



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu
Helmholtzových rezonátorů

Autor práce: Josef Holát
Vedoucí práce: Ing. Stanislav Bouzek

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Josef HOLÁT**
Osobní číslo: **E17B0075P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu Helmholtzových rezonátorů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte fyzikální princip funkce Helmholtzova rezonátoru.
2. Navrhněte modulární systém pro ověření teoreticky získaných znalostí o Helmholtzových rezonátorech.
3. Ověřte vliv tvaru štěrbin na činitel zvukové pohltivosti.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. VAVERKA, J.: Stavební fyzika I., Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 8021412836.
2. KRŇÁK, M.: Akustické obklady. Praha: VÚZORT, 1971.
3. KOLMER, F.; KYNCL, J.: Prostorová akustika. Praha: SNTL, 1982.
4. COX, T.; D'ANTONIO, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers 2, Rev Ed. United Kingdom: Taylor & Francis Ltd, 2009. ISBN-10: 0415471745
5. EVEREST, F. Alton; POHLMANN, C. Ken: Master Handbook of Acoustics – 5th edition. McGraw-Hill Professional Publishing, 2009. ISBN 9780071603324.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



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



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na teorii akustických Helmholtzových rezonátorů a následný návrh akustického prvku na jejich principu. První část práce uvádí základní pojmy z oboru prostorové akustiky. Krátce zmiňuje i možnosti akustických úprav uzavřených prostorů. Navazující část se zabývá měřením vzorků v dozvukové komoře metodou přerušného šumu, která byla využita pro vlastní měření. Třetí část se věnuje teorii Helmholtzova rezonátoru a základním výpočtům jeho rezonančního kmitočtu. Na základě teoretických výpočtů byl navržen Helmholtzův rezonátor a byly změřeny jeho skutečné vlastnosti. Výsledky měření jsou zhodnoceny v závěru práce.

Klíčová slova

prostorová akustika, doba dozvuku, akustické prvky, Helmholtzův rezonátor, laťový rezonátor

Abstract

Holát, Josef. *Construction of low-frequency acoustic elements based on Helmholtz resonator principle* [*Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu Helmholtzových rezonátorů*]. Pilsen, 2020. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Stanislav Bouzek

This bachelor thesis focuses on the theory of acoustic Helmholtz resonators and the subsequent design of an acoustic element based on their principle. The first part of the thesis introduces the basic concepts of the field of room acoustics. The possibilities of acoustic modifications of enclosed spaces are also briefly mentioned. The following part deals with the measurement of samples in the reverberation chamber by the method of interrupted noise, which was used for the actual measurement. The third part deals with the theory of the Helmholtz resonator and the basic calculations of its resonant frequency. Based on theoretical calculations, a Helmholtz resonator was designed and its real properties were measured. The measurement results are evaluated at the end of the work.

Keywords

room acoustics, reverberation time, acoustic elements, Helmholtz resonator, slotted panel

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské 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 bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 15. června 2020

Josef Holát

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
1 Úvod	1
2 Prostorová akustika	2
2.1 Pole přímých a odražených vln	2
2.2 Doba dozvuku	3
2.3 Činitel zvukové pohltivosti	4
2.4 Akustické úpravy uzavřených prostorů	5
2.5 Materiály a konstrukce používané pro pohlcování a rozptylování zvuku	5
3 Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti	8
3.1 Měření doby dozvuku	8
3.1.1 Metoda přerušného šumu	9
3.2 Určení činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti	11
4 Helmholtzův rezonátor	12
4.1 Laťový rezonátor	15
4.2 Tlumení Helmholtzova rezonátoru	17
4.3 Vliv rozdělení vzduchového polštáře	20
5 Návrh modulárního systému pro měření Helmholtzových rezonátorů	21
5.1 Popis konstrukce	21
5.2 Teoretické vlastnosti	24
6 Měření vzorků rezonátorů v dozvukové komoře	26
6.1 Výsledky měření	29
7 Závěr	33
Reference, použitá literatura	35

Přílohy	37
A Obrázky	37
B Tabulky	42

Seznam obrázků

2.1	Pokles intenzity zvuku v uzavřeném prostoru v závislosti na čase po vypnutí zvukového zdroje Převzato z [2] 	3
2.2	Energetická bilance pro dopad zvukové energie na stěnu	4
2.3	Typy porézních materiálů	6
2.4	Kmitající panel Převzato z [17] 	6
2.5	Typy Helmholtzova rezonátoru	7
2.6	Typy rozptylových prvků	7
3.1	Blokové schéma pro měření doby dozvuku	9
3.2	Určení doby dozvuku z dozvukové křivky Převzato z [1] 	10
4.1	Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy Převzato z [2] 	12
4.2	Schématické znázornění Helmholtzova rezonátoru Převzato z [2] 	13
4.3	Řez Helmholtzovým rezonátorem (děrovanou deskou) s kruhovým otvorem	13
4.4	Závislost koncové korekce K_I na činiteli děrování pro kruhové, čtvercové a obdélníkové otvory (pro měření v interferometru) Převzato z [2] 	14
4.5	Schématické znázornění pohledu na laťový rezonátor Převzato z [8] 	15
4.6	Korekční součinitel pro lať konečné délky Převzato z [9] 	16
4.7	Korekční součinitel pro lať nekonečné délky Převzato z [9] 	16
4.8	Diagram k určení rezonanční frekvence pro děrované desky (A: rovnice 4.13) a laťový rezonátor (B: rovnice 4.15) Převzato z [9] 	17
4.9	Znázornění umístění porézního materiálu pokrytého fólií	18
4.10	Kmitočtové závislosti α_0 pro různá tlumení rezonátoru s poměrem $l/d = 4$ Převzato z [2] 	19
4.11	Kmitočtová závislost rezonátorů s různým poměrem l/d v případě, že $r = z_0$ Převzato z [2] 	19
4.12	Vliv kazetování vzduchového polštáře na činitel zvukové pohltivosti různý- ných konstrukcí Převzato z [3] 	20
5.1	Půdorys dozvukové místnosti se znázorněním variant umístění na zeď	22
5.2	Vizualizace rozložené části modulárního systému s popisem částí	23
5.3	Vizualizace jedné sekce modulárního systému s rozestupy čelních latí 44 mm	23

