obr. B. 4	Detail vrstvení konstrukce	60

Obr. B. 5 Aplikace minerální vaty Knauff MPE Obr. B. 6: Detail aplikace minerální vaty Knauff MPE – pohled z boku	61
Obr. B. 7 Detail zadní konstrukce rezonátoru – pohled zespoda.....	62
Obr. B. 8 Pohled na Všechny konstrukce po aplikaci netkané mulčovací textilie	62
Obr. B. 9 Pohled na hotové rezonátory.....	63
Obr. B. 10 Pohled na rezonátor vlevo.....	63
Obr. B. 11 Pohled na rezonátor vpravo	63
Obr. B. 12 Detail přední plochy rezonátoru.....	63

Seznam tabulek

Tab. 5.1: Rozměry místnosti a plochy materiálů	22
Tab. 5.2: Vypočtená doba dozvuku prázdné místnosti	24
Tab. 5.3: Základní vlastní kmity místnosti	25
Tab. 5.4: Vypočtené vlastní kmity místnosti v pásmu 80-130 Hz.....	26
Tab. 5.5: Použitá zařízení a jejich nastavení.....	26
Tab. 5.6: Hodnoty naměřené doby dozvuku.....	29
Tab. 6.1: Rozdílová funkce naměřené doby dozvuku a horní limity doby dozvuku doporučené normou	31
Tab. 6.2: Výčet parametrů navržených konstrukcí rezonátoru	36
Tab. 6.3: Hodnoty předpokládané doby dozvuku po instalaci navrženého Helmholtzova laťového rezonátoru	37
Tab. 6.4: Rozdílová funkce předpokládané doby dozvuku po instalaci Helmholtzova rezonátoru a horní limity doby dozvuku doporučené normou.....	38
Tab. 6.5: Výčet ploch použitých akustických prvků	40
Tab. 6.6: Předpokládaná doba dozvuku po aplikaci všech úprav	40
Tab. 6.7: Hodnoty naměřené doby dozvuku po instalaci Helmholtzova rezonátoru.....	47

Seznam symbolů a zkratek

T_E	Eyringův vzorec pro dobu dozvuku
T_S	Sabineův vzorec pro dobu dozvuku
α	Činitel zvukové pohltivosti
α_S	Činitel zvukové pohltivosti – všesměrový dopad
α_N	Činitel zvukové pohltivosti – kolmý dopad
c_0	Rychlost šíření zvuku ve vzduchu
f_k	Kritická frekvence prostoru
f_r	Rezonanční frekvence
f_m	Mezní frekvence účinnosti porézního materiálu
T_{20}	Doba dozvuku měřením poklesu o 20 dB
T_{30}	Doba dozvuku měřením poklesu o 30 dB
λ	Vlnová délka

1 Úvod

Ve většině místností, které jsou využívány pro poslech hudby, se akustické úpravy řeší sporadicky. Od obývacích pokojů až po amatérská hudební studia. Kvalitní reprosoustava je nepopíratelně velmi důležitá. Pokud je požadován kvalitní přednes hudby, bez adekvátní reprosoustavy se nelze obejít. Avšak důraz je ve velké většině případů kladen pouze na reproduktory. Právě akustická kvalita prostoru je velmi důležitá vlastnost, kterou pro dosažení kvalitního přednesu hudby nelze zanedbat. V dnešní době se už i v běžných hudebninách nebo elektronických obchodech objevuje sortiment akustických prvků, ale bez základních znalostí prostorové akustiky se obejít nelze. Velmi také záleží na rozmístění reproduktorů v prostoru.

Akustické úpravy by měly být prvním krokem v návrhu poslechové místnosti. To, co naše ucho při poslechu vnímá, je tvořeno nejen z přímé vlny z reproduktorů, ale z velké části i z odražených vln od zdí, nábytku, podlahy a všeho, co se v místnosti nachází. Každý prostor je akustickými parametry unikátní, a tedy přednes stejné reprodukční soustavy v různých místnostech bude vždy rozdílný. Pohltivost všech materiálů je frekvenčně závislá. Některé materiály mohou zatlumit určitá frekvenční pásma, a tím vzniká nerovnoměrnost akustického pole. Při nedostatku ploch pohltivých materiálů vzniká v místnosti vysoká doba dozvuku, a tím klesá nejen srozumitelnost, ale i kvalita poslechu. Měl by také být kladen důraz na rovnoměrné rozložení akustického pole v blízkosti určeného poslechového místa.

Předložená práce se zabývá analýzou stávajícího stavu vybraného prostoru a návrhem akustických úprav pro využití prostoru jako poslechové místnosti. Práce se dělí na tři části. První část se věnuje základním pojmům z prostorové akustiky, způsobům měření potřebných akustických parametrů prostor. Jsou zde popsány akustické prvky pro úpravu doby dozvuku místnosti. V druhé části jsou zanalyzovány a spočítány klíčové vlastnosti prostor, které ovlivňují dobu dozvuku a vlastní frekvence místnosti. Následně jsou parametry naměřeny a porovnány s teoretickými výpočty. Je zhotoven návrh absorpčního panelu pro nízké frekvence s ohledem na rozměry, požadovanou akustickou pohltivost a náročnost konstrukce. Na základě návrhu úprav pro nízké frekvence jsou navrženy úpravy pro zbytek frekvenčního spektra tak, aby byla docílena požadovaná doba dozvuku poslechové místnosti. Třetí část zahrnuje realizaci a detailní popis konstrukce zvoleného návrhu úprav pro nízké frekvence. Zrealizovaná

konstrukce je naměřena z hlediska doby dozvuku a výsledky jsou porovnány s teoretickými předpoklady.

2 Úvod do prostorové akustiky

V této úvodní kapitole jsou shrnuty základní důležité pojmy prostorové akustiky, které jsou esenciální pro analýzu a následný návrh poslechové místnosti. Informace v této kapitole čerpány především z [2].

2.1 Doba dozvuku

Při charakterizování akustických vlastností uzavřeného prostoru je doba dozvuku velmi důležitým parametrem. Nejpřesněji lze získat měřením, ale lze ji také za předpokladu znalosti ploch stěn a ostatních použitých ploch v místnosti předpovědět výpočtem. Podle doporučení normy ČSN 73 0525 [5] je vhodné pro výpočet doby dozvuku využívat Eyringův vzorec (2.1)

$$T_E = \frac{0,164 V}{-S \ln(1 - \alpha_S) + 4 m V} \quad [s] \quad (2.1)$$

kde:

T_E – doba dozvuku [s]

V – objem místnosti [m^3]

S – celková plocha stěn [m^2]

α_S – střední činitel pohltivosti

m – činitel útlumu ve vzduchu [m^{-1}], který se uplatní u velkých prostor a nad 2000 Hz

U prostorů, které jsou méně tlumené, a tedy mají předpokládanou větší dobu dozvuku, lze použít Sabineův vzorec (2.2).

$$T_s = \frac{0,164 V}{\frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + 4 m V} \quad [s] \quad (2.2)$$

kde:

T_s – doba dozvuku [s]

V – objem místnosti [m^3]

α_i – střední činitel pohltivosti jednotlivého materiálu

S_i – plocha jednotlivého materiálu [m^2]

m – činitel útlumu ve vzduchu [m^{-1}]

Pro výpočet průměrné hodnoty doby dozvuku se dle normy ITU-R BS.1116-3 [10] využívá vztah (2.3), který je následně důležitý pro určení kritické frekvence místnosti v kapitole 2.3 a k určení tolerančních limitů pro dobu dozvuku místnosti dle normy na obr. 2.2.

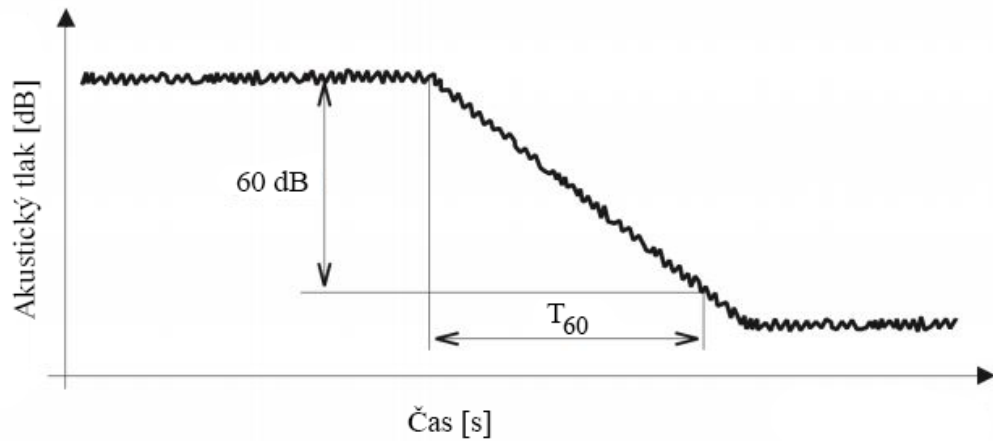
$$T_s = 0,25 \sqrt[3]{\frac{V}{V_0}} \quad [s] \quad (2.3)$$

kde:

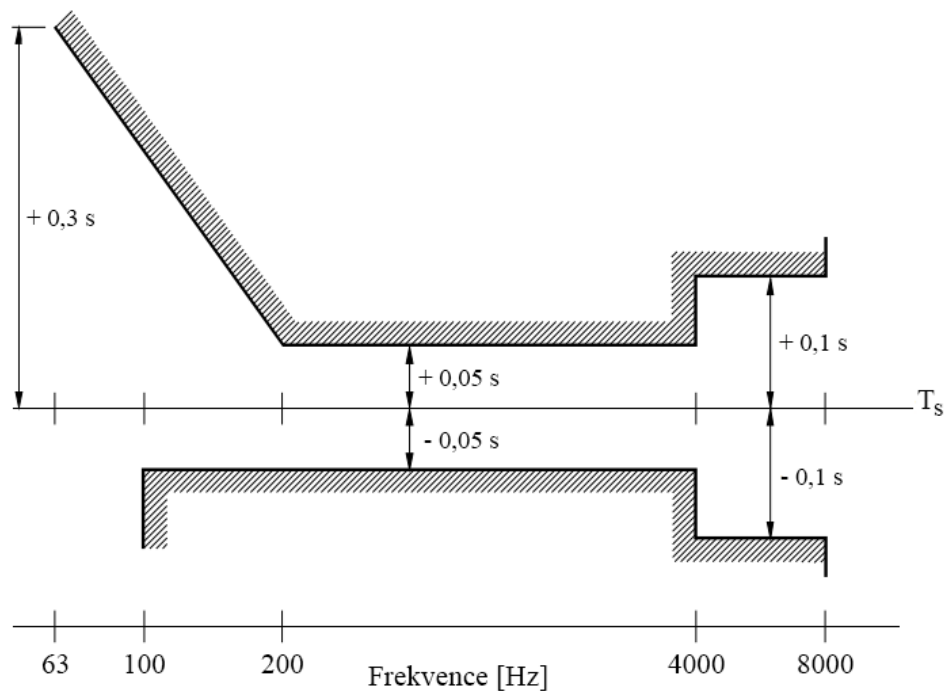
V – objem místnosti [s]

V_0 – referenční objem místnosti o $100 m^3$

Uzavřený prostor, kde se nachází zdroj zvuku, konstantně dodává energii do prostoru. Tato energie je neustále pohlcována stěnami a nastává ustálený režim. Pokud zdroj zvuku skokově zanikne, nastane stav šíření zvuku, který se nazývá dozvuk. Doba dozvuku je časový interval, za který od vypnutí zdroje zvuku poklesne hladina akustické energie o 60 dB. Tento interval se značí T_{60} . Příkladný průběh této situace je znázorněn na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Doba dozvuku – znázorněn pokles o 60 dB, převzato z [9]

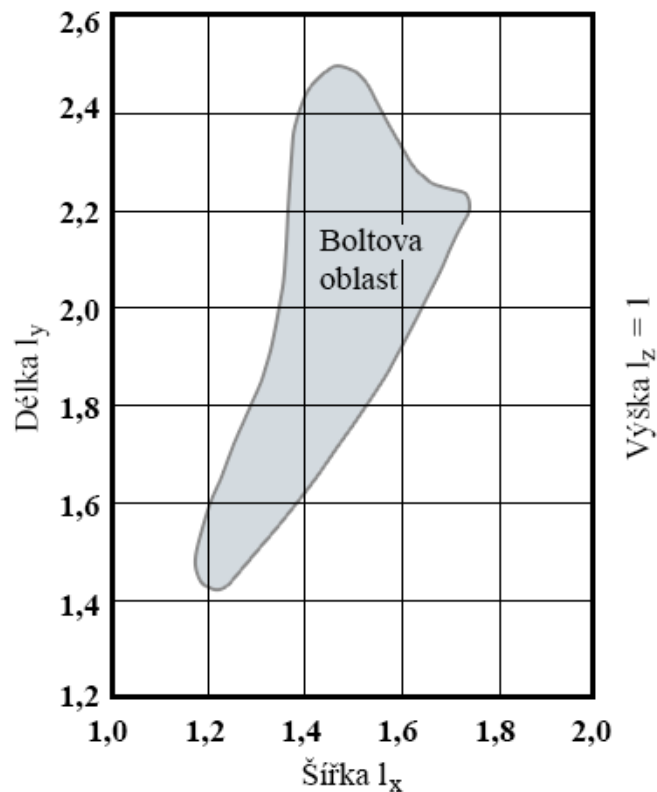


Obr. 2.2: Limity pro doporučenou dobu dozvuku normou ITU-R BS.1116-3, převzato z [10]

2.2 Vliv rozměrů místnosti na akustiku

Výběr místnosti má značný dopad na chování akustického pole v prostoru. Pokud se jedná o místnost obdélníkového tvaru, poměr délek stěn určuje vlastní kmity místnosti. Nelze zcela jistě určit, jaký poměr délek stěn je ideální. Existuje však rozsah poměru stran, který udává

příznivé rozložení vlastních kmitů na nízkých frekvencích. Tato oblast se nazývá „Boltova oblast“ pro ideální poměr stěn místnosti z hlediska rozložení vlastních kmitů. Na obr. 2.3 je zobrazen pohled na místnost shora. Jedná se o poměr délky l_y a šířky l_x ku poměru výšky $l_z = 1$.



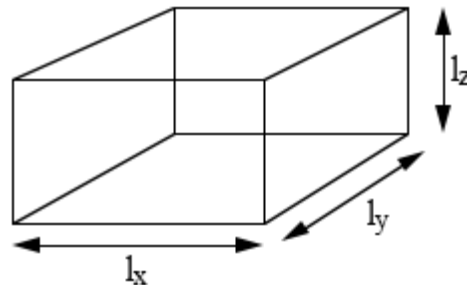
Obr. 2.3: Poměr stěn pro příznivé rozložení vlastních kmitů místnosti

Zároveň je třeba přihlídnout i k celkovému objemu místnosti. Domácí studia nebo poslechové místnosti bývají většinou menších rozměrů. Čím menší rozměr místnosti, tím jsou větší rozestupy vlastních kmitů na nízkých frekvencích, což způsobuje nerovnoměrnost akustického pole. Udává se, že minimální objem místnosti by měl být asi $42,5 \text{ m}^3$. [1]

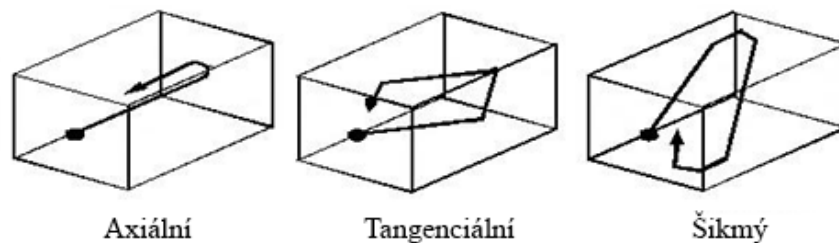
2.3 Vlastní kmity prostoru a kritická frekvence

V závislosti na vzdálenosti od protilehlých stěn v místnosti vznikají vlastní kmity prostoru. U odrazivých stěn může tento jev nastat tak, že se vlnová délka určité frekvence rovná vzájemně vzdálenosti dvou protilehlých stěn. Tím vzniká stojaté vlnění, které má za následek

nerovnoměrné rozložení zvukového pole. U místnosti kvádřového tvaru budou základní vlastní kmity prostoru celkem 3, a to na základě vzdálenosti od sebe protilehlých stěn x , y a z viz obr. 2.4. Existují 3 druhy odrazů v místnosti, viz obr. 2.5.



Obr. 2.4: Kvádřový model místnosti



Obr. 2.5: 3 druhy odrazu zvukové vlny v místnosti

Následující vzorec slouží k výpočtu jednotlivých vlastních kmitů místnosti a jejich násobků.

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [Hz] \quad (2.4)$$

kde:

c_0 – rychlost šíření zvuku ve vzduchu (340 m/s)

n_x, n_y, n_z – celá čísla a jejich kombinace

l_x, l_y, l_z – vzdálenost protilehlých stěn [m]

Například vyplnění vzorce čísly $n_x, n_y, n_z = [1,0,0]$ znamená, že zjistíme základní vlastní kmitočty protilehlých stěn se vzájemnou vzdáleností l_x . Systematickým zadáváním celých čísel n získáme rozložení vlastních kmitů místnosti.

Hustota prvních vlastních kmitočtů je nízká a kmity jsou nerovnoměrně rozloženy, díky tomu je v oblasti nízkých kmitočtů zvukové pole v místnosti velmi nevyrovnané. V místech, kde se vlastní kmity a jejich vyšší harmonické objevují nejvíce, je vhodné instalovat nízkofrekvenční rezonátory naladěné na danou frekvenci s vhodnou absorpční charakteristikou. Podle [2] lze akustické pole uvažovat za difuzní od kmitočtu f_k , který je nazýván kritickým kmitočtem.

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

kde:

T – průměrná doba dozvuku místnosti [s]

V – objem místnosti [m^3]

l_x, l_y, l_z – vzdálenost protilehlých stěn [m]

V oblasti nad kritickou frekvencí lze akustické pole uvažovat jako rovnoměrně rozložené a je možné spolehlivě použít vztahy pro výpočet doby dozvuku.

3 Měření akustických parametrů v uzavřeném prostoru

Měřením akustických parametrů místnosti lze získat důležitý přehled o charakteru akustického pole v prostoru. Měření odhalí problémové oblasti místnosti. Díky tomu je možné poměrně přesně navrhnout akustické úpravy, a tak s dostatečnou přesností odhadnout chování akustického pole po instalaci úprav. Existuje několik druhů a způsobů měření.

3.1 Měření vlastních kmitů prostoru

Pro měření vlastních kmitů je nutné v místnosti vybudit signál, který pokryje celé frekvenční pásmo do kritické frekvence (vztah 2.5), čili širokopásmový signál, což je například bílý šum. Úroveň signálu musí být dostatečně velká, aby vybudila vlastní kmity místnosti a zároveň musí být dostatečně velký odstup signálu od šumu pozadí. Zvolí se několik nerovnoměrně rozmístěných bodů pro měření. Pokud se jedná o poslechovou místnost, kde se předpokládá jedno poslechové místo, je vhodné soustředit měřicí body nejvíce právě v této oblasti. Dále je vhodné umístit některé body v blízkosti zdí a také rohů místnosti, kde je viditelná většina vlastních frekvencí prostoru. V těchto bodech se pak při vybudění zdrojového signálu měří frekvenční charakteristika. Bílý šum obsahuje celé spektrum frekvencí s náhodnou amplitudou, proto je nutné měření průměrovat v čase, a to pro každý bod alespoň 1000 a vícekrát.

3.2 Metody měření doby dozvuku

Dobu dozvuku lze přibližně určit výpočtem. Tomu je věnována kapitola 5.3. Základem pro výpočet doby dozvuku uzavřeného prostoru je znalost zvukové pohltivosti a velikosti dílčích ploch prostoru. Zvukovou pohltivost běžně používaných materiálů je možné dohledat v [2]. Parametry se však pravděpodobně budou od reálného stavu měřené místnosti lišit. Nejlepší způsob, jak získat reálnou dobu dozvuku místnosti, je samotným měřením. Přesné postupy měření lze nalézt v normě ČSN EN ISO 3382-1 [3], která popisuje dvě metody měření doby dozvuku.