5.4	Teoretické rezonanční kmitočty navrženého rezonátoru v závislosti na hloubce d a šířce mezery mezi latěmi b	25
6.1	Konstrukce před vložením vaty	27
6.2	Poloha měřeného vzorku v dozvukové komoře	28
6.3	Blokové schéma zapojení měření doby dozvuku v dozvukové komoře	28
6.4	Detail na měřené varianty štěrbinu Helmholtzova rezonátoru	30
6.5	Činitel zvukové pohltivosti α_S pro polohu zdroje Z1	31
6.6	Činitel zvukové pohltivosti α_S pro polohu zdroje Z2	32
6.7	Činitel zvukové pohltivosti α_S zprůměrovaný z měření s dvěma pozicemi zdrojů	32
A.1	Celkový pohled na rezonátor umístěný v komoře	37
A.2	Rozložení čelních latí pro variantu mezery 4 mm	38
A.3	Rozložení čelních latí pro variantu mezery 19 mm	38
A.4	Rozložení čelních latí pro variantu mezery 44 mm	39
A.5	Nákres jedné sekce rezonátoru	40
A.6	Rozměry dozvukové komory, polohy mikrofónů Převzato z [10] 	41

Seznam tabulek

3.1	Střední kmitočty třetinooktávových pásem pro měření v dozvukové místnosti [4]	11
5.1	Varianty nastavení hloubky dutiny rezonátoru	21
5.2	Seznam dřevěných částí konstrukce s jejich rozměry a počtem.	24
5.3	Návrh rezonátoru - rozměry rezonátoru	24
6.1	Doba dozvuku prázdné dozvukové komory	26
6.2	Poloha měřeného vzorku v dozvukové komoře	28
6.3	Měřicí přístroje	28
6.4	Předpokládaná a změřená rezonanční frekvence měřených variant	29
6.5	Celková plocha prken a štěrbin s odpovídajícím činitelem děrování	29
6.6	Doba dozvuku se vzorkem ve variantě šířky štěrbin 19 mm	30
B.1	Skupiny mikrofonů a jejich polohy v dozvukové komoře	42
B.2	Polohy zdroje v dozvukové komoře	42
B.3	Měřicí podmínky a konfigurace	43
B.4	Doba dozvuku všech tří variant šířky štěrbin měřeného vzorku	44

Seznam symbolů a zkratek

B	Šířka latě
I	Intenzita zvuku
K_E	Ingardův korekční součinitel pro obdélníkový otvor rezonátoru
K_I	Ingardův korekční součinitel pro kruhový otvor rezonátoru
L_p	Hladina akustického tlaku
P	Výkon
Q	Činitel směrovosti zdroje, činitel jakosti
RPG	Reflection Phase Grating. Akustická difrakční mřížka
2D QRD	Two dimensional Quadratic Residue Diffuser, Dvourozměrný kvadratický difuzor
R_a	Akustický odpor
S	Plocha
S_o	Průřez hrdla rezonátoru, celková plocha otvorů
S_d	Průřez dutiny rezonátoru
T	Doba dozvuku
T_S	Doba dozvuku podle Sabina
V	Objem
W	Akustická energie
a	Délka štěrbiny
b	Šířka štěrbiny
c	Rychlost šíření zvuku
c_a	Akustická poddajnost
d	Hloubka vzduchového polštáře
f	Kmitočet
f_0	Rezonanční kmitočet
k_0	Konstanta vlnové délky na rezonančním kmitočtu
l	Tloušťka, délka hrdla rezonátoru
m_a	Akustická hmotnost
r	Měrný akustický odpor
r_k	Kritická vzdálenost
t	Doba, čas
v	Rychlost

z_0	Vlnový odpor vzduchu
α	Činitel zvukové pohltivosti
α_s	Činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad
ε	Činitel děrování
ρ	Hustota vzduchu

1

Úvod

Na kvalitu poslechu hudby nebo řeči má velký vliv prostor, ve kterém se nacházíme. Jeho akustické parametry jsou ovlivněné řadou faktorů, mezi něž patří jeho rozměry a geometrie, použité materiály, konstrukce stěn a vnitřní vybavení různými užitkovými a okrasnými předměty. Například nedostatečná zvuková pohltivost prostoru může nepřírozně prodlužovat dobu dozvuku a tím zhoršovat srozumitelnost mluveného slova. Důležitým parametrem je i rozložení akustického pole, které by mělo být rovnoměrné alespoň v uvažovaném místě poslechu.

Dříve nebylo nutné v běžných domácnostech dodatečně řešit jejich akustickou kvalitu, protože používané materiály a množství nábytku vedly na přirozený akustický projev prostoru. Dnešní čistý moderní design, používané tvrdé materiály s velmi nízkou zvukovou pohltivostí a velikost prostorů ale vyžadují řešení prostorové akustiky i v domácnostech. Řešení akustických parametrů je samozřejmě nutné u prostorů přímo určených k přednesu hudby či řeči, jako jsou koncertní sály, divadla, kulturní domy, posluchárny či stadiony. Při jejich návrhu je nutno uvažovat jejich akustické vlastnosti a přizpůsobit tomu povrch či tvar stěn, použití závěsů nebo umístění nábytku. Ve velké míře se využívá akustických obkladů, které se objevují v řadě konstrukčních a designových provedení. Na první pohled nemusí být patrné nebo naopak mohou utvářet zajímavý design celého interiéru.

Teoretické informace jsem čerpal především z česky psaných publikací zabývajících se prostorovou akustikou. V některých je uveden přímo i způsob návrhu akustických obkladů na rezonančním principu, jako třeba v [2] a [3]. Některé publikace obsahují také naměřené parametry některých konstrukčních řešení. Tématu Helmholtzových rezonátorů se většinou věnují jen okrajově a obecně, často ani nezmiňují speciální případ, tzv. laťový rezonátor, který je předmětem této práce. Více informací lze najít v zahraniční literatuře, například v [8] a [9]. K návrhu lze využít i softwarové kalkulátory, které ale mohou využívat rozdílné způsoby výpočtu.

Pro ověření teoretických vlastností se často využívá měření vzorku v dozvukové komoře. Využití univerzální konstrukce s nastavitelnými parametry zjednodušuje realizaci vzorku s požadovanými vlastnostmi.

2

Prostorová akustika

Náplní oboru prostorové akustiky je studium akustických jevů v uzavřených prostorech z hlediska dobré slyšitelnosti a srozumitelnosti přenášeného zvuku. Ke zjištění podmínek optimální akustičnosti prostoru bývají použity metody geometrické a statistické akustiky. V některých případech lze pro řešení využít vlnové rovnice s danými okrajovými podmínkami. Měření doby dozvuku uzavřených prostorů se věnuje norma ČSN ISO 3382–2.

Při působení zdroje zvuku v uzavřeném prostoru vzniká akustické pole tvořené především souborem vlastních kmitů, které jsou vytvářeny při shodě budícího kmitočtu a vlastního kmitočtu místnosti. Toto pole je v oblasti nejnižších kmitočtů nevyrovnané, jelikož při nízkých frekvencích je počet vlastních kmitů malý a kmity jsou rozloženy nerovnoměrně. [1]

2.1 Pole přímých a odražených vln

Charakter akustického pole se mění v závislosti na vzdálenosti od zdroje, kdy v jeho blízkosti vzniká pole přímých vln, které mají charakter vyzařování do volného pole, i když se jedná o uzavřený prostor. Od určité vzdálenosti začíná převládat pole odražených vln, ve kterém průměrná hladina akustického tlaku téměř nezávisí na vzdálenosti. Hranice změny je dána tzv. kritickou vzdáleností r_k , která je dána vztahem: [1]

$$r_k = 0,057 \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T}} \quad [m; -, m^3, s] \quad (2.1)$$

kde Q je činitel směrovosti zdroje, V objem místnosti a T doba dozvuku.

Činitel směrovosti udává jedním číslem poměr intenzity zvuku vyvolané v určité vzdálenosti a směru ve volném poli oproti intenzitě, kterou by vyvolal v téže vzdálenosti zdroj s kulovou charakteristikou. [1]

2.2 Doba dozvuku

Uvnitř uzavřeného prostoru s aktivním zdrojem zvuku nastává ustálený stav, kdy energie pohlcována stěnami je neustále doplňována zdrojem. V okamžiku vypnutí zdroje začne vlivem pohltivosti stěn a vzduchu zvuková energie v prostoru ubývat, načež bude za určitou dobu zcela pohlcena. Zvuk šířící se po vypnutí zdroje se nazývá dozvuk a doba, po kterou dozvuk existuje, je doba dozvuku. Standardní doba dozvuku je definována jako doba, za kterou hustota energie nebo intenzita zvuku klesne po vypnutí zdroje na 10^{-6} původní hodnoty, neboli o 60 dB. [2]

V normě [4] o měření zvukové pohltivosti je pro výpočet doby dozvuku použita Sabineova rovnice, proto je dále uvedena doba dozvuku podle Sabina, který předpokládal plynulé pohlcování zvukové energie stěnami. Doba dozvuku podle Sabina T_S je tedy dána vztahem: [2]

$$T_S = 0,161 \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad [s; m^3, -, m^2] \quad (2.2)$$

kde V je objem místnosti, α činitel zvukové pohltivosti a S součet ploch všech stěn.