3.2.1 Metoda integrované impulzní odezvy

Pro měření je nutné vybudit dostatečně silný impulz, který obsahuje celé frekvenční spektrum. Ideální impulz je nekonečně krátký s nekonečně velkou energií, což v praxi nelze reprezentovat. Používá se například výstřel z ruční pistole se slepými náboji, prasknutí balónku, nebo jiný podobný impulzní zvuk. Průběh impulzu je zaznamenáván všesměrovým mikrofonom, jenž je připojen do záznamového zařízení, které impulzní odezvu zpracovává. Za předpokladu měření poslechové místnosti, která má danou oblast poslechu, je vhodné rozmístit několik měřících bodů v této oblasti a v jejím blízkém okolí. Doporučuje se pro každý bod 3 až 5 krát měření opakovat a poté průměrovat. Následné zprůměrování bodů ze všech měřených pozic udá výsledné hodnoty doby dozvuku. [3]

3.2.2 Metoda přerušovaného šumu

Dalším normami popsaným způsobem měření doby dozvuku je metoda přerušovaného šumu. Oproti měření impulzní odezvou, kde se budí uzavřený prostor jedním rázem, se prostor vybudí stálým širokopásmovým náhodným nebo pseudonáhodným šumem. Budí se tak dlouho, aby se zvukové pole v prostoru ustálilo a vybudily se všechny vlastní frekvence. Po vypnutí zdroje se zaznamenávají poklesové křivky. K vybudení se používá všesměrový zdroj zvuku (obr 3.1).



Obr. 3.1: Všesměrový zdroj zvuku, převzato z [4]

Všesměrový mikrofon se umísťuje na několika bodech v místnosti, aby se eliminovalo nerovnoměrné rozložení akustického pole. Jelikož zdrojem zvuku je náhodný šum, je nutné měření v každém bodě několikrát opakovat a následně zprůměrovat. Signál by měl být nabuzený po dostatečně dlouhou dobu, aby se akustické pole místnosti ustálilo. Minimálně však alespoň po dobu poloviny předpokládané doby dozvuku místnosti. Pro měření doby dozvuku T_{30} , což je pokles o 30 dB, je nutné vybudit signál tak, aby byl odstup signálu od šumu okolí minimálně 45 dB. Rozmístění mikrofonů by dle normy mělo být po celé místnosti. Musí však být umístěny minimálně 1 m od zdi a ideálně od všech odrazivých překážek. Vzájemná vzdálenost mezi mikrofony by neměla být menší než 2 m. Umístění zdroje zvuku by mělo být uvažováno hlavně tam, kde se v provozu zdroj zvuku očekává. Pokud se předpokládá symetrické rozmístění poslechového prostoru a poslechové místo v ose symetrie, postačí provést měření pouze na pozici jednoho ze dvou reproduktorů.

Oproti impulzní metodě buzení má tato metoda nevýhodu v tom, že je nutné opatřit zdroj zvuku, který bude dostačující pro vybudění potřebného akustického tlaku nad okolním šumem. [2][3][4]

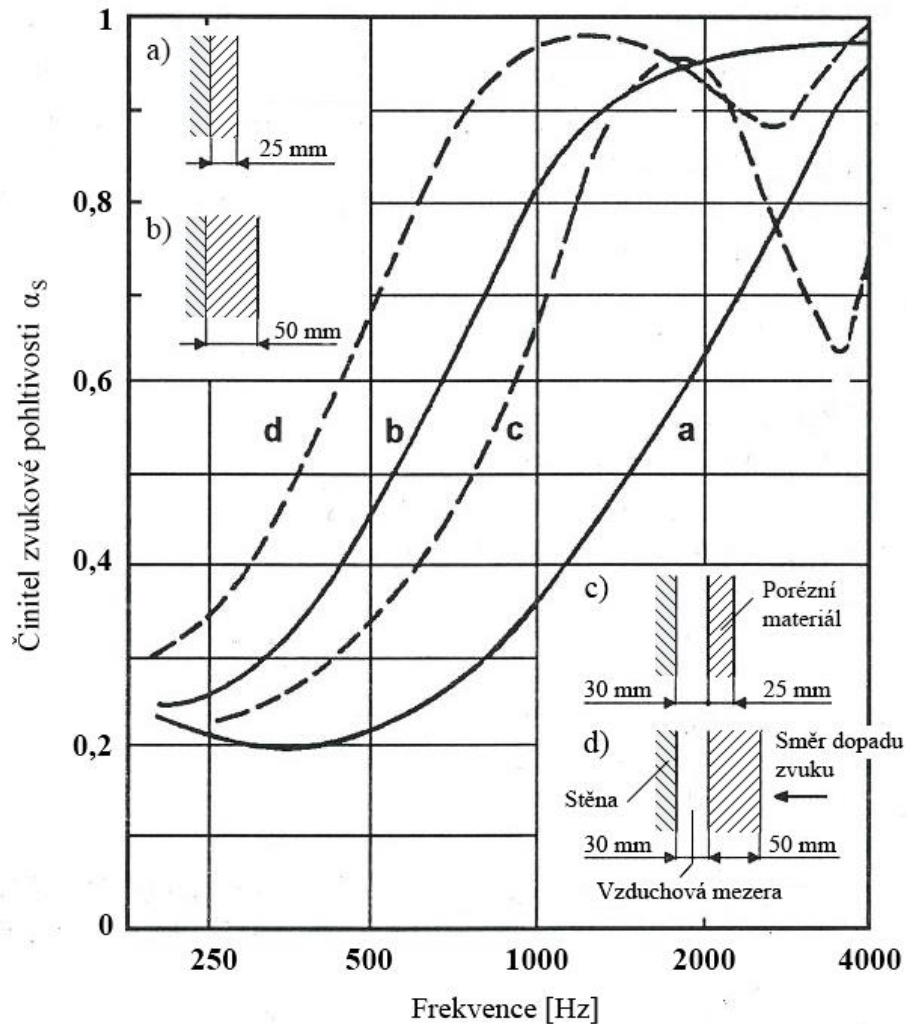
4 Materiály a konstrukce používané pro akustické úpravy

Existují různé typy materiálů a konstrukcí, které slouží k úpravě doby dozvuku prostoru, a to buď pohlcováním nebo rozptylováním zvuku. Při výběru materiálu je brán ohled nejen na jeho akustické parametry, ale i na požární, hygienickou a estetickou stránku materiálu. Vlastnosti materiálů jsou vyjadřovány činitelem zvukové pohltivosti α , který je frekvenčně závislý. Činitel zvukové pohltivosti se dále rozlišuje dle kolmého dopadu zvukových vln α_N , který se měří v impedanční trubici. Pro všesměrový dopad zvuku se určuje α_S , který lze naměřit v dozvukové komoře. Činitel zvukové pohltivosti nabývá hodnot 0 až 1, kdy 0 označuje zcela odrazivý materiál, 1 naopak zcela pohltivý.

Akustické materiály a konstrukce se rozdělují na pohltivé a rozptylové prvky. Vlastnosti jednotlivých prvků jsou popsány v dalších podkapitolách. [2]

4.1 Porézní a vláknité materiály

Akustická energie je pohlcována v porézních materiálech přeměnou na tepelnou energii třením. K přeměně dochází při přechodu částic mezi póry materiálu, které jsou navzájem propojeny. Činitel pohltivosti je závislý na materiálu a jeho tloušťce. V běžných tloušťkách tlumí porézní materiály střední a vysoké kmitočty, mezní kmitočet je možné určit dle vztahu 4.1. Při použití stejné tloušťky materiálu je možné rozšířit pásmo tlumení k nízkým frekvencím odsazením od stěny o vzduchovou mezeru. Nejvyšší účinnost pro danou frekvenci je ve vzdálenosti $\lambda/4$. [2]



Obr. 4.1: Frekvenční průběh činitele zvukové pohltivosti, převzato s úpravami z [2]

Tyto hodnoty jsou těžko odhadnutelné a lze je určit přesně pouze měřením. Porézní materiály jsou například výrobky ze skelných a minerálních vláken, různé textilie a stříkaná vlákna. Vrstva porézního materiálu se považuje za dobře účinnou od hodnoty činitele pohltivosti $\alpha > 0,6$. Takovou účinnost je možné u materiálu nacházejícího se na pevné stěně očekávat až od kmitočtu f_m :

$$f_m = \frac{1}{10} \frac{c}{h} = \frac{34,3}{h} \quad [\text{Hz}] \quad (4.1)$$

kde:

c – rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s]

h – tloušťka vrstvy materiálu [m]

4.2 Kmitající panely a membrány

Konstrukce kmitajících panelů je složena z tuhé, pružně uchycené desky na uzavřeném rámu, který je připevněn ke zdi a udává vzdálenost d mezi panelem a zdí. Mezi deskou a zdí se nachází zvukový polštář, který je nejčastěji tlumen porézním materiálem. Kmitající deska může být například ze dřeva, dřevotřísky, nebo sádry. Tyto konstrukce se efektivně využívají na frekvencích od 50 do 300 Hz. Hodnota maximálního možného pohlcování se nachází na rezonanční frekvenci f_r :

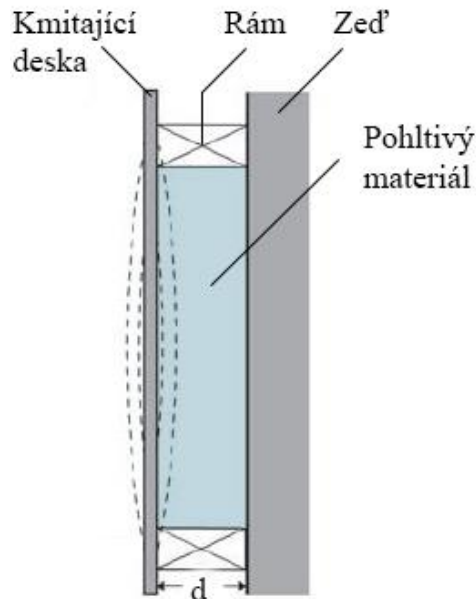
$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad [Hz] \quad (4.2)$$

kde:

m' – plošná hmotnost desky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$]

d – tloušťka vrstvy materiálu [m]

Membrány se odlišují od panelů tím, že kmitající materiál není pevná deska, ale fólie, textilie nebo velmi tenká deska s nízkou tuhostí v ohybu. Resonanční kmitočet je, tak jako u kmitajících panelů, dán vztahem (4.2). Díky vlastní poddajnosti membrány se mohou objevit vyšší rezonanční frekvence. Účinnost membrán lze výrazně ovlivnit porézním materiálem ve vzduchovém polštáři. V porovnání s kmitajícími panely je účinnost v širším frekvenčním pásmu větší. Řez membránou je na obr. 4.2. [1][2]

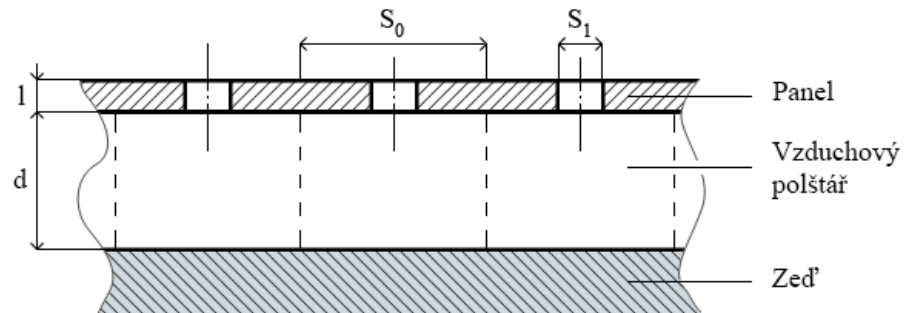


Obr. 4.2: Řez membránou, převzato s úpravami z [6]

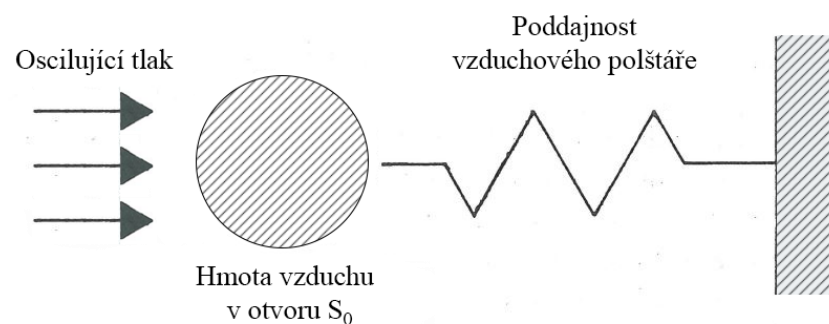
4.3 Helmholtzův rezonátor

Jedná se o rezonanční prvky, které fyzikálním principem odpovídají kmitání tělesa na pružině, kdy tělesem je objem vzduchu v otvoru a pružinou je poddajnost vzduchu v objemu za otvorem. Dopadající zvuková vlna na rezonanční soustavu vyvolává vynucené kmitání soustavy. Při rezonanci je v soustavě nahromaděno maximální množství akustické energie, jelikož v rezonanci je amplituda kmitů maximální. Aby rezonanční soustava účinně pohlcovala zvuk, musí být patřičně tlumena, aby bylo co největší množství akustické energie přeměněno na teplo. Rezonátory jsou obvykle tvořeny z různě děrovaných desek uchycených na uzavřeném rámu. Vzduchový polštář je obvykle vyplněn pohltivým materiálem, nebo kombinací vrstvy pohltivého materiálu a určitého objemu vzduchu. Kombinací kmitání vzduchu v otvorech desky a přeměnou akustické energie na teplo se dosahuje výsledného pohltivého účinku. [2]

Tento typ rezonátoru je široce užíván k dosažení adekvátní pohltivosti na nízkých frekvencích. Schématický řez a mechanická analogie funkce rezonátoru jsou na obr. 4.3 a 4.4.



Obr. 4.3: Řez Helmholtzovým rezonátorem, inspirováno v [2]



Obr. 4.4: Mechanická analogie funkce Helmholtzova rezonátoru, převzato s úpravami z [2]

Frekvenční charakteristiku činitele pohltivosti lze ovlivnit plochou a tvarem otvorů, objemem vzduchového polštáře, použitím pohltivého materiálu ve vzduchovém polštáři a tloušťkou přední desky, popřípadě latí. Rezonanční frekvenci Helmholtzova rezonátoru lze určit dle vztahu (4.3).

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{S_1 d (l + 2\Delta l)}} \quad [Hz] \quad (4.3)$$

kde:

c – rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s]

S_0 – plocha jednoho otvoru [m²]

S_1 – průřez dutiny rezonátoru pro jeden otvor [m²]

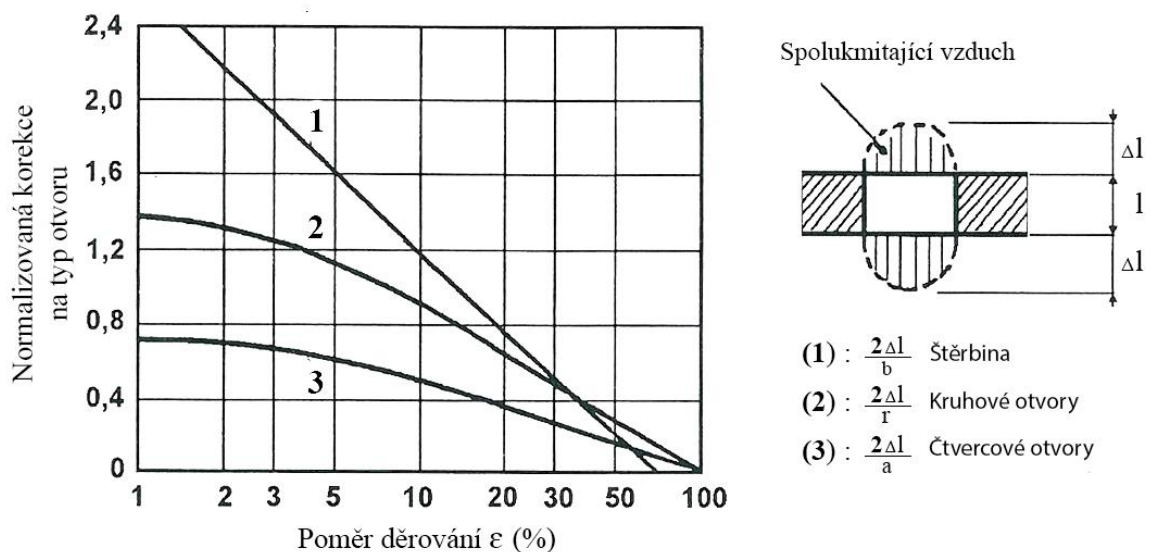
d – hloubka vzduchového polštáře [m]

l – hloubka vzduchového polštáře [m]

$2\Delta l$ – koncová korekce [m]

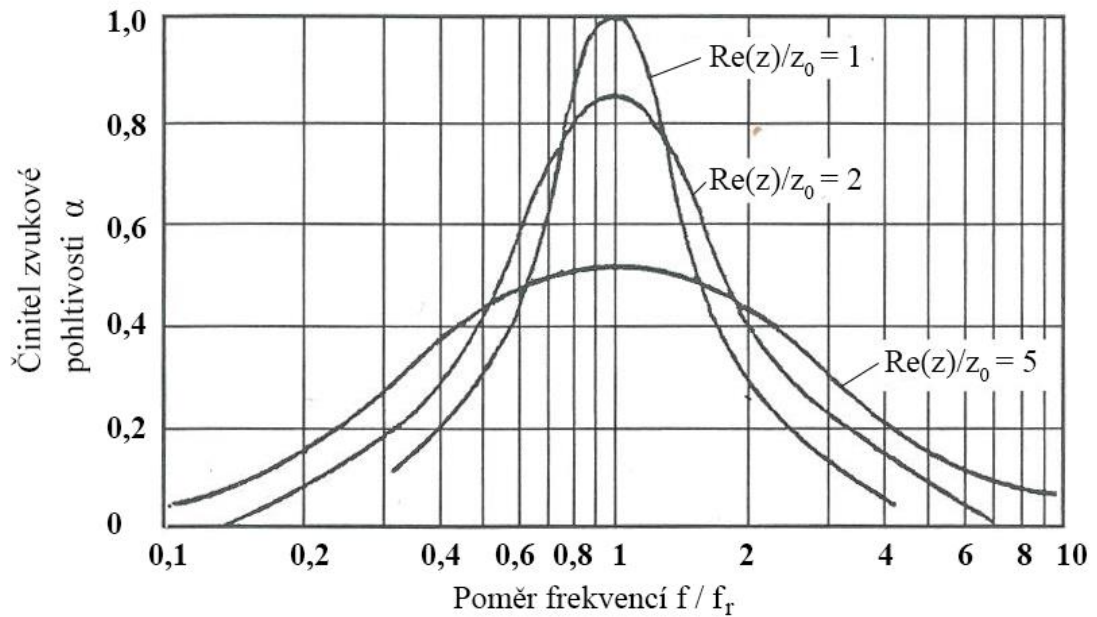
Ve výpočtu je zahrnuta i tzv. korekce délky otvoru $2\Delta l$, jelikož vzduch nekmitá jen v otvoru určitého tvaru, ale i v určité vzdálenosti před ním a za ním. Z grafu na obr. 4.5 je uvedena závislost korekce délky otvoru na hustotě děrování desky ε , která vychází ze vztahu (4.4). Tato korekce je vynesena pro 3 druhy děrování desky – štěrbinové, kruhové a čtvercové.

$$\varepsilon = \frac{S_0}{S_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.4)$$



Obr. 4.5: Korekce délky otvoru $2\Delta l$ pro různé druhy otvorů vztahující se na šířku štěrbin (1), poloměr otvoru (2) a stranu čtverce (3), převzato s úpravami z [2]

Výsledná frekvenční charakteristika činitele pohltivosti velmi závisí na množství, poloze a způsobu vylumení vzduchového polštáře. Materiál s větší objemovou hmotností zapříčiní širší pásmo pohltivosti za cenu nižších hodnot činitele pohltivosti v bodě rezonance soustavy. Materiál s menší objemovou hmotností pak zase zúží šířku pásma pohltivosti, ale zvýší pohltivý účinek v bodě rezonance, což je dobře vidět na obr. 4.6. Je proto třeba dbát na požadavky účinku rezonanční soustavy a dle toho navrhnout adekvátní vylumení soustavy. U tlumícího materiálu je důležitý parametr reálné části měrné akustické impedance Re_z , která vyjadřuje poměr akustického tlaku k akustické rychlosti na povrchu materiálu. Na obr. 4.6 je vynesena závislost činitele pohltivosti na poměru Re_z k vlnovému odporu vzduchu $z_0 = \rho \cdot c$, kde ρ je měrná hustota vzduchu a c rychlost šíření zvuku.