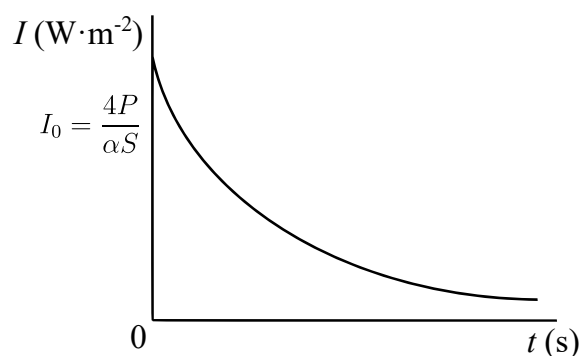
Po experimentálním ověření však bylo zjištěno, že pro dobu dozvuku více vyhovuje výraz s upravenou konstantou: [2]

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad [s; m^3, -, m^2] \quad (2.3)$$

V případě, že všechny stěny nemají stejný činitel zvukové pohltivosti, dosadíme do rovnice 2.3 průměrnou hodnotu vypočítanou podle: [2]

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad [-; m^2] \quad (2.4)$$

kde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ jsou činitele zvukové pohltivosti různých stěn, případně jejich částí, o plochách S_1, S_2, \dots, S_n a S je celková plocha místnosti. [2]



Obr. 2.1: Pokles intenzity zvuku v uzavřeném prostoru v závislosti na čase po vypnutí zvukového zdroje [Převzato z [2]]

Sabineův vztah je používán hlavně pro jeho jednoduchost, ale není zcela ideální. Hodí se pro použití u místností s malým činitelem zvukové pohltivosti, nepřesahujícím $\alpha = 0,25$.

Ze vzorce je totiž patrné, že při $\alpha = 0$ by byla doba dozvuku nekonečně dlouhá. Zároveň i pro opačnou mezní hodnotu $\alpha = 1$ by vzorec selhal, jelikož doba by se podle něj rovnala 0,164 násobku poměru V/S , což není pravda. V tomto případě by měl být výsledek nulový. Proto jsou pro prostory s vyšší střední hodnotou zvukové pohltivosti používány vzorce podle Eringa, případně pro prostory s $\alpha > 0,8$ se více hodí výpočet podle Millingtona. [2]

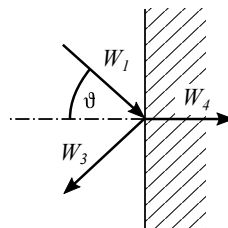
2.3 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost tělesa pohlcovat zvuk je charakterizována hodnotou zvukové pohltivosti α , který je definován vztahem 2.6. Činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo v intervalu od 0 do 1, případně může být vyjádřen v procentech. U stěny dokonale odražející zvuk je roven 0, naproti tomu u stěny dokonale pohlcující zvuk se rovná 1. [2]

$$\text{Pohlčená energie } W_4 \qquad W_4 = W_1 - W_3 \quad [W] \qquad (2.5)$$

kde W_1 je dopadající energie a W_3 energie od stěny odražená. Pro činitel zvukové pohltivosti lze tedy psát

$$\alpha = \frac{W_4}{W_1} \quad [-; W] \qquad (2.6)$$



Obr. 2.2: Energetická bilance pro dopad zvukové energie na stěnu

Vztah 2.6 předpokládá kolmý dopad na stěnu, což je nejjednodušší případ obecného dopadu, obecně však dochází k dopadu pod jakýmkoliv úhlem. Při rovnoměrném zastoupení všech směrů šíření vzniká v uzavřeném prostoru takzvané difuzní zvukové pole. V takovém poli dopadá na povrch zvukové vlnění ze všech směrů rovnoměrně, potom se jedná o činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvuku. [2]

Z rovnice 2.6 pro zvukovou pohltivost lze určit následující vztah pro pohlčenou energii: [2]

$$W_4 = \alpha \cdot S \cdot W_1 \quad [W; -, m^2, W] \qquad (2.7)$$

kde S je velikost plochy. Součin αS udávaný v m^2 se nazývá pohltivost stěny, kdy dokonale pohltivá plocha je představována otvorem ve stěně, kterým prochází veškeré vlnění dopadající na tento otvor a ke zpětnému odrazu vůbec nedochází. Činitel zvukové pohltivosti stěny je závislý na úhlu a kmitočtu dopadajícího zvukového vlnění. [2]

2.4 Akustické úpravy uzavřených prostorů

Jedná-li se o objekt, který má být teprve vybudován, je třeba definovat účel využití prostoru a na základě toho zvolit vhodné akustické parametry. Při návrhu je třeba si uvědomit rozlišovací schopnosti lidského sluchového orgánu, kdy při předepisování kvality akustiky prostoru není třeba jít za určitou mez přesnosti, jelikož lidské ucho velmi malé rozdíly u některých parametrů nerozezná. Dále je třeba navrhnout vhodný tvar prostoru, správně volit materiály, optimálně umístit zvukové zdroje a zvolit místo poslechu. Tyto faktory mohou mít vliv na některá frekvenční pásma, kdy může docházet k jejich nerovnoměrnému tlumení, čímž může být negativně ovlivněn průběh frekvenční charakteristiky zdroje zvuku. Takto lze však postupovat jen při návrhu nového prostoru v přímé spolupráci s architektem. Pokud to není možné je nutné ověřit objektivní akustické parametry prostoru výpočtem, modelem nebo nejlépe měřením. [2]