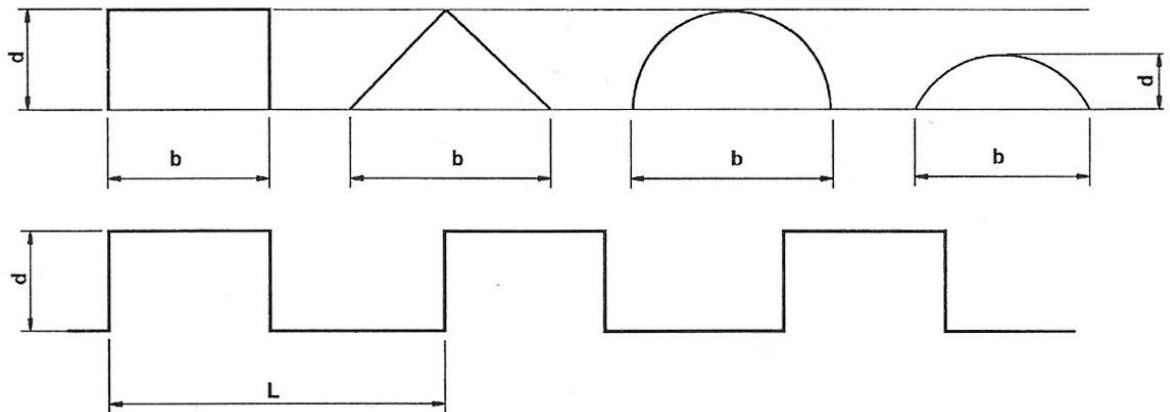


Obr. 4.6: Závislost činitele zvukové pohltivosti Helmholtzova rezonátoru na poměru Re_z/z_0 , převzato z [2]

Rezonátory se dají pohodlně naladit až do 2 kHz. Pokud se jedná o nízké frekvence pod 200 Hz, používá se často pouze jeden otvor v přední desce, nebo dlouhá štěrbin, případně více štěrbin ve větší vzdálenosti od sebe a velký objem dutiny vzduchového polštáře. [1][2][6]

4.4 Rozptylové prvky

Celkovou akustickou kvalitu uzavřených prostor lze vylepšit vhodnou distribucí odraženého zvuku z prostorového i časového hlediska. Uzavřené prostory je tedy třeba nejen vylumit, ale také v nich vhodně rozptýlovat zvuk, což má příznivý efekt na dojem z poslechu. Prvkům rozptylujícím zvukovou vlnu se říká difuzory, což je odvozeno z anglického názvu diffusion. U těchto prvků je důležitý jejich reliéfní tvar. Mohou to být např. jehly, vypouklé nebo různě lomené plochy. Dobrá účinnost rozptylového prvku je dána jeho rozměry ve vztahu k délce dopadajících zvukových vln. Z obecného hlediska dochází k rozptylu tehdy, kdy výška reliéfu prvku rozměrově odpovídá, nebo je větší než délka dopadající vlny. Požadovaného rozptylného účinku se dosáhne periodickým uspořádáním prvků, nebo jejich prostřídáním a různými kombinacemi. Základní používané tvary prvků s výškou d a šířkou b o periodě struktury L jsou zobrazeny na obr. 4.7.



Obr. 4.7: Používané periodické struktury rozptylující zvuk, převzato [2]

Rovinná zvuková vlna dopadající na periodickou strukturu rozptýlí zvuk po odrazu pro určité frekvence do více směrů. Nejvyšší účinnost rozptylu je dána následujícími podmínkami, kde λ je délka dopadající zvukové vlny: $d = \lambda/4$; $d \approx L/4$ až $L/5$; $d \leq b \leq L$.

Již dlouhou dobu se nejefektivněji používají složitější difuzní prvky, jako například RPG difuzory, 2D QRD a další typy. Tyto dva typy difuzorů jsou k vidění na obr. 4.8 a 4.9. [2]



Obr. 4.8: RPG Difuzor, převzato z [7]



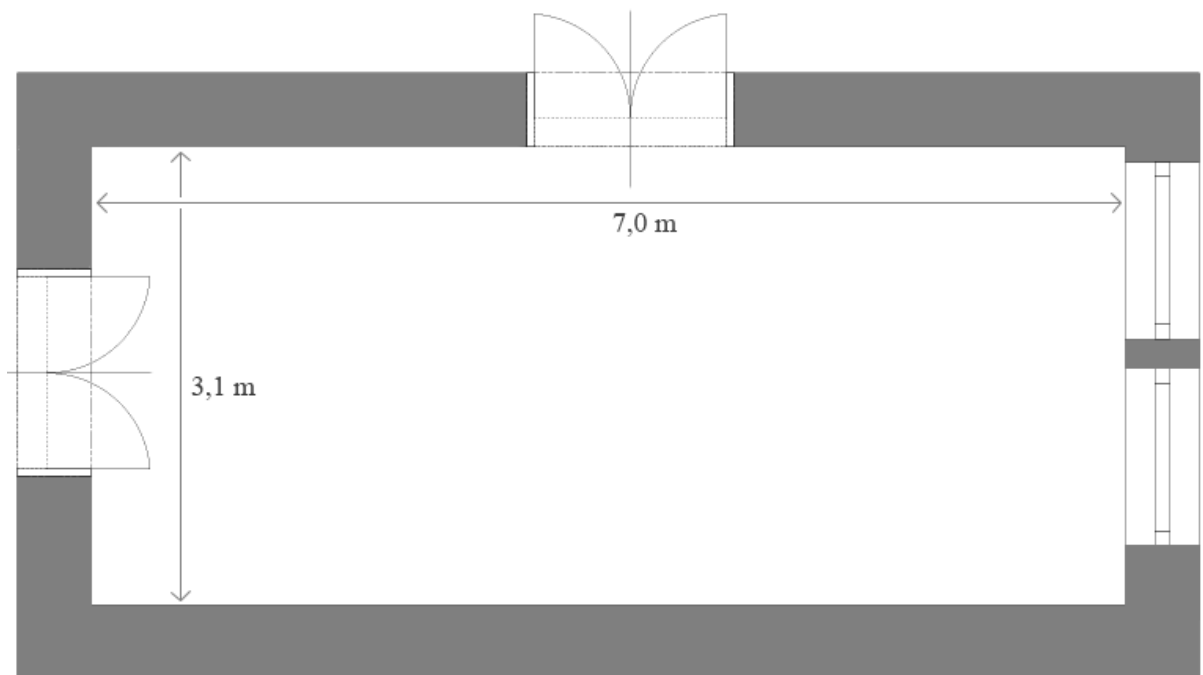
Obr. 4.9: 2D QRD difuzor využívající principu difrakční mřížky, převzato z [8]

5 Analýza prostoru

Tato kapitola se zabývá seznámením se s prostorem, který byl vybrán pro akustické úpravy místnosti tak, aby odpovídal svými parametry poslechové místnosti dle normy ITU-R BS.1116-3 [10].

5.1 Zvolený prostor

Zvolený prostor, který bude sloužit jako poslechová místnost, se nachází ve starém městském bytě ve třetím patře. Jedná se o místnost obdélníkového tvaru. Půdorys prostoru je na obr. 5.1, v tab. 5.1 jsou rozměry místnosti a výpis ploch materiálů ve stavu kompletně prázdné místnosti přesně tak, jak bude prováděno měření. Náhled místnosti ze strany vstupních dveří je na obr. 5.2.



Obr. 5.1: Půdorys zvolené místnosti

Materiál	Plocha [m ²]	Délka	7,0 m
Zed'	79,1	Šířka	3,1 m
Okno	7,3	Výška	3,3 m
Podlaha	21,3	Objem	71,6 m ³
Dveře	4,0		
Celková plocha	111,7		

Tab. 5.1: Rozměry místnosti a plochy materiálů



Pohled na poslechové místo



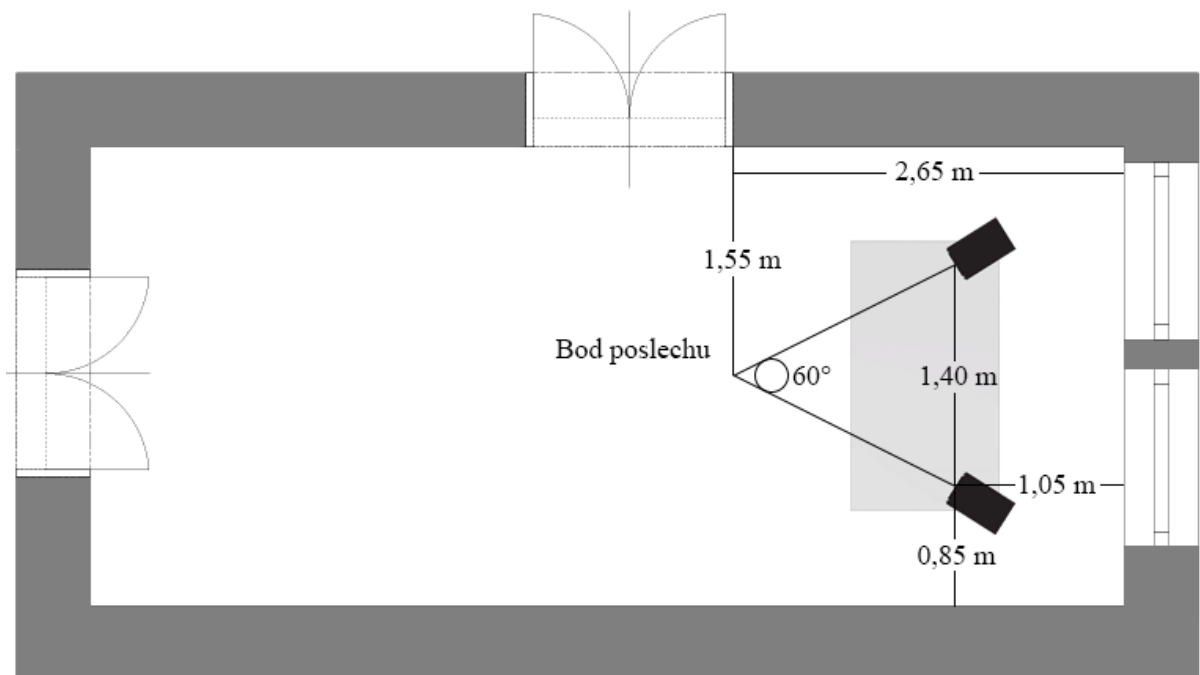
Pohled od oken ke dveřím

Obr. 5.2: Náhled místnosti od dveří směrem k oknům

5.2 Poslechové místo

Vzhledem k tvaru místnosti a pozici dveří dává pro umístění poslechového místa smysl pouze jedna část místnosti, a to konkrétně část místnosti za dveřmi u oken, viz obr. 5.3. Zachová se tak pohodlná průchodnost mezi dveřmi. Z hlediska dostatku prostoru lze v daném bodě poslechu s přehledem dodržet doporučené umístění reproduktorů dvoukanálového systému, kde posluchač sedí na spojnici směru vyzařování obou reproduktorů tvořící rovnostranný

trojúhelník. Akustické úpravy se budou navrhovat tak, aby doba dozvuku v tomto poslechovém místě a jeho nejbližším okolí vyhovovala mezním hodnotám dle normy ITU-R BS.1116-3 [10].



Obr. 5.3: Umístění poslechového místa

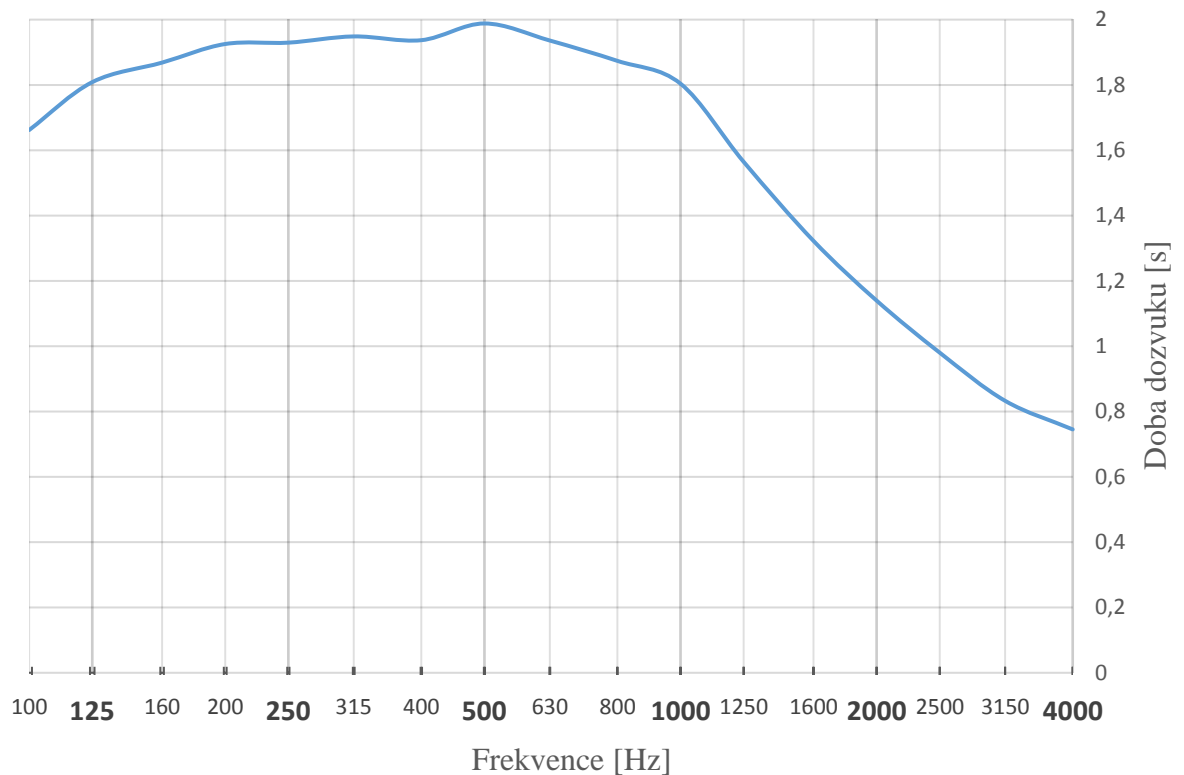
5.3 Výpočet doby dozvuku

Dobu dozvuku uzavřeného prostoru je možné obecně spočítat dle vztahu v kapitole 2.1. To však za předpokladu znalosti přesných hodnot závislosti pohltivosti jednotlivých materiálů na frekvenci. Vzhledem k tomu, že zvolený prostor je starý několik desetiletí, nelze s určitostí popsat materiálové složení zdí i podlahy. Je velmi pravděpodobné, že výsledek tohoto výpočtu se nebude shodovat s reálnou dobou dozvuku místnosti. Ověření výpočtu měřením doby dozvuku dle doporučených metod normou je tedy v tomto případě nezbytné.

Plochy materiálů jsou vypsány v tab. 5.1. Frekvenční závislost činitele pohltivosti jednotlivých materiálů je převzata z [2]. Koeficienty činitele pohltivosti jsou v tab. 5.2. Pro výpočet byl využit Sabineův vztah (2.2). Výsledek vypočtené doby dozvuku ve třetinách oktávy je zobrazen číselně v tab. 5.2 a graficky na obr. 5.4.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T_s [s]	1,66	1,81	1,87	1,93	1,93	1,95	1,94	1,99	1,94
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T_s [s]	1,87	1,80	1,56	1,32	1,14	0,98	0,83	0,75	

Tab. 5.2: Vypočtená doba dozvuku prázdné místnosti



Obr. 5.4: Závislost vypočtené doby dozvuku prázdné místnosti na frekvenci

5.4 Výpočet vlastních kmitů

K porozumění šíření akustické energie uzavřeným prostorem a určení problematických míst je nutné vypočítat vlastní kmity místnosti. Základní teorie je rozepsána v kapitole 2.3. K efektivnímu výpočtu vlastních kmitů místnosti, které bude mít smysl ztlumit, je vhodné si spočítat kritickou frekvenci (vztah 2.4) pro normou doporučenou průměrnou dobu dozvuku místnosti (vztah 2.3).

$$T_s = 0,25 \sqrt[3]{\frac{V}{V_0}} = 0,25 \sqrt[3]{\frac{71,61}{100}} = 0,23 \text{ s}$$

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T_m}{V}} = 2000 \sqrt{\frac{0,225}{71,61}} = 112 \text{ Hz}$$

Z grafu na obr. 2.2 je možné dopočítat limity doby dozvuku doporučené normou. Základní kmity místnosti jsou vypočteny v tabulce tab. 5.3. V prostoru se dále objevují jejich násobky a různé kombinace.

N	n_x	n_y	n_z	f_n [Hz]
1	1	0	0	24,3
2	0	1	0	54,8
3	0	0	1	51,5

Tab. 5.3: Základní vlastní kmity místnosti

Příklad výpočtu:

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} = \frac{340}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{7}\right)^2 + 0 + 0} = 24,3 \text{ Hz}$$

V tab. 5.4 jsou vypočtené vlastní kmity v pásmu 80-130 Hz. Zaměření se na tuto oblast frekvenčního pásma je zdůvodněno v kapitole 6.1.

N	n_x	n_y	n_z	f_n [Hz]
12	3	0	1	89,2
13	2	1	1	89,6
14	3	1	0	91,2
15	4	0	0	97,1
16	0	0	2	103,0
17	3	1	1	104,7
18	1	0	2	105,9
19	0	2	0	109,7
20	4	0	1	110,0
21	4	1	0	111,6
22	1	2	0	112,3
23	2	0	2	113,9
24	0	1	2	116,7
25	1	1	2	119,2
26	2	2	0	120,0
27	0	2	1	121,2
28	5	0	0	121,4
29	4	1	1	122,9
30	1	2	1	123,6
31	3	0	2	126,2
32	2	1	2	126,4

Tab. 5.4: Vypočtené vlastní kmity místnosti v pásmu 80-130 Hz

5.5 Měření doby dozvuku

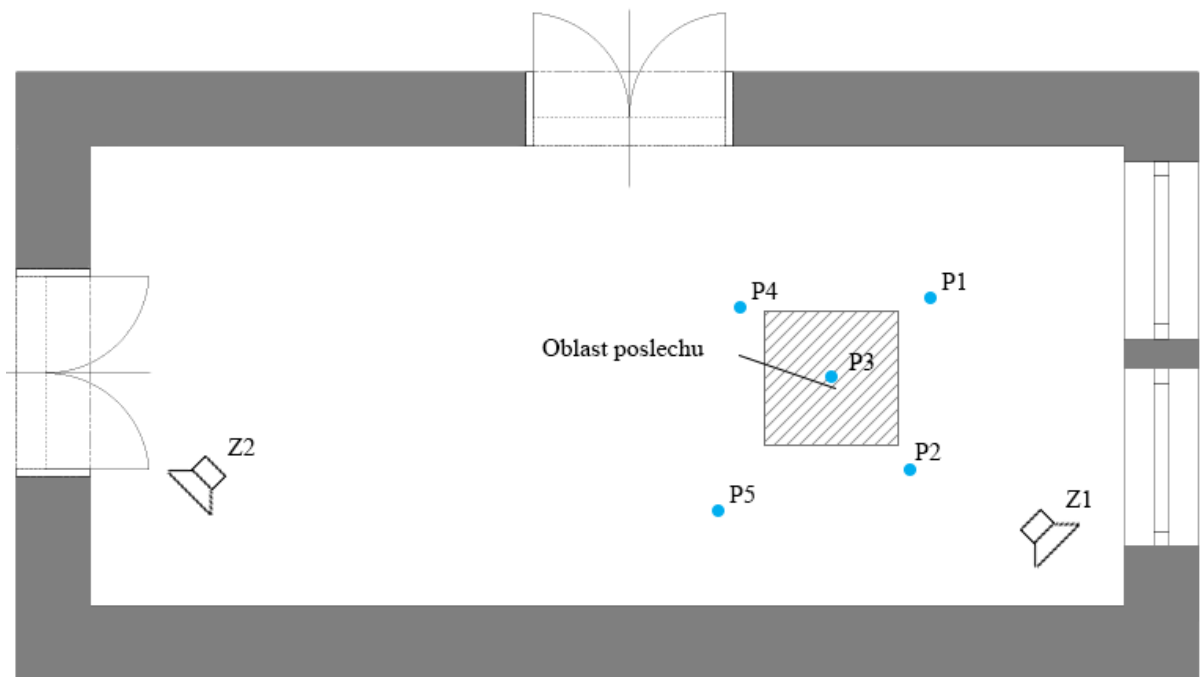
Zásady a postup, podle kterých bylo měření provedeno, jsou uvedeny v kapitole 3.2. Z praktických důvodů byla pro měření doby dozvuku zvolena metoda integrované impulzní odezvy, při které není potřeba výkonného zdroje dodávajícího stálý akustický tlak. Místnost při měření byla prázdná viz obr. 5.1. Měření bylo provedeno pomocí zařízení vypsanych v tab. 5.5. Měřena byla doba T_{20} ve třetinách oktávy v rozsahu 100 až 4000 Hz.

Měřicí zařízení	XL2, SNo. A2A-03090-D1, FW4.04
Typ mikrofону	NTi Audio M2210, SNo. 1364
Sensitivita mikrofону	23,1 mV/Pa
Rozlišení	1/3 Oktávy
Rozsah	30 - 130 dB

Tab. 5.5: Použitá zařízení a jejich nastavení

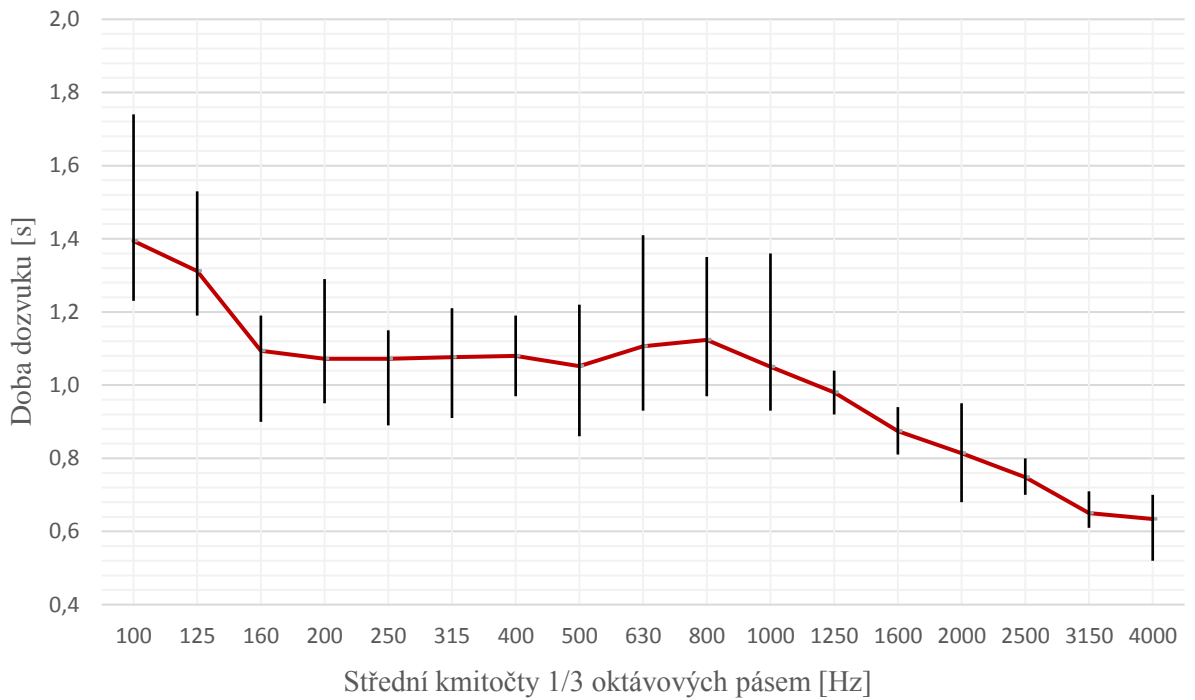
Zvukový impulz byl vyvoláván vzájemným úderem dvou dřevěných hranolů. Bylo měřeno celkem na 5 pozicích mikrofону, pro 2 místa zdroje zvuku. Každé měření bylo 3 až 5 krát

zopakováno a následně průměrováno. Vzhledem k tomu, že se předpokládá poslechový bod na jednom místě a jeho blízkém okolí, pozice mikrofonů se nejvíce pohybují právě v této oblasti. Všechny pozice mikrofonu byly ve výšce 120 cm. Rozmístění mikrofonů a zdrojů zvuku je na obr. 5.5. Rozmístění včetně zakótování vzdáleností viz obr. A.2 v příloze.

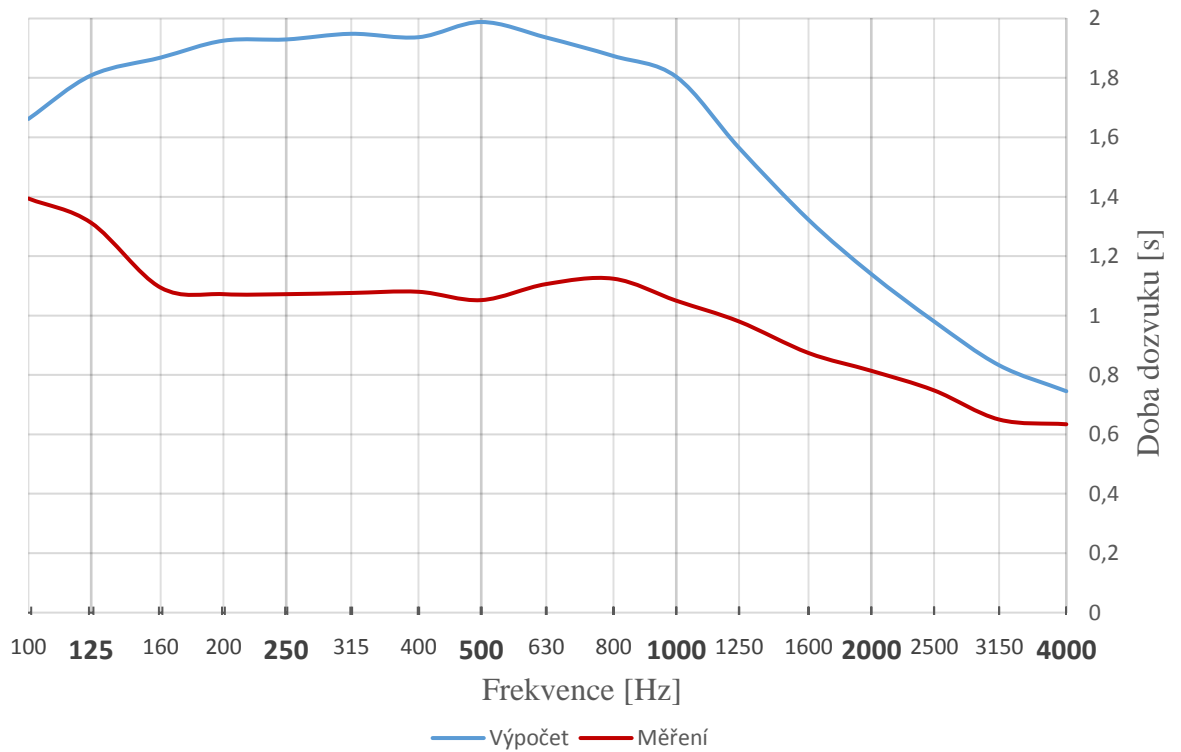


Obr. 5.5: Rozmístění mikrofonů a zvukových zdrojů

Všech 10 měření bylo zaznamenáno. Zdroj zvuku Z1 byl umístěn přibližně na předpokládané pozici reproduktoru. Jelikož předpokládané umístění reproduktorů je symetrické a dá se považovat za symetrické i vůči prostoru, lze prohlásit, že měření pozic mikrofonu P1-P5 ze zdroje zvuku Z1 je reálnou interpretací plánované reprodukce. Z tohoto důvodu bylo průměrováno pouze těchto 5 nejvíce relevantních měření. Na obr. 5.6 je graf rozptylu naměřené doby dozvuku, kde je zobrazeno minimum, maximum a průměr hodnot na dané frekvenci. Výsledná doba dozvuku je vynesena do grafu na obr. 5.7, kde je výsledek porovnán s teoretickým výpočtem. V tab. 5.6 je naměřená doba dozvuku vynesena číselně.



Obr. 5.6: Rozptyl doby dozvuku prázdné místnosti



Obr. 5.7: Doba dozvuku prázdné místnosti, porovnání s teoretickým výpočtem

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T_s [s]	1,39	1,31	1,09	1,07	1,07	1,08	1,08	1,05	1,11
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T_s [s]	1,12	1,05	0,98	0,87	0,81	0,75	0,65	0,63	

Tab. 5.6: Hodnoty naměřené doby dozvuku

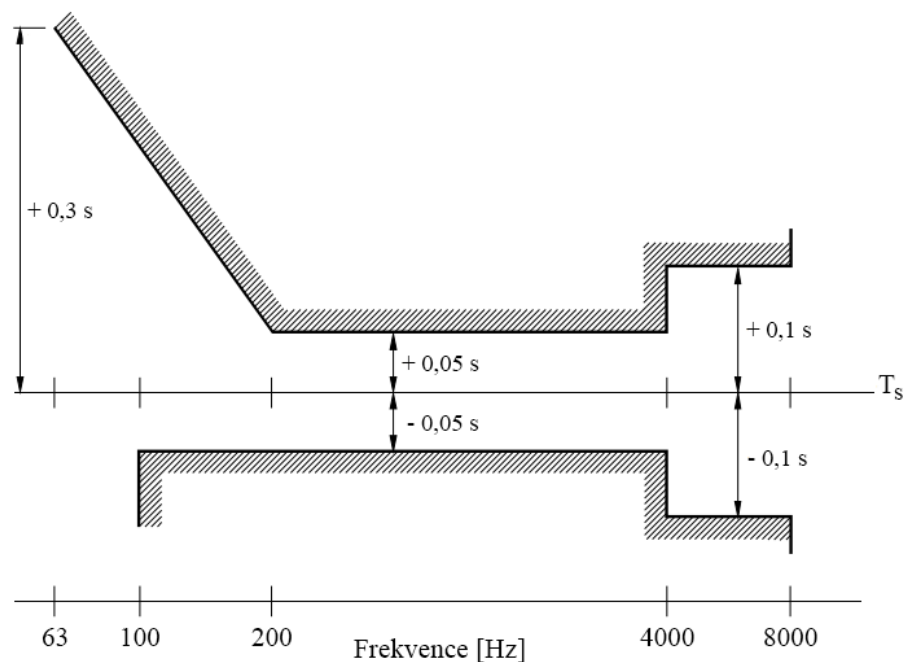
Z grafu na obr. 5.6 je patrné, že výpočet doby dozvuku byl velmi nepřesný. Křivka výpočtu přibližně kopíruje skutečnou naměřenou dobu dozvuku tvarem, ale hodnoty jsou větší. Důvodem je nemožnost přesné identifikace složení zdí i podlahy ve zvolené místnosti, jelikož se jedná o starý městský dům. Použité koeficienty činitele pohltivosti převzaté z [2] tedy nesouhlasí s reálnými. Okna i dveře jsou v této místnosti atypické, což opět nemusí souhlasit s udávanou hodnotou činitele pohltivosti. Dalším důvodem chyby výpočtu je, že teorie počítá s rovností ploch použitých materiálů. Zvolená místnost vykazuje značné nerovnosti na všech zdech i na podlaze. V některé části místnosti se zdi sbíhají, v některé zase rozbíhají. Což není ze stavebního hlediska ideální, ale pro prostorovou akustiku to má příznivý vliv.

6 Návrh a realizace akustických úprav

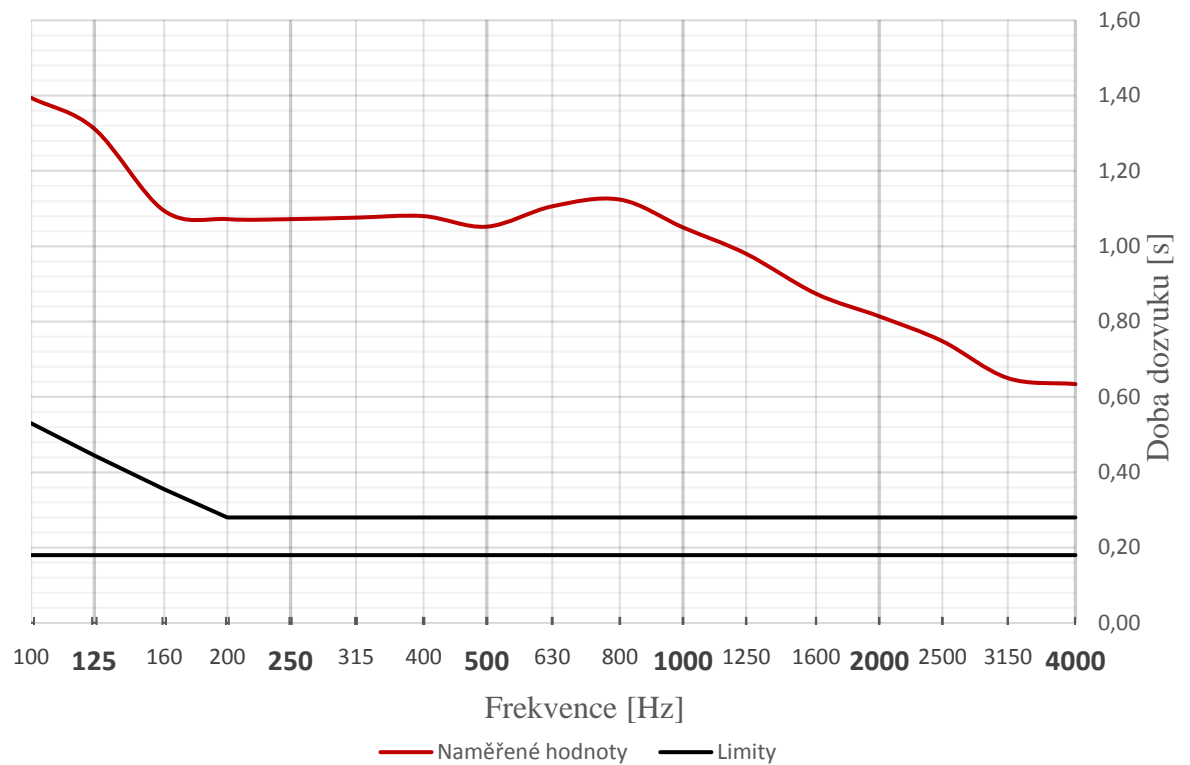
V následujících kapitolách jsou zhodnoceny vypočtené a naměřené parametry místnosti. Na základě těchto parametrů a možností, které prostor nabízí, jsou navrženy potřebné akustické úpravy tak, aby bylo možné prostor provozovat jako poslechovou místnost s ohledem na normou doporučenou dobu dozvuku.

6.1 Zhodnocení stávajícího stavu prostoru

Před návrhem je důležité si definovat, do jakých hodnot doby dozvuku má rezonátor akustické pole místnosti posunout. V kapitole 5.4 byla spočítána doporučená průměrná doba dozvuku $T_s = 0,23$ s. Dle obr. 6.1, který je převzat z normy [10], jsou dopočtené normou doporučené limity doby dozvuku. Na obr. 6.2 jsou tyto limity vyneseny společně s naměřenou dobou dozvuku místnosti. Číselné hodnoty naměřené doby dozvuku jsou v kapitole 5.5, tab. 5.6. Hodnoty v tab. 6.1 reprezentují časový údaj, o kolik je třeba minimálně snížit dobu dozvuku.



Obr. 6.1: Doporučené limity doby dozvuku dle normy ITU-R BS.1116-3 [10]

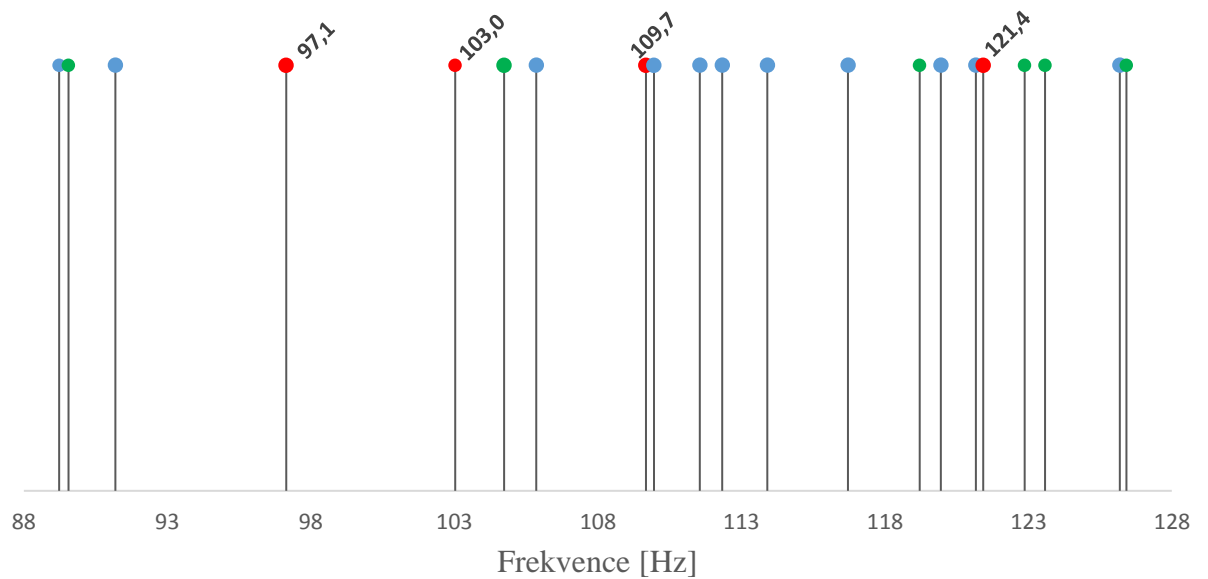


Obr. 6.2: Doba dozvuku prázdné místnosti s limity doporučenými normou ITU-R BS.1116-3 [10]

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T_{min} [s]	0,86	0,87	0,74	0,79	0,79	0,80	0,80	0,77	0,83
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T_{min} [s]	0,84	0,77	0,70	0,59	0,53	0,47	0,37	0,35	

Tab. 6.1: Rozdílová funkce naměřené doby dozvuku a horní limity doby dozvuku doporučené normou

V tabulce je vypočteno, o kolik je nutné snížit dobu dozvuku na daných frekvencích. Aby doba dozvuku na nízkých frekvencích vyhovovala normě, musí být na 100 a 125 Hz snížena alespoň přibližně o 0,87 s. V kapitole 5.4 jsou vypočteny vlastní kmity místnosti. Na obr. 6.3 je graficky znázorněna kritická oblast 80 až 130 Hz, kde je předpokládáno velmi nerovnoměrné rozložení akustického pole v prostoru. Nejdůležitější vlastní kmity jsou axiální, které by bylo vhodné rezonátorem ztlumit. V této oblasti se vyskytují celkem 4.



Obr. 6.3: Grafické znázornění vypočtených vlastních kmitů místnosti v oblasti 80-130 Hz, červená – axiální, modrá – tangenciální, zelená – šikmé

K dispozici je celkem 79,1 m² plochy pro možné akustické úpravy, z toho 21,7 m² činí plocha stropu. Na svislých stěnách je tedy možné využít plochu pro akustické úpravy přibližně maximálně 57 m².