Časté jsou případy, kdy je nutné upravit stávající prostor. Nejdříve je tak třeba posoudit vlastnosti prostoru před úpravou. Při úpravách je nutné řešit objektivní měřitelné vlastnosti akustického pole i subjektivní parametry akustické kvality poslechových míst, jelikož o dobré akustice rozhoduje právě subjektivní hodnocení kvality poslechu. [2]

2.5 Materiály a konstrukce používané pro pohlcování a rozptylování zvuku

Různými materiály, konstrukcemi a jejich uspořádáním lze upravit dobu dozvuku, zvýšit srozumitelnost nebo snížit hluk v uzavřeném prostoru. Materiál je volen na základě akustických požadavků, estetiky, hygienických požadavků a dalších kritérií. Vlastnosti materiálu jsou reprezentovány činitelem zvukové pohltivosti, který je závislý na kmitočtu a směru dopadu zvukové vlny. Pro pouze kolmý dopad se značí α a pohybuje se v rozmezí 0 až 1 (více v kap. 2.3). Při měření v dozvukové komoře se určuje činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad α_S (více v kap. 3.2). Popis hodnocení zvukové pohltivosti absorbérů zvuku používaných v budovách je uveden v normě ČSN ISO 11654. [1]

Z hlediska uspořádání lze akustické materiály a konstrukce rozdělit na porézní a vláknité materiály, kmitající desky a membrány, rezonátory a rozptylové prvky. [1]

Pro porézní materiály je důležitá tloušťka materiálu, tloušťka vzduchového polštáře a uspořádání pórů. V porézní struktuře dochází k nevratné změně zvukové energie na tepelnou prostřednictvím tření, relaxací akustického tlaku nebo nepružnou deformací. Mezi tyto materiály se řadí výrobky ze skelných a minerálních vláken, textilie, stříkaná vlákna a další. Ukázka kamenné vaty a akustické pěny je na obr. 2.3. [1]

Kmitající panely jsou tvořeny tuhou deskou pružně uchycenou na uzavřeném rámu. K tlumení dochází vlivem mechanických ztrát v uložení desky a odporem vzduchového polštáře proti stlačení, který je obvykle ztlumen porézním materiálem. Membrány jsou oproti panelům tenké a jejich tuhost v ohybu je ve srovnání s tuhostí vzduchového polštáře



(a) Kamenná vata [Převzato z [14]]



(b) Akustická pěna [Převzato z [15]]

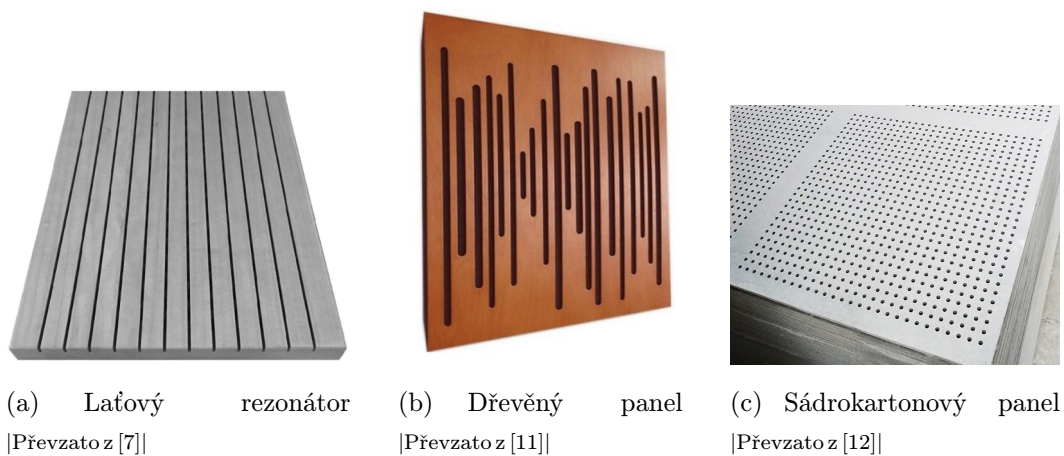
Obr. 2.3: Typy porézních materiálů

mezi membránou a stěnou nepatrná. Ukázka realizace je na obr. 2.4. [1]

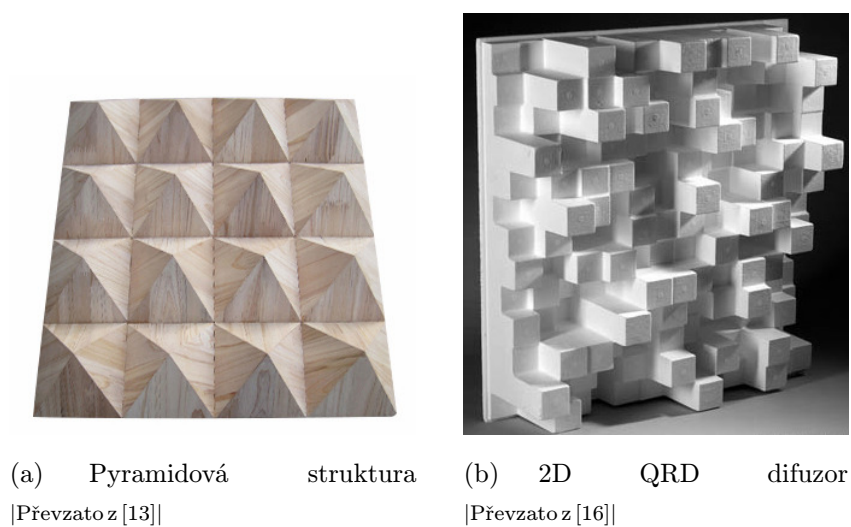
**Obr. 2.4:** Kmitající panel [Převzato z [17]]