6.2 Návrh

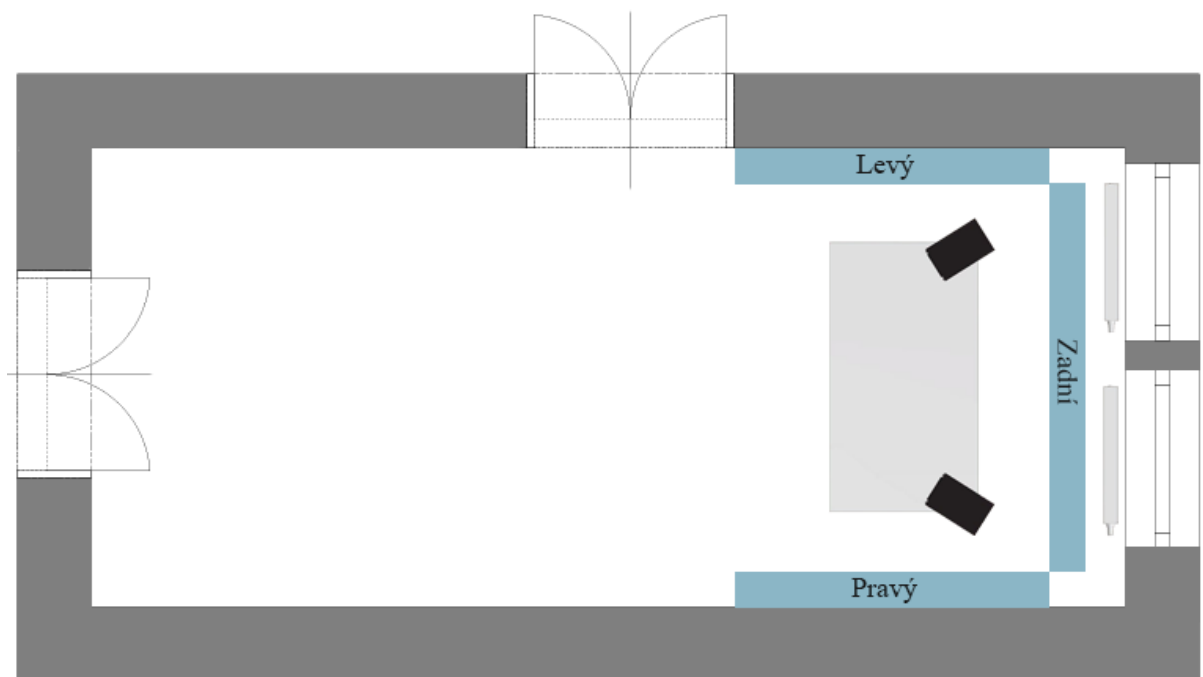
Na základě provedených výpočtů vlastních kmitů a měření doby dozvuku se zaměřením na rozložení akustického pole v oblasti předpokládaného poslechového místa je možné provést návrh potřebných úprav. Nejproblematičtější část frekvenčního pásma u velké většiny prostorů je oblast nízkých frekvencí přibližně od 50 Hz až 200 Hz. Tuto frekvenční oblast je možné s ohledem na rozměry prostoru řešit pouze pomocí rezonančních pohltivých prvků. Prvním krokem samotné realizace proto bude konstrukce pohltivých prvků pro tlumení nízkých frekvencí. Pro oblast nízkých frekvencí připadají v úvahu pouze dvě řešení – kmitající panel nebo Helmholtzův rezonátor. Navržení a postavení vlastního kmitacího panelu může z důvodu neznalosti vlastností uchycení panelu do rámu přinést nepřesné výsledky. Je velmi pravděpodobné, že by rezonátor musel být několikrát upraven a přeměřen, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. Při konstrukci laťového rezonátoru je možné jednoduše přeladit rezonanční frekvenci změnou rozestupu jednotlivých prken. Samotná realizace není tak časově

a konstrukčně náročná v porovnání s ostatními variantami Helmholtzova rezonátoru. Z těchto důvodů je tedy příznivější návrh i realizace Helmholtzova laťového rezonátoru.

Na základě navrženého rezonátoru pro nízké frekvence jsou navrženy úpravy pro střední a vysoké frekvence tak, aby doba dozvuku vyhovovala na všech frekvencích požadavkům normy.

6.2.1 Helmholtzův laťový rezonátor

Nejprve je třeba vymezit plochy stěn, na kterých bude možné rezonátor realizovat. V místnosti je k dispozici celkem 79 m² plochy stěn. Z praktického hlediska je lepší stavět rezonátor, pokud možno, na co největší plochu v celku. To vylučuje z úvahy malé plochy nad i vedle dveří, které se nachází na kratší stěně. Z konstrukčních a praktických důvodů je taktéž vyloučena plocha stropu. Vzhledem k pozici reproduktorů je vhodné rezonátor postavit na stěnách nejbližší k nim. Z těchto důvodů byl zhotoven návrh umístění, který je zobrazen na obr. 6.4.



Obr. 6.4: Uvažovaná pozice navrhovaného Helmholtzova rezonátoru

Od dveří na levé straně k oknu je k dispozici maximálně 2,45 m. Prostor je vhodné vzhledem k poslechovému místu a umístění reproduktorů navrhovat symetricky, proto je na

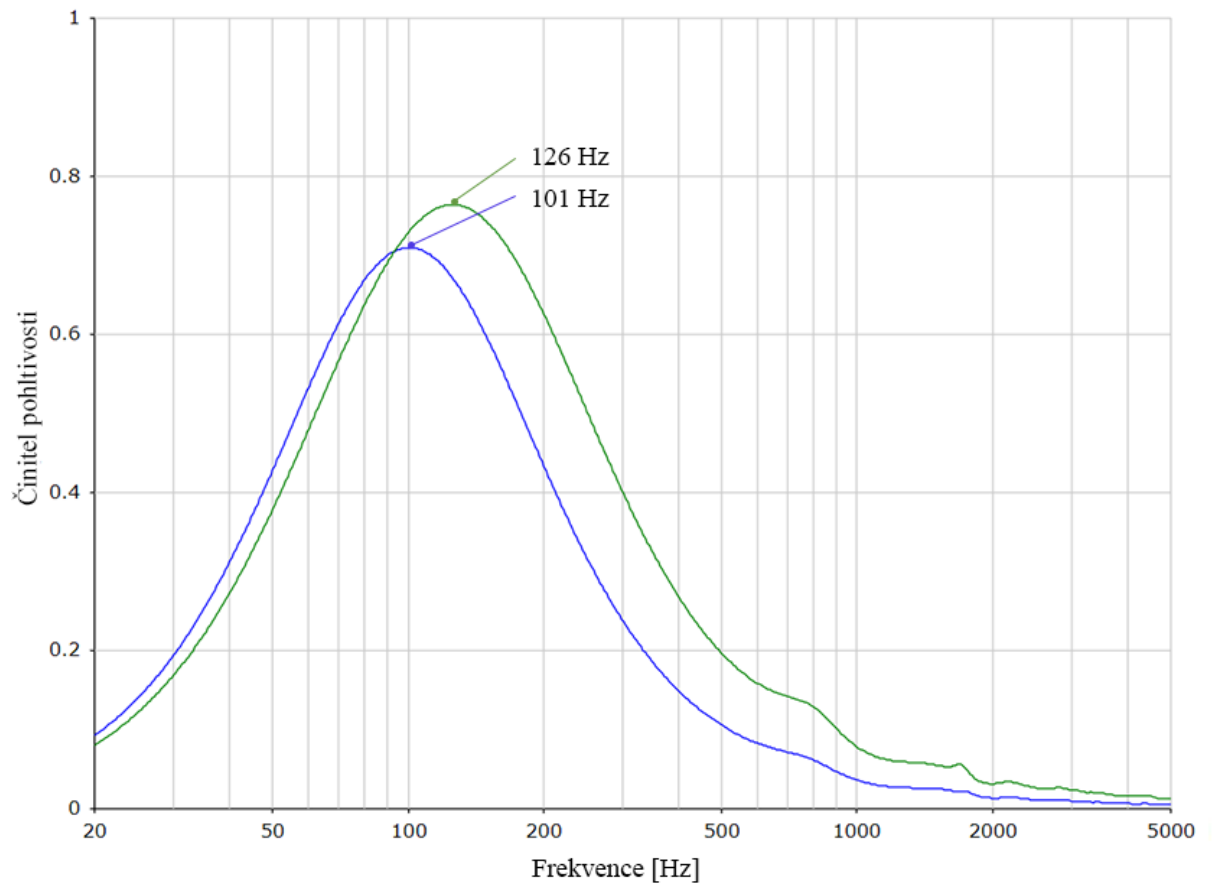
pravé straně uvažována stejná plocha obkladu. Jak je na obr. 5.2 vidět, okna na zadní stěně jsou jediným zdrojem přirozeného světla v místnosti. Topení je také instalováno na zadní stěně pod okny. Pokud by se celá zadní stěna zastavěla rezonátorem, místnost by nebyla příjemně obyvatelná. Z tohoto důvodu bude zadní stěna rezonátoru o něco menší na výšku, což umožní průstup světla i tepla. Výška místnosti je 3,3 m. Boční stěny, z důvodu nutnosti přístupu shora během instalace, bude vhodné navrhnout maximálně do výše 2,8 m. Zadní stěna bude kvůli dostatečnému průchodu světla a tepla maximálně 2,3 m vysoká. Vzhledem k tomu, že místnost má na šířku 3,1 m, byla určena maximální hloubka rezonátoru 0,25 m, což by dohromady zúžilo místnost na 2,6 m. Z těchto určených maximálních rozměrů vychází maximální plocha rezonátoru 19,7 m².

Z možných variant konstrukce přední desky byla zvolena varianta se štěrbinou. Přední panel však nebude tvořit jeden kus děrované desky, ale určitý počet dřevěných latí, oddělených štěrbinou o určité šířce. Tento typ rezonátoru se nazývá Helmholtzův laťový rezonátor (v anglicky psané literatuře označovaný jako Helmholtz slat resonator). Jedním z důvodů zvolení tohoto typu štěrbiny, je možnost případného přeladění rezonančních frekvencí pouhým přešoupáním latí za účelem vytvoření nových šířek štěrbín.

Na základně získaných potřebných informací popsanych v bodě 6.1.1. vyplývá, že je třeba místnost ošetřit hlavně v okolí frekvencí 100 a 125 Hz, kde bude nutné snížit dobu dozvuku alespoň o 0,86 s. Návrh byl zhotoven v online kalkulátoru Acoustic Modelling [11]. Tento kalkulátor umožňuje výpočet vícevrstvého absorbéru. Pomocí nastavení vrstev a jejich parametrů je možné sestavit model Helmholtzova rezonátoru. Výstupem je křivka frekvenční závislosti činitele pohltivosti α_s . Nástroj pracuje s porézním modelem a Helmholtzovým modelem dle Allarda. Návrh je tedy zaměřen na výše zmíněné 2 rezonanční frekvence. Klíčové je zvolit absorpční materiál s vhodnou hodnotou průvzdušnosti. Pro tuto aplikaci je cílem najít kompromis v dostatečně velké hodnotě činitele pohltivosti na rezonanční frekvenci a dostatečně velké šířce pohltivého pásma kolem rezonanční frekvence tak, aby byla doba dozvuku v okolí 100 a 125 Hz upravena na hodnotu doporučenou normou.

Pro naladění více rezonančních frekvencí na jedné konstrukci rezonátoru je možné využít buď rozdílnou šířku štěrbín, nebo rozdílnou šířku latí. Z praktických důvodů byla zvolena varianta rozdílné šířky štěrbín. Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti dvou variant

Helmholtzova laťového rezonátoru navrženého na frekvence 101 a 126 Hz je na obr. 6.5. Parametry rezonátoru jsou v tab. 6.2. Názorný řez rezonátorem je na obr. 6.6.



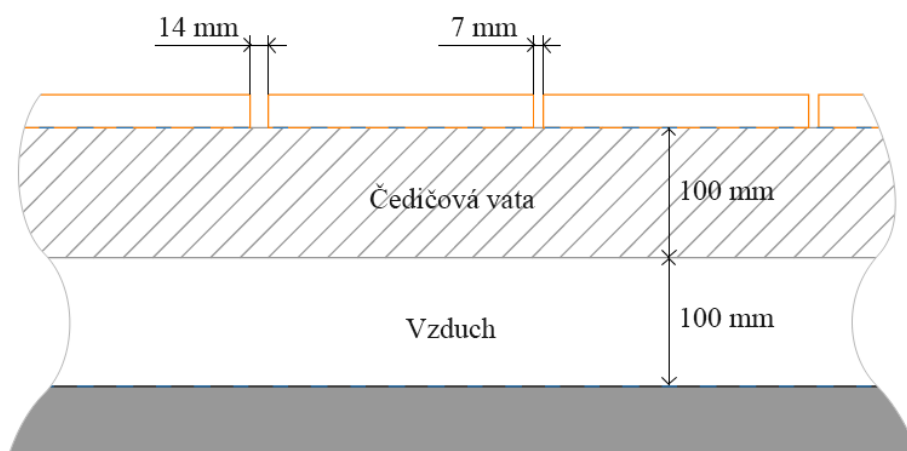
Obr. 6.5: Frekvenční závislost činitele pohltivosti navrženého rezonátoru

Konstrukce	Boční	Zadní
Šířka konstrukce	2,36 m	1,28 m
Výška konstrukce	2,80 m	2,30 m
Počet latí	11	6
Počet štěrbin 1	6	3
Počet štěrbin 2	4	2
Počet konstrukcí	2	2

Parametry společné pro všechny konstrukce	
Šířka latě	205 mm
Hloubka latě	25 mm
Šířka štěrbin 1	7 mm
Šířka štěrbin 2	14 mm
Hloubka vzduchového polštáře	200 mm
Vrstva 1 - minerální vata Knauff MPE	100 mm
Vrstva 2 - vzduch	100 mm

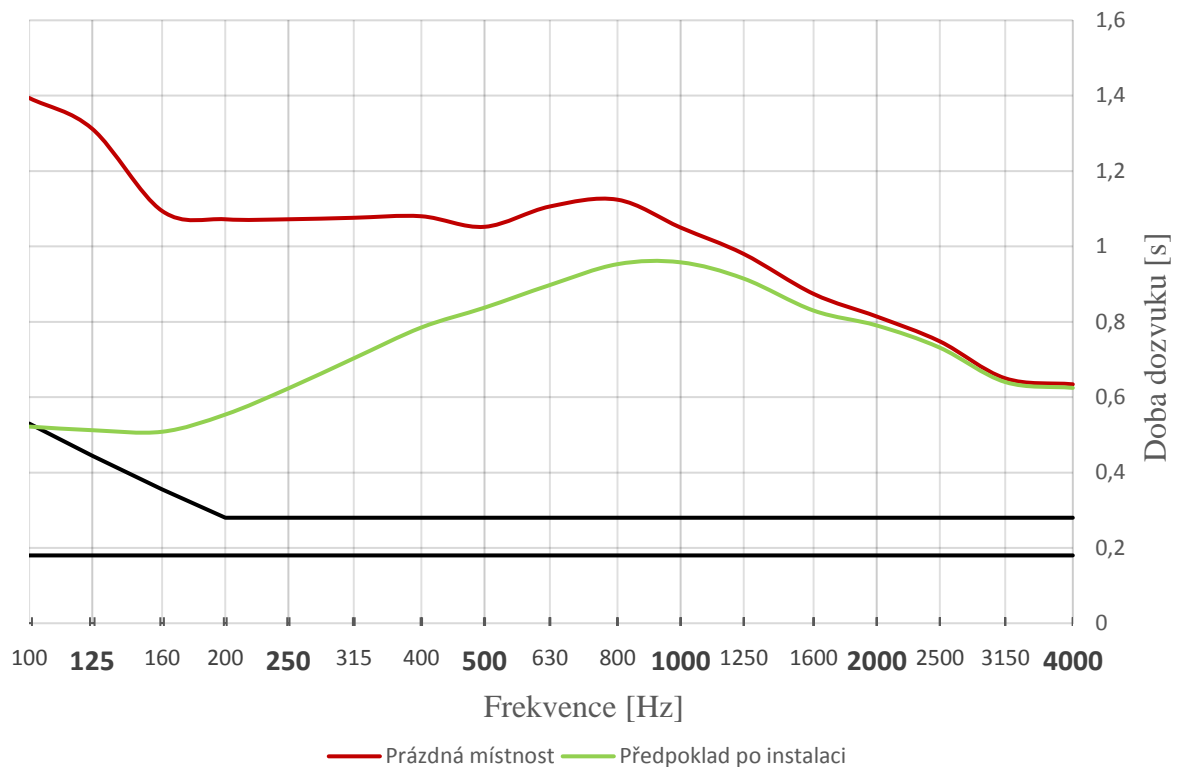
Celková plocha rezonátorů na 101 Hz	11,6 m ²
Celková plocha rezonátorů na 126 Hz	8,1 m ²
Celkový objem rezonátorů	3 820 l

Tab. 6.2: Výčet parametrů navržených konstrukcí rezonátoru



Obr. 6.6: Názorný řez navrženým rezonátorem

Podrobný náčrtek rezonátorů je v příloze A. Jelikož rezonátor naladěný na frekvenci 101 Hz má v bodě rezonance nižší hodnotu činitele pohltivosti, než rezonátor naladěný na 126 Hz, je tento rozdíl přibližně vyrovnán rozdělením celkových ploch rezonátorů viz tab. 6.2. Zadní konstrukce byla rozdělena na dva totožné rezonátory kvůli snadnější manipulaci. Na obr. 6.7 je znázorněna předpokládaná doba dozvuku po instalaci navržených rezonátorů v porovnání s dobou dozvuku prázdné místnosti. V tab. 6.3 je předpokládaná doba dozvuku číselně.



Obr. 6.7: Předpokládaný průběh doby dozvuku po instalaci navrženého Helmholtzova laťového rezonátoru v porovnání s naměřenou dobou dozvuku prázdné místnosti

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T60 [s]	0,52	0,51	0,51	0,55	0,62	0,70	0,78	0,84	0,90
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T60 [s]	0,95	0,96	0,91	0,83	0,79	0,73	0,64	0,62	

Tab. 6.3: Hodnoty předpokládané doby dozvuku po instalaci navrženého Helmholtzova laťového rezonátoru

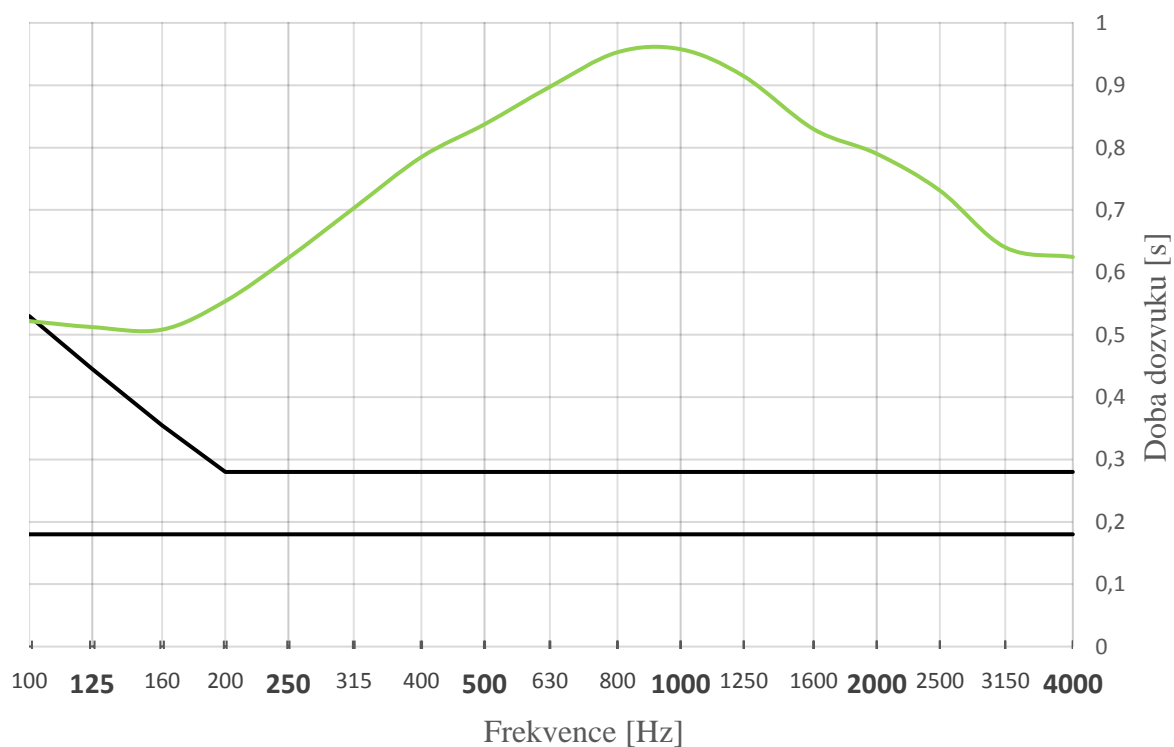
6.2.2 Oblast středních a vysokých frekvencí

Při návrhu se vychází z předpokládané doby dozvuku po realizaci návrhu Helmholtzova laťového rezonátoru popsaného v předchozí kapitole. Rezonátor by měl zmenšit dobu dozvuku na nízkých frekvencích. Je tedy třeba navrhnout akustické úpravy pro zbytek frekvenčního spektra. Hodnoty v tab. 6.4 reprezentují časový údaj, o kolik je třeba minimálně snížit dobu

dozvuku. Na obr. 6.8 je přiblížen předpokládaný průběh doby dozvuku po instalaci navrženého rezonátoru pro nízké frekvence.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T_{min} [s]	0	0,07	0,15	0,27	0,34	0,42	0,50	0,56	0,62
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T_{min} [s]	0,67	0,68	0,63	0,55	0,51	0,45	0,36	0,34	

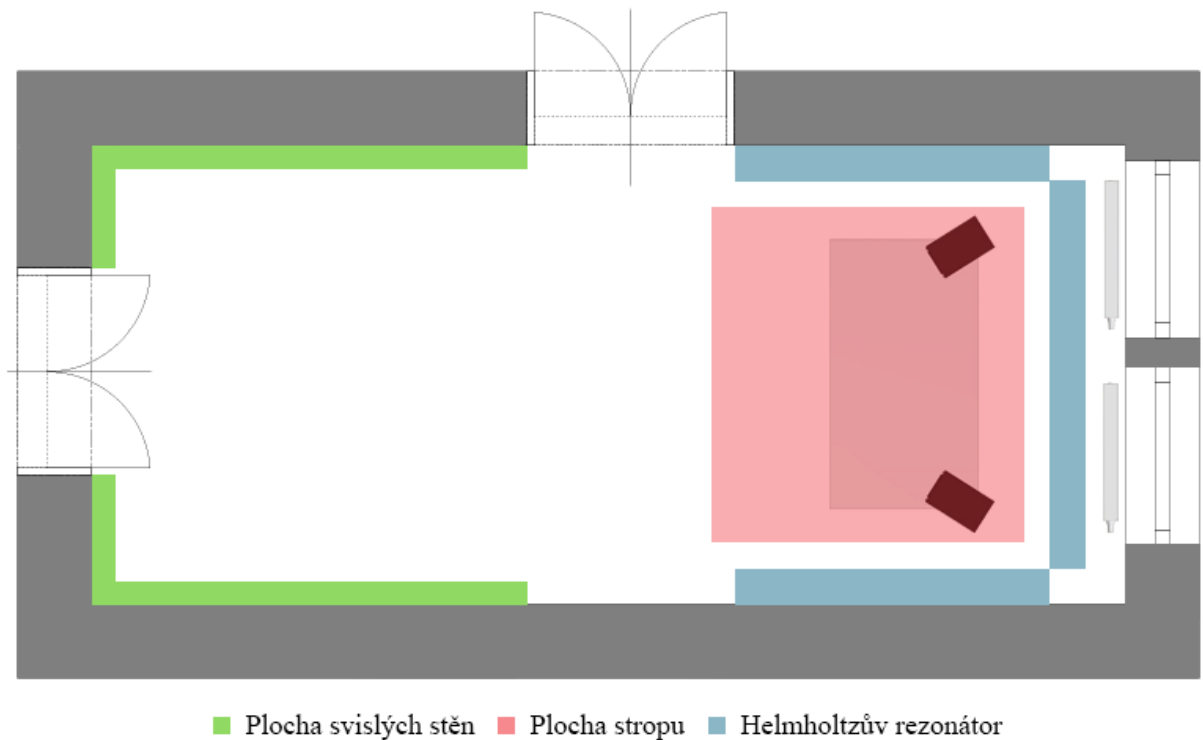
Tab. 6.4: Rozdílová funkce předpokládané doby dozvuku po instalaci Helmholtzova rezonátoru a horní limity doby dozvuku doporučené normou



Obr. 6.8: Předpokládaný průběh doby dozvuku po instalaci navrženého Helmholtzova laťového rezonátoru

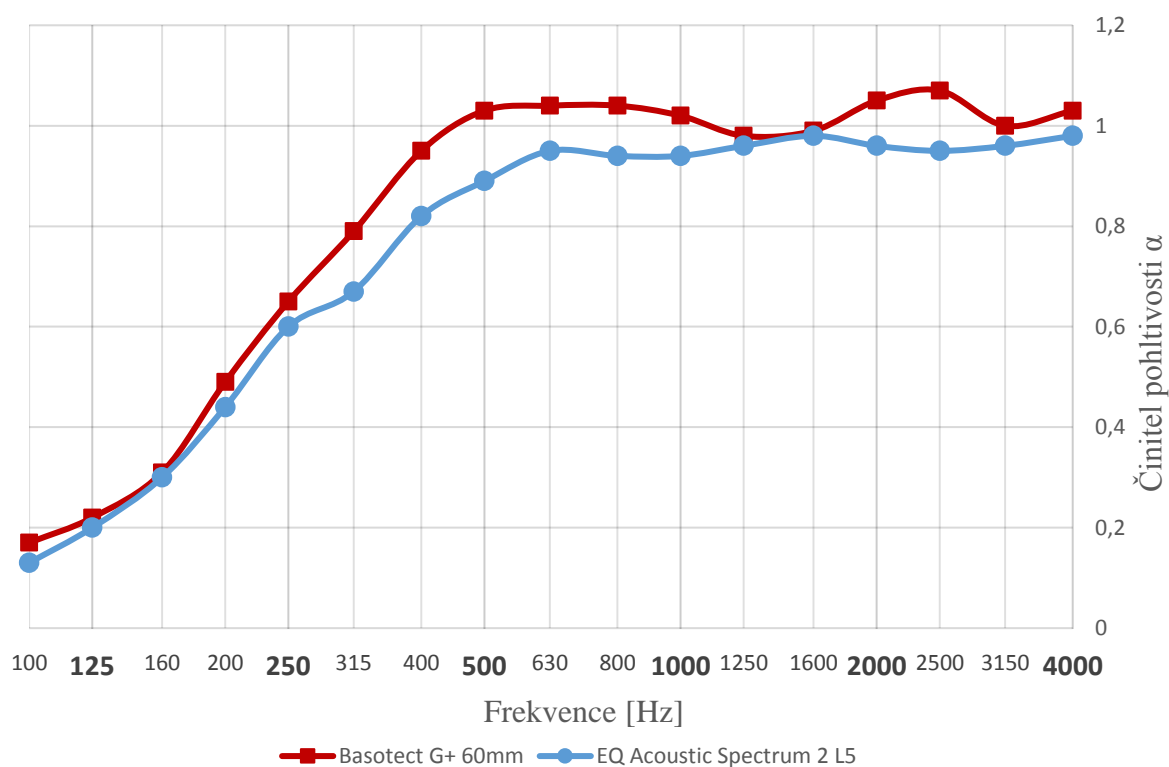
Před návrhem rezonátoru bylo k dispozici celkem 57 m² plochy na svislých stěnách. Navržený Helmholtzův rezonátor zabere svojí plochou celou část místnosti od dveří na levé straně místnosti až k oknům, vyjma stropu. K dispozici pro úpravy tedy zbývá 32 m² svislé plochy a 21,7 m² plochy stropu, což je více než dostatek pro potřebné úpravy.

Jelikož od oblasti poslechového místa až k oknům jsou stěny pokryty nízkofrekvenčním rezonátorem, bude vhodné pro úpravy využít plochu stropu nad poslechovým místem. Zbytek potřebných ploch bude rozdělen symetricky na stěnách v přední části místnosti. Předpokládané oblasti ploch, které budou využity pro úpravy středních a vysokých frekvencí jsou na obr. 6.9.



Obr. 6.9: Znárodnění oblastí zvolené pro akustické úpravy

Z obr. 6.8 vyplývá, že je třeba takového pohltivého materiálu nebo kombinace materiálů, které budou zhruba kopírovat tvar předpokládané doby dozvuku po instalaci Helmholtzova rezonátoru. Je také žádoucí zvolit takový materiál, který bude co možná nejméně tlumit na nízkých frekvencích. Z toho, co nynější trh nabízí, je pro tuto aplikaci nejvhodnější melaminová pryskyřičná pěna Basotect G+ od firmy BASF. Pěna je dostupná v tloušťkách 25, 40, 50 a 60 mm. Výrobce má volně dostupné naměřené hodnoty činitele pohltivosti α_s ve všech uvedených tloušťkách. Pro potřebné snížení doby dozvuku je v tomto případě vhodná kombinace tloušťek 25 a 40 mm. Do návrhu je zahrnut i jeden absorbér Spektrum 2 L5 od firmy EQ Acoustics o ploše $0,7 \text{ m}^2$, který byl zakoupen již v dřívější době. Výrobce rovněž uvádí naměřené parametry absorbéru. Závislosti činitele pohltivosti obou výše uvedených prvků jsou vyneseny na obr. 6.10.



Obr. 6.10: Závislosti činitelů pohltivosti prvků zvolených pro úpravy

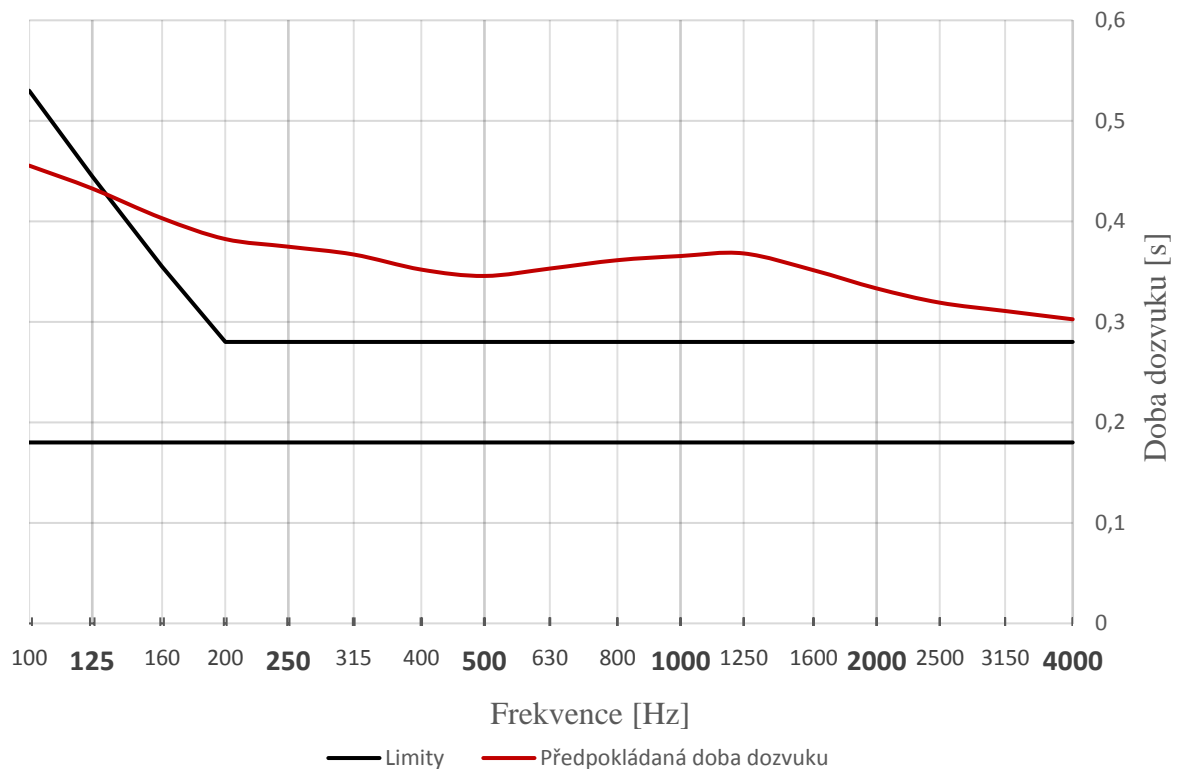
Množství ploch potřebných pro dosažení žádoucí doby dozvuku je vypsáno v tab. 6.5. Výsledná doba dozvuku je vypsána číselně v tab. 6.6 a znázorněna graficky spolu s doporučenými mezemi normou na obr. 6.11.

BASR Basotec G+ 60 mm	18,8 m ²
EQ Acoustic Spektrum 2 L5	0,7 m ²
Celková použitá plocha	19,5 m ²

Tab. 6.5: Výčet ploch použitých akustických prvků

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T60 [s]	0,46	0,43	0,40	0,38	0,37	0,37	0,35	0,35	0,35
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T60 [s]	0,36	0,37	0,37	0,35	0,33	0,32	0,31	0,30	

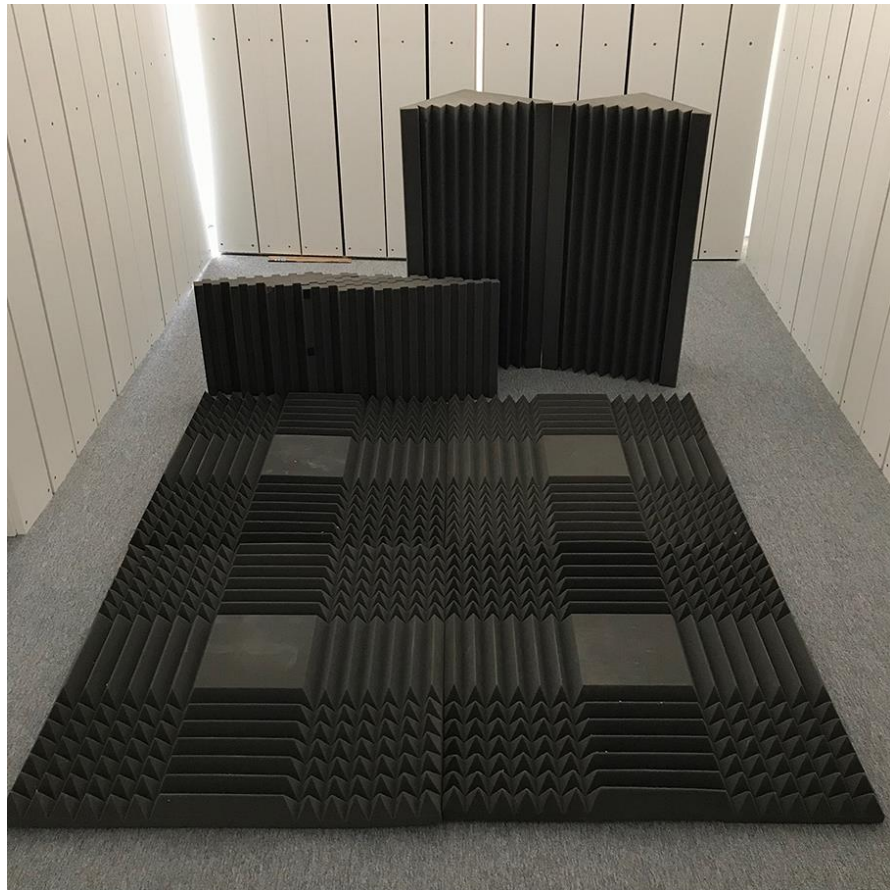
Tab. 6.6: Předpokládaná doba dozvuku po aplikaci všech úprav



Obr. 6.11: Závislost předpokládané doby dozvuku na frekvenci po aplikaci navržených úprav

6.2.3 Vyhodnocení návrhu

Maximální odchylka předpokládané doby dozvuku od horního limitu doby dozvuku doporučené normou je 0,1 s (viz obr. 6.11). Helmholtzův rezonátor je navržený dle modelu Allarda, který je zároveň nejvíce používaný. Existují však jiné modely, ze kterých vychází odlišné hodnoty činitele pohltivosti, a to většinou hodnoty vyšší. Bylo by ekonomicky nevýhodné nakoupit více pohltivých prvků, když v konečném důsledku by nemusely být využity. Proto je plánováno společně se svépomocí realizovaným nízkofrekvenčním rezonátorem nainstalovat akustické prvky vypsané v tab. 6.7, a na základě nově naměřených hodnot doby dozvuku navrhnout finální drobné úpravy. Pro potenciální úpravy je možné využít výrobků z obyčejné akustické pěny, které již vlastním. Jedná se o 4 kusy jehlanového motivu o celkové ploše 4,8 m², 6 kusů malých absorbérů o celkové ploše 1,2 m² a 2 rohové nízkofrekvenční absorbéry o celkové ploše čela 1,2 m². Tyto prvky jsou společně na obr. 6.12.



Obr. 6.12: Absorbéry, které mohou být užitečné ve finální fázi úprav

6.3 Realizace

Výchozí stav prostoru je na obr. 5.2. Prvním krokem bylo položení nového koberce Rambo 78 (viz obr. B.1 v příloze). Pro realizaci byl vybrán navržený Helmholtzův laťový rezonátor. Podélný řez návrhem je na obr. 6.6. Jako základní stavební prvek konstrukce byl zvolen materiál smrkového dřeva. Všechny dřevěné konstrukce byly perforovány. Základem jsou dřevěné střešní latě o rozměru 4x6 cm. Pro každou vrstvu byly nainstalovány 3 stojky z těchto latí. Pomocí těchto latí byla vymezena vzdálenost 10 cm od zdi. Latě jsou na 9 místech uchyceny kovovým úhelníkem ve tvaru L, o rozměru 4x20 cm (viz obr. B.2 a detail uchycení na obr. B.3 v příloze). Svislé latě byly pro zpevnění konstrukce podpořeny podélnými menšími latěmi. Na této první vrstvě konstrukce byla natažena vrstva perlinky. Tím je zaručeno, že minerální vata v přední vrstvě rezonátoru nepropadne dozadu. V délce 20 cm od zdi byla postavena druhá svislá řada latí a upevněna na úhelníky. Detail vrstvení je na obr. B.4 v příloze. Výsledná základní konstrukce rezonátoru na levé stěně je na obr. 6.13.



Obr. 6.13: Konstrukce navrženého Helmholtzova rezonátoru na levé stěně

Dalším krokem je instalace minerální vaty. Byla použita vata Knauff MPE o rozměrech 60x100x10 cm. Vatu bylo nutné na místech, kde stála konstrukce, vyříznout a zapasovat. V příloze je výsledek na obr. B.5, detail instalace pohledem z boku je na obr. B.6.

Konstrukce na pravé straně je postavena přesně tak, jako výše popsaná strana levá. Zadní konstrukce jsou rozděleny na dvě části. Hlavní důvod rozdělení je možnost manipulace pro případ potřebného přístupu k oknům nebo k radiátoru. U zadních rezonátorů jsou vrstvy stejné. Dřevěné latě, které tvoří konstrukci taktéž. Chybí však vnitřní sloup, ten díky dostatečné pevnosti konstrukce není nutný. U bočních konstrukcí uzavírá rezonátor samotná stěna. U zadních konstrukcí bylo nutné vytvořit rám, na který bude připevněna deska uzavírající vzduchový polštář zezadu. Detail na konstrukci je na obr. B.7 v příloze. Z hygienických a

estetických důvodu byly přední plochy všech konstrukcí zakryty netkanou mulčovací textilií. Pohled na všechny konstrukce v této fázi je na obr. B.8 v příloze.

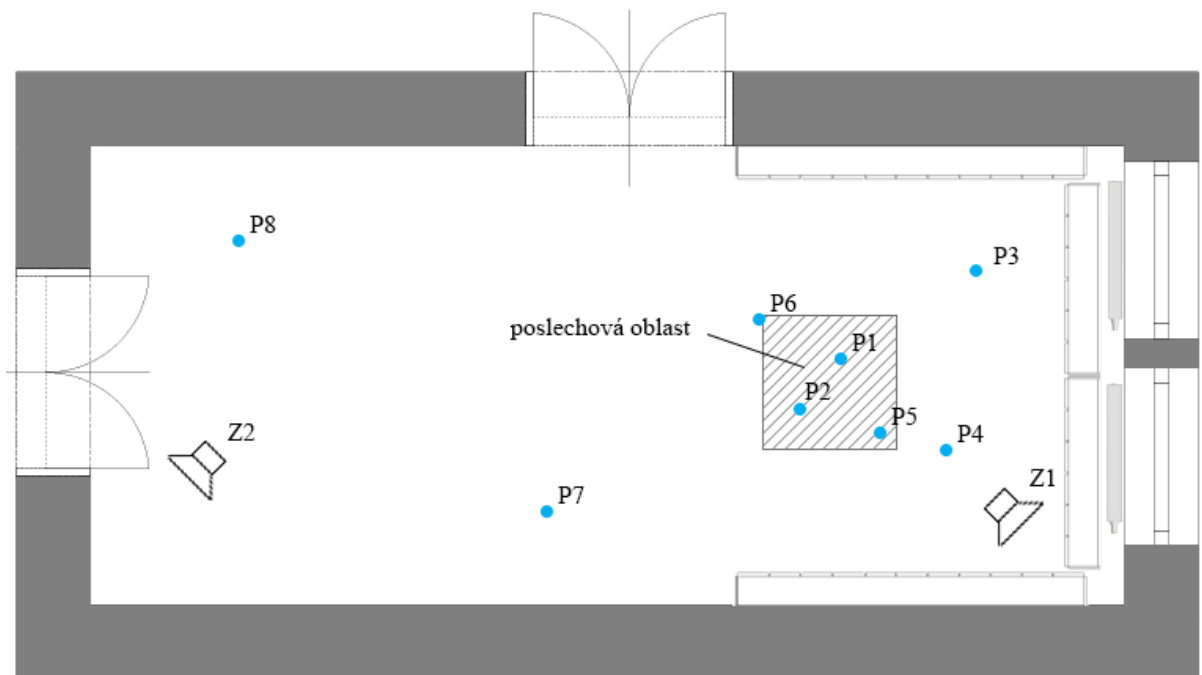
Všechny konstrukce byly ohraněny a utěsněny po obvodu 12 mm tlustými dřevotřískovými deskami. Konstrukce jsou tak ze všech stran neprůvzdušné, kromě štěrbin na přední stěně. Latě, které tvoří přední stěny rezonátorů, byly objednány na zakázku v truhlářství. V původním plánu se jednalo o vyschlé smrkové dřevo. Prkna se ale již několik hodin po ohoblování zkroutila, nebo popraskala. Jako alternativa byly proto zvoleny latě z dřevotřískové desky L 113 SM 2800x2070x25 mm. Na rozdíl od smrkových latí je zde záruka, že latě budou na milimetr přesně nařezány a není možné, aby se zkroutily nebo popraskaly. Nařezané latě jsou ohraněny z obou bočních stran. Spolu s jistotou kvality provedení je však provázána nevýhoda několikanásobně vyšší ceny a také větší hmotnosti. Barva povrchu latí a bočních krytů byla zvolena bílá, a to hlavně lepšímu šíření světla v místnosti. Pohled na zhotovené rezonátory je na obr. 6.14. Více fotografií v příloze B.