Dutinové rezonátory jsou uváděny do stavu nuceného kmitání, kdy amplituda kmitů je nejvyšší na vlastním kmitočtu soustavy. Tyto kmity musí být tlumeny přeměnou energie na teplo. Rezonátory jsou tvořeny děrovanými deskami se vzduchovým polštářem, který je obvykle tlumen pohltivým materiálem. Rezonátory lze naladit na libovolný kmitočet v rozsahu od desítek Hz do jednotek kHz. O těchto tzv. Helmholtzových rezonátorech je uvedeno více v kap. 4 a ukázky jejich provedení jsou na obr. 2.5. [1]

Poslední možností jsou rozptylové prvky, kdy je zvuk vhodně odražen reliéfy různých tvarů. Důležitou vlastností je rozměr těchto tvarů v závislosti na vlnové délce dopadajících zvukových vln. Ideálně by měli odrážet zvuk do celé poloviny v co nejširším kmitočtovém rozsahu. Mezi tyto prvky patří i tzv. RPG (Reflection Phase Grating) difuzní panely, které tvoří tzv. akustickou difrakční mřížku. Na obr. 2.6a je vidět pyramidový reliéf a na obr. 2.6b je dvourozměrný kvadratický difuzor. [1]



Obr. 2.5: Typy Helmholtzova rezonátoru



Obr. 2.6: Typy rozptylových prvků

3

Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti

Teoretické výpočty vlastností zvukových obkladů je třeba před praktickou aplikací ověřit měřením vzorků o poměrně velké ploše v dozvukové místnosti. Při působení zdroje zvuku v uzavřeném prostoru je hladina akustického tlaku a následující doba dozvuku po vypnutí zdroje dána pohltivými vlastnostmi povrchů stěn, vzduchu vyplňujícího daný prostor a předmětů v tomto uzavřeném prostoru. Míra pohlcené energie závisí i na úhlu dopadu zvukové vlny. V uzavřených prostorech dochází při vhodné orientaci zdroje zvuku k dopadu ve velkém rozptylu velikostí úhlů a proto je možné počítat s rovnoměrným úhlovým rozložením. Zároveň zvukové pole se v ideální dozvukové místnosti nebo v dozvukové místnosti splňující normu ČSN EN ISO 354 blíží svými vlastnostmi tzv. difuznímu zvukovému poli, kdy akustická intenzita není závislá na místě měření. Dopad zvuku na povrch prostoru je poté nazýván jako náhodný dopad. [4][2]

Měřený vzorek musí mít plochu 10 m^2 až 12 m^2 . V případně místnosti s objemem větším než 200 m^3 se horní hranice plochy měřeného vzorku zvýší činitelem $(V/200)^{2/3}$. Dále musí být vzorek pravoúhlý s poměrem šířky k délce mezi 0,7 a 1. Vzdálenost od každé stěny místnosti by měla být alespoň 1 m, musí být alespoň 0,75 m. Dále by hrana nejbližší stěně neměla být s touto stěnou rovnoběžná. V případě potřeby lze velké těžké vzorky připevnit svisle ke stěnám doléhajíc na podlahu. V tomto případě nemusí být splněn požadavek na minimální vzdálenost 0,75 m od stěny místnosti. [4]

3.1 Měření doby dozvuku

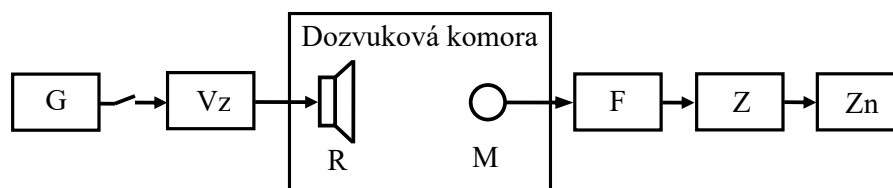
Doba dozvuku je jedním ze základních parametrů prostorové akustiky a má vliv na srozumitelnost řeči a hudby. Účelem měření je ověřit dozvukovou křivku, kterou by při znalosti všech vlastností prostředí bylo možné teoreticky spočítat, jak bylo uvedeno dříve. V případech, kdy nejsou známy všechny parametry prostoru, nebo je třeba ověřit teoretické hodnoty, lze využít způsoby měření uvedené v normě ČSN EN ISO 354, která popisuje

dvě možné metody. Tou první je metoda přerušného šumu, kdy je třeba pro správný výsledek změřit více dozvukových křivek a výsledek následně zprůměrovat. Druhou je metoda integrované impulsové odezvy. Níže bude popsána metoda přerušného šumu.