Obr. 6.14: Pohled na zhotovené 4 konstrukce Helmholtzových rezonátorů

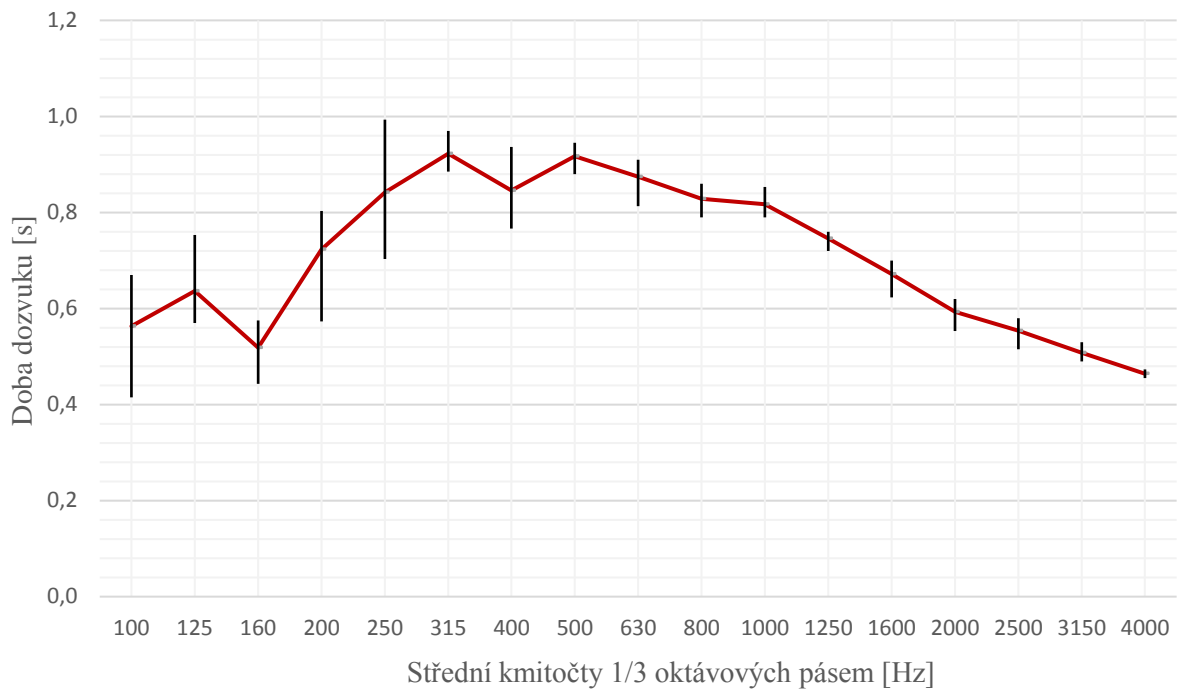
6.4 Měření doby dozvuku po instalaci úprav

Měření bylo provedeno totožným způsobem a za použití stejné měřicí techniky jako při měření prázdného prostoru, které je popsáno v kapitole 5.5. V tomto měření byla přidána 3 měřicí místa. Bylo vytvořeno více náhodné rozmístění mikrofonů, s větším zaměřením na oblast poslechového místa, viz obr. 6.15. Rozmístění včetně rozměrů viz obr. A.3 v příloze.

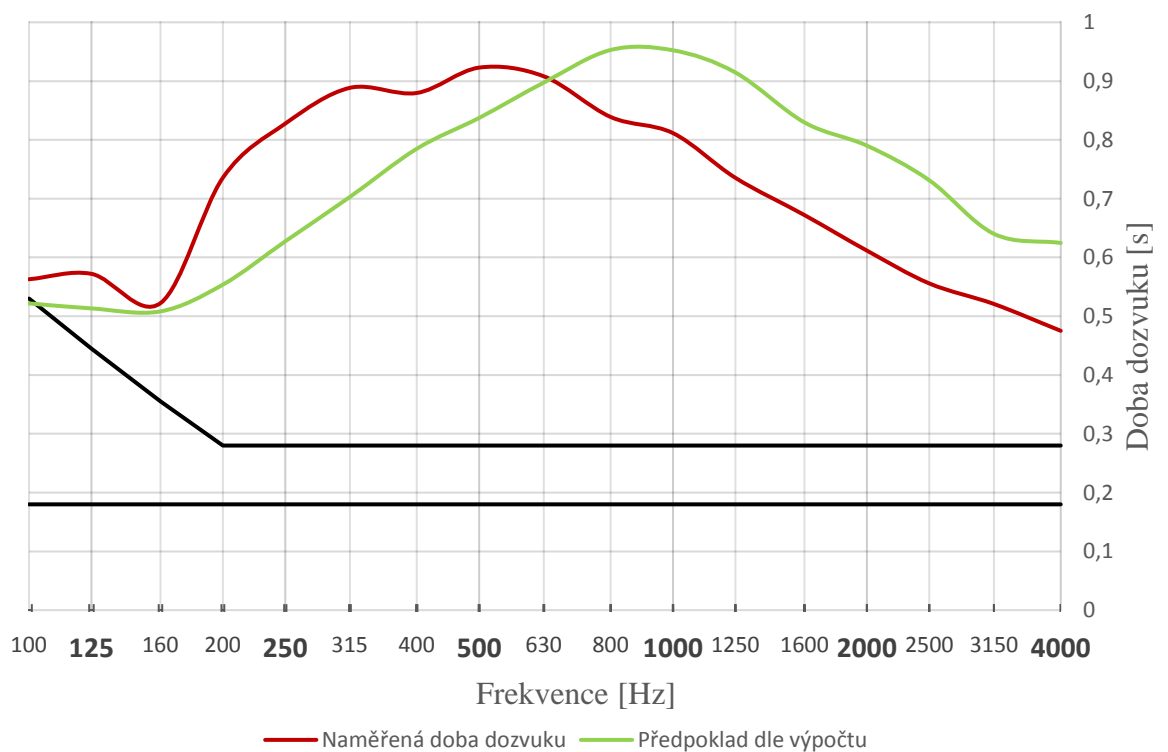


Obr. 6.15: Rozmístění mikrofonů a zvukových zdrojů pro měření po instalaci Helmholtzova rezonátoru

Všechna měření byla zpracována a průměrována. Pro potřeby poslechu pouze v jedné oblasti vyznačené na obr. 6.15 byly však uvažovány pouze pozice mikrofonů P1, P2, P5 a P6. Na obr. 6.16 je graf rozptylu naměřené doby dozvuku, kde je zobrazeno minimum, maximum a průměr hodnot na dané frekvenci. Výsledná doba dozvuku je vynesena do grafu na obr. 6.17, kde je výsledek porovnán s předpokládanou dobou dozvuku na základě výpočtů. V tab. 6.7 je naměřená doba dozvuku vynesena číselně.



Obr. 6.16: Rozptyl doby dozvuku místnosti po instalaci Helmholtzova rezonátoru



Obr. 6.17: Doba dozvuku naměřená po instalaci Helmholtzova rezonátoru. Porovnání s předpokládanou dobou dozvuku dle výpočtu

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T_s [s]	0,56	0,57	0,52	0,74	0,83	0,89	0,88	0,92	0,91
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	
T_s [s]	0,84	0,81	0,74	0,67	0,61	0,56	0,52	0,48	

Tab. 6.7: Hodnoty naměřené doby dozvuku po instalaci Helmholtzova rezonátoru

Z grafu rozptylu doby dozvuku na obr. 6.14 jsou oproti hodnotám naměřených při měření prázdné místnosti (viz obr. 5.4) vidět náznaky vyrovnanosti rozložení akustického pole na vyšších frekvencích. Zhruba od 1000 Hz se rozptyl pohybuje v rozmezí maximálně $\pm 0,07$ s.

Z porovnání naměřené a předpokládané doby dozvuku na obr. 6.15 vyplývá, že navržený rezonátor funguje velmi dobře, a to hlavně v oblasti frekvencí 100 a 125 Hz, na které byly rezonátory naladěny. Na těchto frekvencích je odchylka maximálně $+0,06$ s. Vzhledem k tomu, že zhruba 5 % objemu vzduchového polštáře rezonátoru tvoří samotná konstrukce, je tento výsledek přijatelný. Odchytky na středních a vysokých frekvencích jsou s největší pravděpodobností zapříčiněny nerovnoměrnou průvzdušností tlumícího materiálu Knauff MPE. Výrobce udává průvzdušnost $5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, se kterou bylo počítáno v návrhu. Avšak tato hodnota je udávána jako minimální, maximální již udávána výrobcem není. Větší hodnota průvzdušnosti zvětší šířku pásma působnosti rezonátoru, ale zmenší hodnoty činitele pohltivosti v okolí rezonance. Tento jev je v grafu na obr. 6.15 dobře patrný. V okolí rezonančních frekvencí (přibližně 160 až 630 Hz) je doba dozvuku větší čili byla zaznamenána menší účinnost rezonátoru v blízkém okolí rezonance. Na frekvencích 630 až 4000 Hz je naopak zaznamenána menší doba dozvuku, což značí větší účinnost na vyšších frekvencích.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout akustické úpravy vybrané místnosti. V úvodních kapitolách jsou stručně shrnuty základní pojmy prostorové akustiky a také metody měření akustických parametrů uzavřených prostor. Byly přiblíženy nejpoužívanější akustické prvky pro úpravu doby dozvuku prostoru a difuzivity akustického pole. Na základě teorie byla spočítána předpokládaná doba dozvuku a vlastní kmity místnosti. Doba dozvuku byla změřena a porovnána s výpočtem. Na základě reálné doby dozvuku místnosti získané měřením jsou navrženy akustické úpravy. Cílem návrhu je splnění doporučené doby dozvuku udávanou normou ČSN 73 0526 pro poslechovou místnost.

V návrhu je kladen důraz na snížení doby dozvuku na nízkých frekvencích, které bývají nejvíce problematické a ze stavebního pohledu náročné na rozměry místnosti. Na základě teoretických znalostí a dostupných výpočetních modelů byl navržen Helmholtzův laťový rezonátor. Návrh zohledňuje rozměrové možnosti místnosti, dostatečnou mechanickou pevnost konstrukce a možnost případných úprav. Na základě předpokládané doby dozvuku po instalaci navrženého rezonátoru byly navrženy úpravy pro oblasti středních a vyšších kmitočtů. Tyto úpravy se z největší části skládají z melaminové pryskyřičné pěny Basotect G+ od firmy BASF.

Helmholtzův laťový rezonátor byl včetně konstrukce navržen a realizován svépomocí. Čelo rezonátoru tvoří soustava latí o šíři 205 mm a hloubce 25 mm s vhodně rozvrženými mezerami 7 a 14 mm. Objem rezonátoru tvoří 2 vrstvy. Jako tlumicí vrstva za latěmi byla zvolena minerální vata Knauff MPE o tloušťce 100 mm. Druhou vrstvou tvoří vzduch. Boční konstrukce jsou uzavřeny samotnými zdmi a zadní konstrukce jsou uzavřeny dřevotřískovou deskou o tloušťce 12 mm. Funkce rezonátoru byla ověřena měřením a výsledná doba dozvuku je porovnána s předpokládanou při návrhu. Z měření vyplývá, že postavené konstrukce odpovídají předpokládaným parametrům. Jsou zaznamenány odchylky v oblasti středních a vyšších kmitočtů. Důvodem těchto odchylek je, že použitý model pro návrh Helmholtzova rezonátoru uvažuje stálost zadaných parametrů. Zvolená místnost je velmi stará a má křivé zdi, což způsobilo nerovnosti v tloušťce vzduchového polštáře. Výrobce zvolené minerální vaty udává určitou minimální hodnotu průvzdušnosti, která je založena na objemové hustotě materiálu. Ve skutečnosti byla ale objemová hustota vaty velmi nevyrovnaná. Tyto

vlastnosti konstrukce ovlivňují šířku pásma působení rezonátoru, a to způsobilo odchylky, které však nejsou velké.

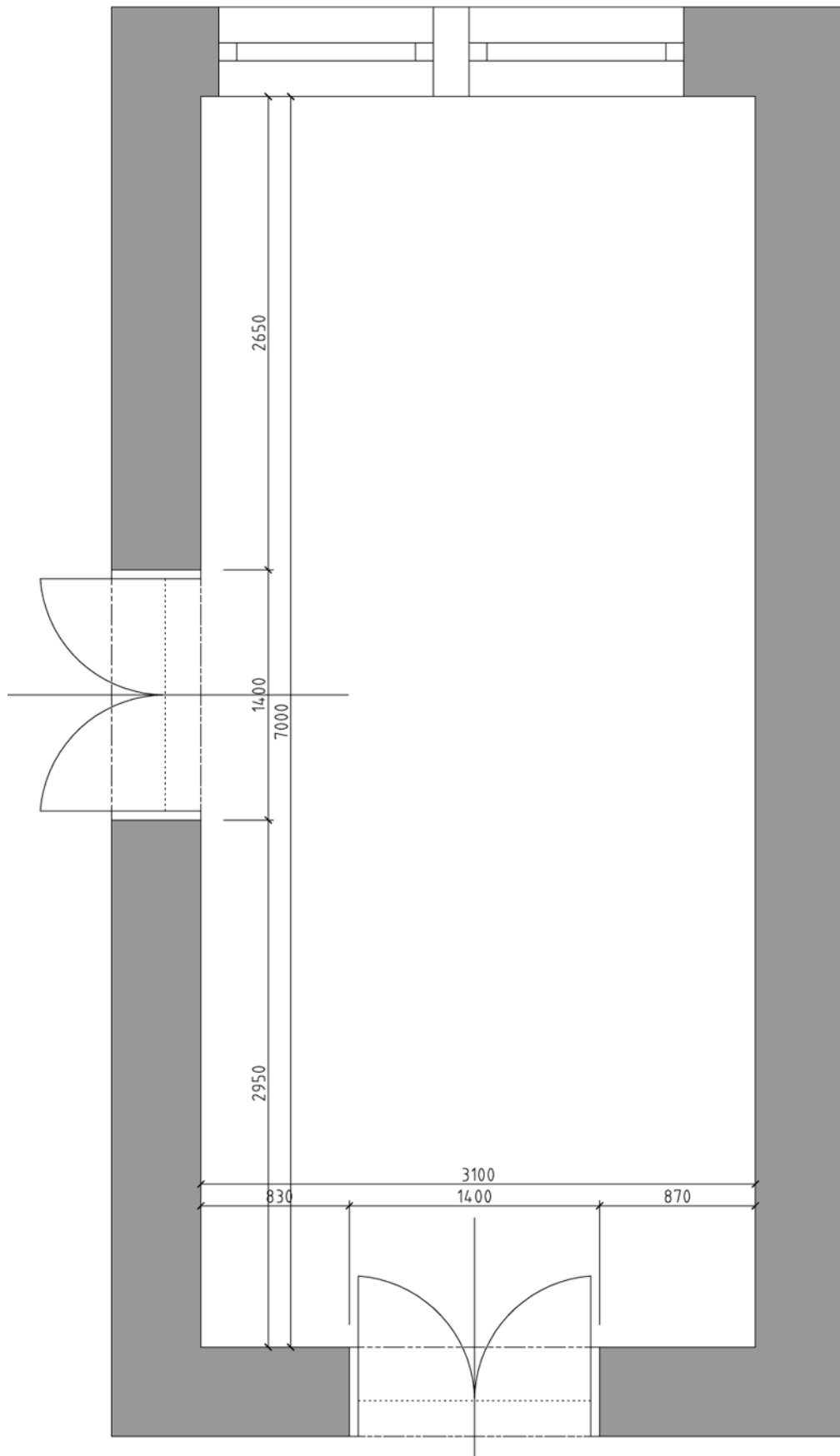
Zvolený prostor bude po kompletní instalaci akustických úprav sloužit jako poslechová místnost se zaměřením na hudební produkci a střih.

Seznam literatury a informačních zdrojů

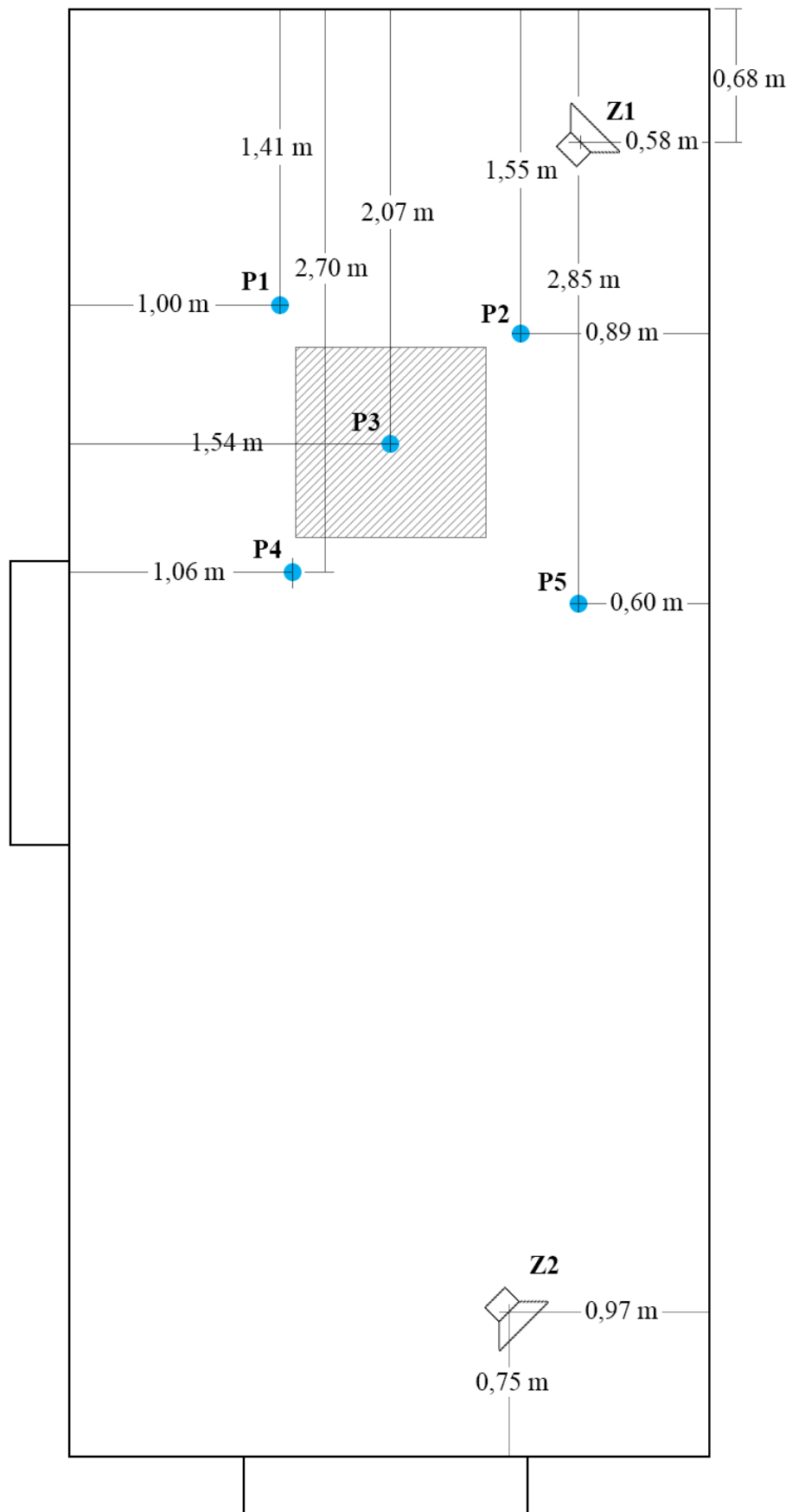
- [1] Everest, F. Alton a POHLMANN, Ken. *The Master Handbook of Acoustics – 5th Edition*. New York: McGraw-Hill, 2009. ISBN 9780071603324.
- [2] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika I*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412836
- [3] ČSN EN ISO 3382-1. *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: ÚNMZ, 2009
- [4] ČSN EN ISO 3382-2. *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: ÚNMZ, 2008
- [5] ČSN 73 0525 (730525) A *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [6] Kuttruff, Heinrich. *Room Acoustics, Fourth Edition*. London: Spon Press, 2000. ISBN 0419245804
- [7] ATS ACOUSTIC. *ATS Acoustic Diffuser* [online]. 2019 [cit. 2019-15-05]. Dostupné z: https://www.atsacoustics.com/media/images/product_detail/ADiffuserside400.png
- [8] SONIX SOUND. *Dyfuzor akustyczny schroedera 2D* [online]. 2019 [cit. 2019-15-05]. Dostupné z: <https://www.sonixsound.pl/userdata/gfx/894da733935f04cc48ddd108961be47b.jpg>
- [9] HOŘÁK, Pavel. *Měření doby dozvuku*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [10] ITU-R BS.1116-3. *Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems*. 2015. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-S!!PDF-E.pdf
- [11] *Acoustic Modelling* [online]. [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://www.acousticmodelling.com/>