Prostorově vyhodnocovaných křivek musí být nejméně dvanáct a nesmí se žádným způsobem sdružovat. Tím pádem je třeba alespoň dvanáct měřících míst pro jednu polohu zdroje. Zdroj musí být postupně umístěn minimálně ve dvou pozicích. Mikrofony musí mít všesměrovou charakteristiku a vzdálené navzájem musí být alespoň 1,5 m, zároveň od zdroje zvuku 2 m a od jakéhokoliv povrchu, včetně zkušební vzorku, 1 metr. [4]

3.1.1 Metoda přerušného šumu

Nejprve je nutné místnost nabudit zdrojem zvuku, do kterého je zaveden pásmový, nebo širokopásmový šum se spojitým spektrem. Při použití pásmového šumu musí být šířka pásma alespoň jedna třetina oktávy. Pokud je použit širokopásmový šum, tak hladiny akustického tlaku v sousedních pásmech se musí lišit o méně než 6 dB. Buzení musí probíhat dostatečně dlouho na to, aby se ustálila hladina akustického tlaku ve všech uvažovaných kmitočtových pásmech, nejméně však polovině očekávané doby dozvuku. [4]



G - generátor šumového signálu

Vz - výkonový zesilovač

Z - zesilovač

F - filtr

Zn - záznam

R - reproduktor

M - mikrofón

Obr. 3.1: Blokové schéma pro měření doby dozvuku

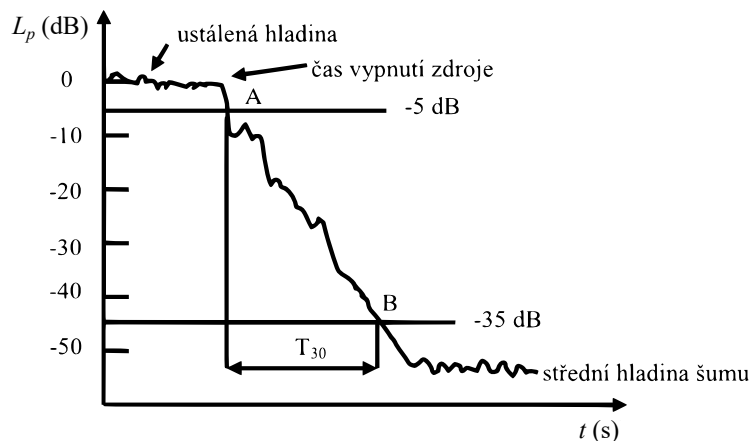
Pokud má budicí signál šířku pásma větší než jednu třetinu oktávy, mohou rozdílné doby dozvuku sousedních třetinooktávních pásem ovlivnit spodní část dozvukové křivky. Liší-li se doby dozvuku v sousedních pásmech více než 1,5krát od měřeného pásma, je nutno tyto křivky zaznamenat samostatně použitím zdroje s třetinooktávním filtrem. [4]

Zdroj zvuku pro buzení dozvukové místnosti musí mít dostatečný výkon na to, aby dolní hladina vyhodnocovaného rozmezí byla nejméně 10 dB nad hladinou akustického tlaku pozadí. Zároveň musí být všesměrový, s činitelem směrovosti maximálně do 6 dB. [4][1]

Doba dozvuku se určí z úseku dozvukové křivky, ve kterém křivka poklesla z -5 dB na -35 dB oproti počáteční úrovni. Tento úsek je na obr. 3.2 vyznačen jako T_{30} a je to doba, za kterou hladina akustického tlaku poklesla o 30 dB. Standardní doba dozvuku

T_{60} je však brána pro pokles o 60 dB, protože se předpokládá lineární pokles, lze ji získat jednoduše: [1]

$$T_{60} = 2 \cdot T_{30} \quad [s] \quad (3.1)$$



Obr. 3.2: Určení doby dozvuku z dozvukové křivky |Převzato z [1]|

Pro redukování nejistoty měření je nezbytné průměrování několika náměrů. Ty musejí být alespoň tři, pokud má být výsledná opakovatelnost ve stejné kategorii, jako opakovatelnost integrované impulsové odezvy, musí být průměr určen z deseti měřených průběhů. [4]

Výsledky lze průměrovat dvěma různými způsoby. První možností je metoda skupinového průměrování, kdy jsou průměrovány dozvukové křivky pro jednu konfiguraci mikrofon/reproduktor podle vztahu: [4]

$$L_p(t) = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad [dB] \quad (3.2)$$

kde $L_p(t)$ je hladina průměrného akustického tlaku v čase t vypočítaná pro celkový počet N pokusů a $L_{pn}(t)$ je hladina akustického tlaku n -tého poklesu v čase t . [4]

Druhou metodou, kterou lze použít v případech, kdy není možné provést skupinové průměrování, je nejdříve vyhodnotit jednotlivé dozvukové křivky a následně spočítat aritmetický průměr změřených hodnot T_{30} .

Měření se provádí v třetinooktákových pásmech se středními kmitočty většinou v rozsahu 100 Hz až 5 kHz, jak ukazuje i tabulka 3.1. Výsledné hodnoty lze zapsat do tabulky, nebo vynést do diagramu, na jehož vodorovné ose jsou vyznačeny střední kmitočty třetinooktákových pásem. [1][4]

f [Hz]					
100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250
1600	2000	2500	3150	4000	5000

Tab. 3.1: Střední kmitočty třetinooktávových pásem pro měření v dozvukové místnosti [4]