Příloha A

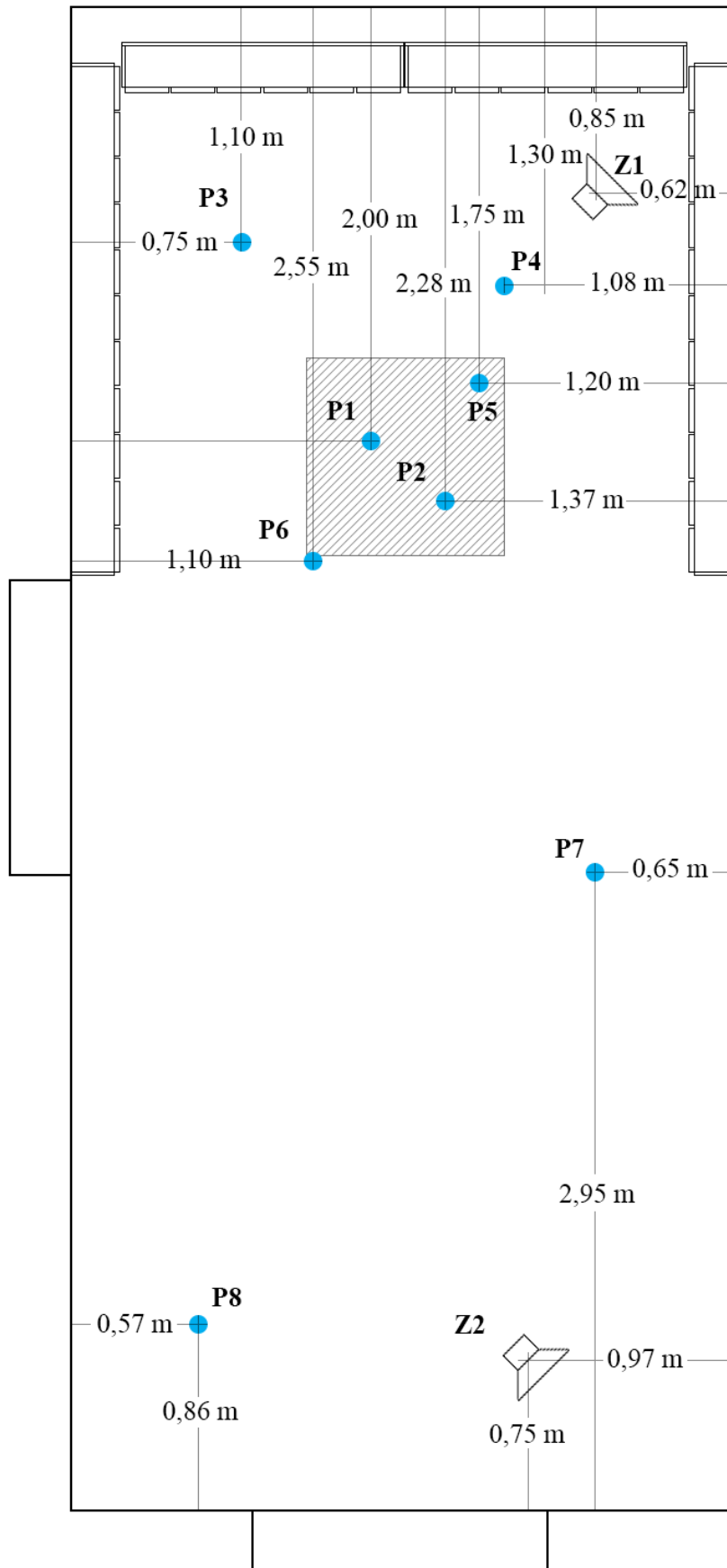
Výkresy



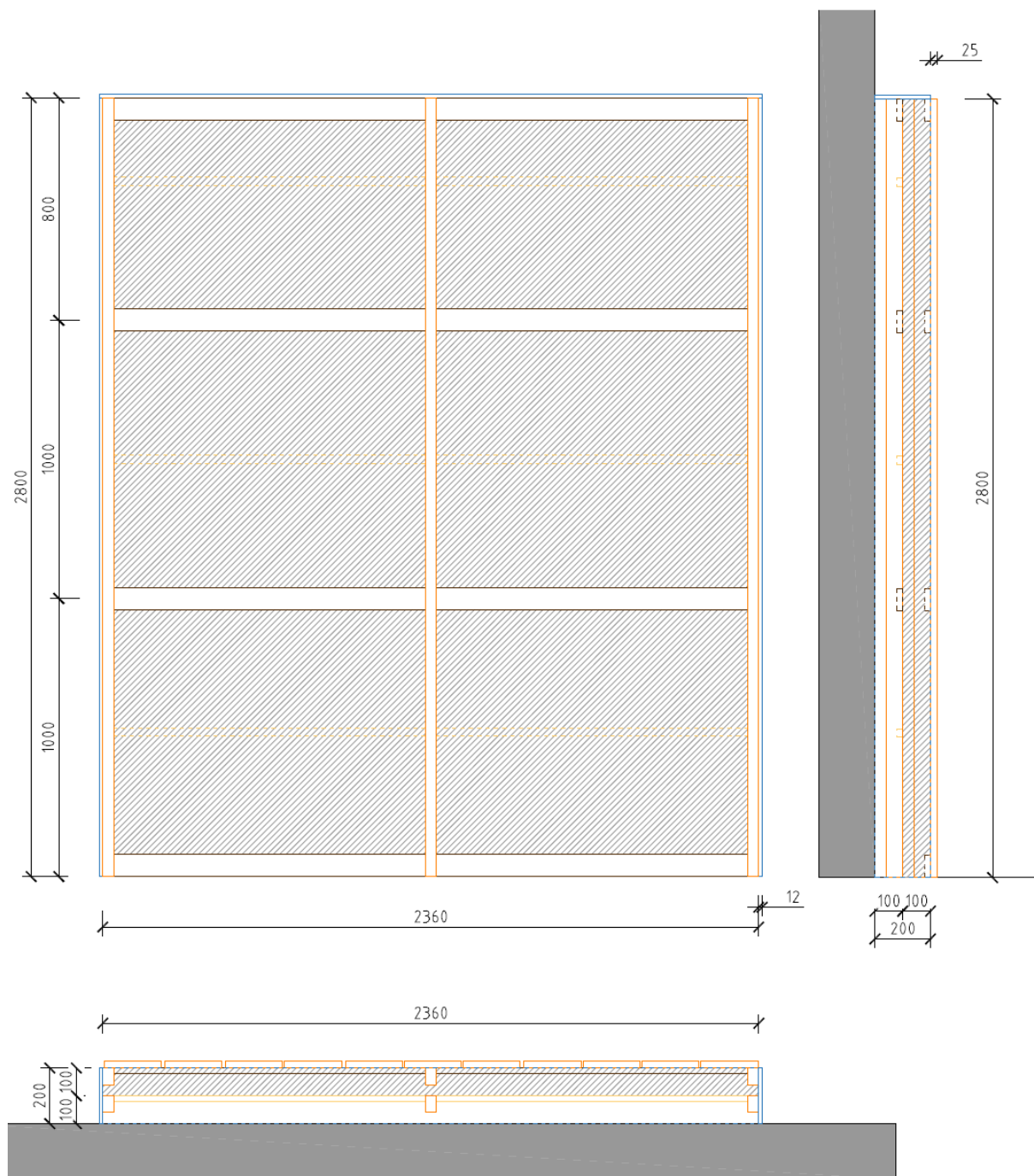
Obr. A. 1: Půdorys zvoleného prostoru



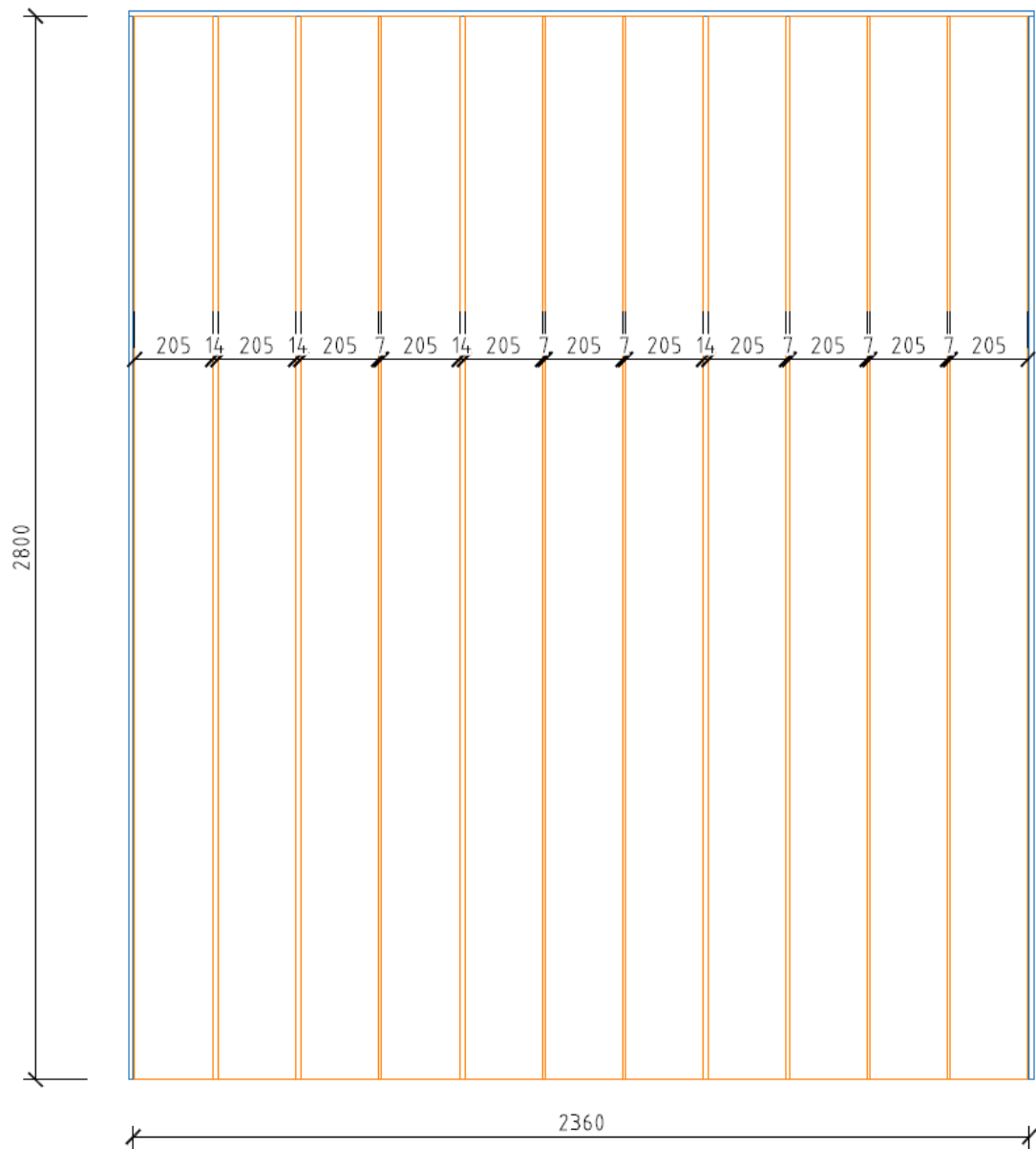
Obr. A. 2: Rozmístění pozic mikrofonů při měření doby dozvuku v prázdné místnosti



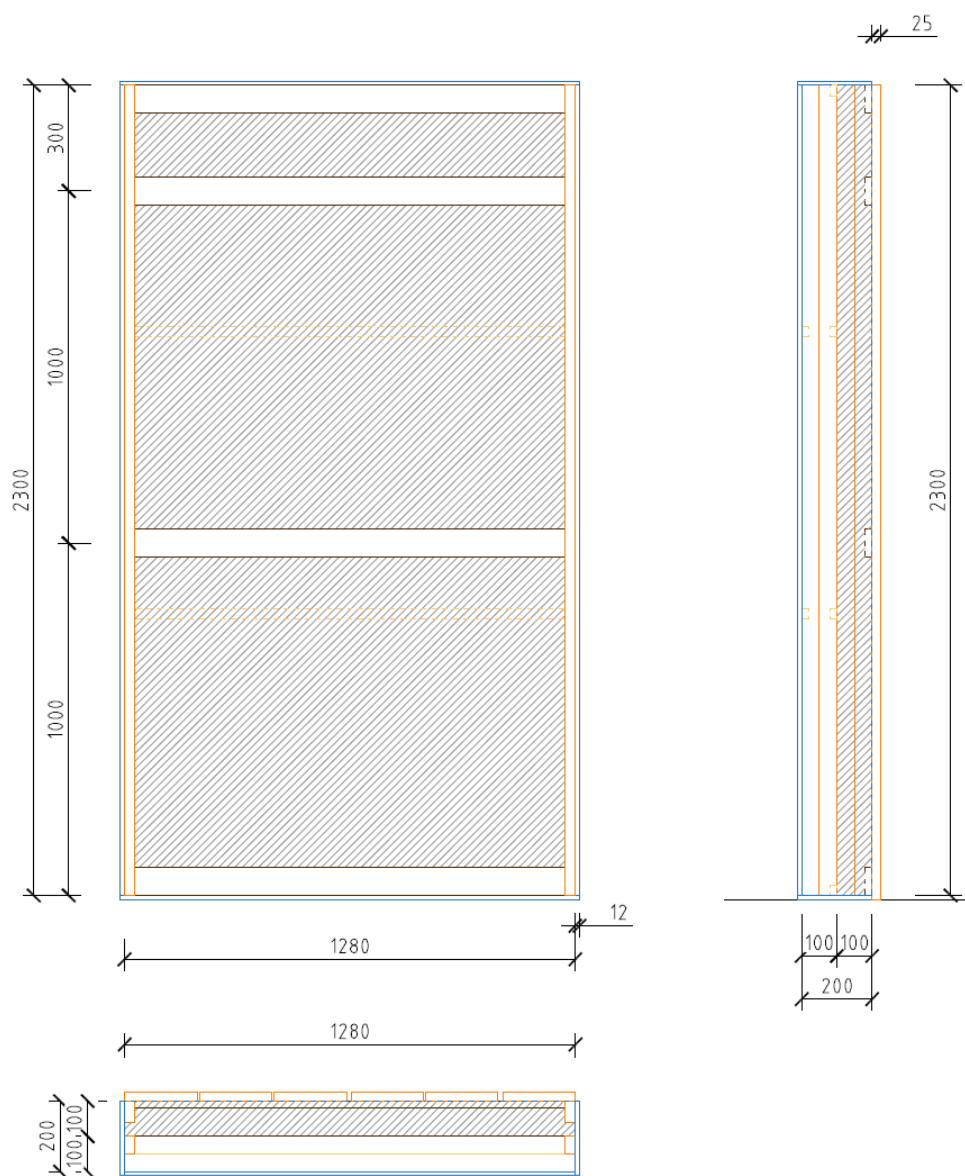
Obr. A. 3: Rozmístění pozic mikrofonů při měření doby dozvuku po instalaci úprav



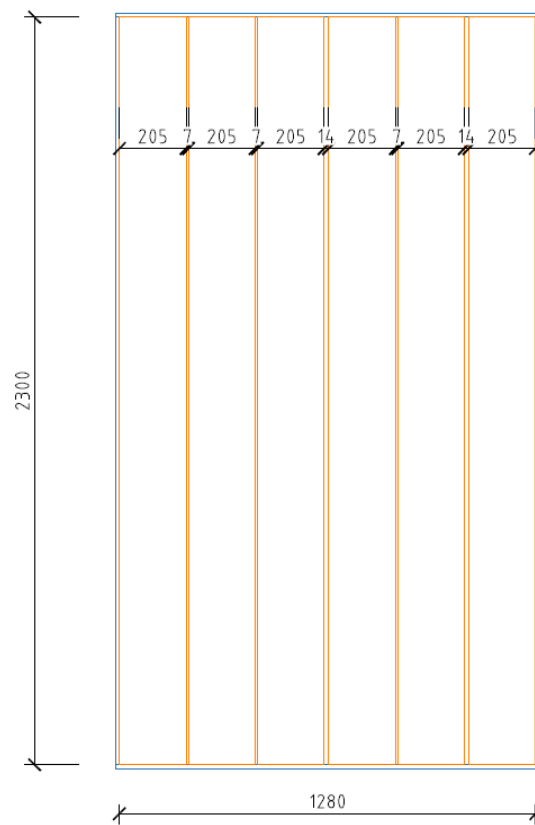
Obr. A. 4: Konstrukce navrženého Helmholtzova rezonátoru – boční stěna



Obr. A. 5: Rozmístění latí na přední stěně Helmholtzova rezonátoru – stěna vlevo



Obr. A. 6: Konstrukce navrženého Helmholtzova rezonátoru – zadní stěna



Obr. A. 7: Rozmístění latí na přední stěně Helmholtzova rezonátoru – levý zadní

Příloha B

Fotodokumentace realizace



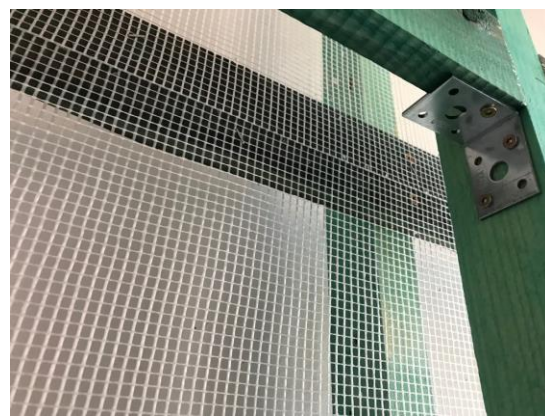
Obr. B. 1: Položení koberce Rambo 78



Obr. B. 2: Uchycení střešních latí



Obr. B. 3: Detail uchycení ke zdi



Obr. B. 4: Detail vrstvení konstrukce



Obr. B. 5: Aplikace minerální vaty Knauff MPE



Obr. B. 6: Detail aplikace minerální vaty Knauff MPE – pohled z boku



Obr. B. 7: Detail zadní konstrukce rezonátoru – pohled zespoda



Obr. B. 8: Pohled na Všechny konstrukce po aplikaci netkané mulčovací textilie



Obr. B. 9: Pohled na hotové rezonátory



Obr. B. 10: Pohled na rezonátor vlevo



Obr. B. 11: Pohled na rezonátor vpravo



*Obr. B. 12: Detail přední plochy
rezonátoru*