3.2 Určení činitele zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti

Pro praktické použití je definován činitel zvukové pohltivosti α_S jako poměr ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku k ploše zkušební vzorku. Jeho rozsah hodnot by měl být teoreticky stejný jako u α , ale například vlivem ohybového jevu může jeho naměřená velikost překročit hodnotu 1,0. Měření spočívá v rozdílu doby dozvuku prázdné komory a komory s umístěným vzorkem. Jelikož plocha vzorku v porovnání s plochami podlahy, stěn a stropu tvoří asi jen 5 %, je výsledný činitel zvukové pohltivosti nízký a lze tedy při konstantní teplotě a vlhkosti během měření použít následující Sabineův vzorec: [3][4]

$$\alpha_S = \frac{0,164 \cdot V}{S_2} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad [-; m^3, m^2, s, s] \quad (3.3)$$

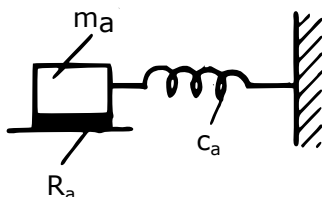
kde V je objem dozvukové místnosti, S_2 plocha měřeného vzorku, T_1 doba dozvuku prázdné místnosti a T_2 doba dozvuku místnosti se vzorkem.

Vztah také nezahrnuje změny ztrát při šíření zvuku vzduchem. Ale jak již bylo uvedeno, tento vztah počítá s konstantní teplotou a vlhkostí během měření všech konfigurací mikrofónů a zdrojů a při měření prázdné komory. Za dodržení této podmínky není třeba vliv ztrát ve vzduchu uvažovat. [3]

4

Helmholtzův rezonátor

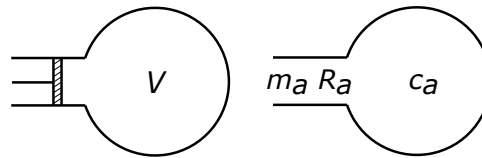
Helmholtzův rezonátor se řadí společně s kmitajícími membránami a kmitajícími deskami mezi akustické obklady založené na rezonančním principu. Může být použit samostatně, nebo může tvořit tzv. děrovanou desku, kdy v této formě má oproti jiným řešením řadu výhod. Změnou geometrie lze v širokém pásmu kmitočtů nastavit kmitočet maximálního pohlcování. Děrovanou desku lze zhotovit z jakéhokoliv materiálu, který bude vyhovovat dané aplikaci i z hlediska mechanické pevnosti a povrchové úpravy. [3]



Obr. 4.1: Mechanická analogie akustické rezonanční soustavy [Převzato z [2]]

Pro přiblížení principu fungování lze použít analogii s kmitáním tělesa na pružině, jak ukazuje obr. 4.1. Tuhost pružiny je v tomto případě dána akustickou poddajností c_a , hmotnost závaží akustickou hmotností m_a a pohyb je tlumen akustickým odporem R_a . Dopadem zvukového vlnění začne soustava nuceně kmitat, přičemž maximální amplituda kmitání je ve stavu rezonance. Přestane-li působit buzení, tak soustava bude ještě po nějakou dobu dokmitávat vlastním, rezonančním kmitočtem. Tento jev je nazýván dozníváním a nenastává pouze u prvků pohlcující zvuk, ale i u zdrojů zvuku, popřípadě i jiných předmětů v uzavřeném prostoru. Doba doznívání je závislá na tlumení rezonátoru a může nastat situace, kdy se v netlumeném uzavřeném prostoru použitím rezonátoru doba dozvuku prodlouží. To je způsobeno přeměnou energie jednoho kmitočtu na energii kmitočtu jiného. Rezonátor se nikdy nestává zdrojem nové energie, jeho působením dochází vždy k tlumení, neboť rezonátor část zvukové energie přeměňuje vlivem tření na energii tepelnou. [2]

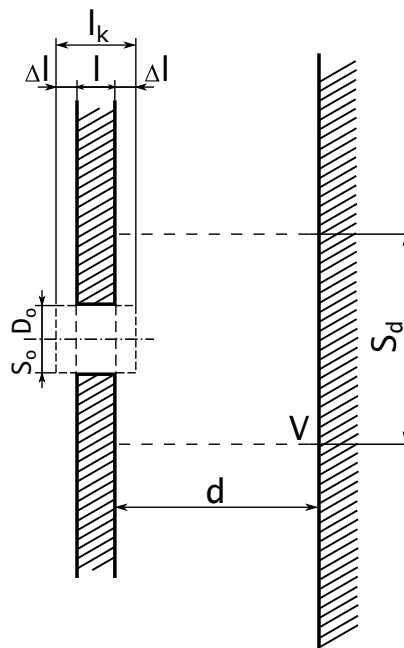
Při předpokladu, že jsou všechny rozměry rezonátoru menší než polovina vlnové délky dopadajícího zvuku, a že plocha otvoru je menší než plocha vzduchového polštáře, je možno považovat Helmholtzův rezonátor za akustický rezonanční obvod se soustředěnými



Obr. 4.2: Schématické znázornění Helmholtzova rezonátoru [Převzato z [2]]

parametry. Schématicky znázorněn je na obr. 4.2. Jedná se o dutinu o objemu V s hrdlem naplněným vzduchem o určité hmotnosti, která funguje jako píst. Objem je charakterizován poddajností c_a , píst představuje akustickou hmotnost m_a , která se po zavedení korekce $2\Delta l$ (viz. níže) určí podle rovnice 4.1, kde ρ je hustota vzduchu a l délka hrdla rezonátoru.[2] Odpor kladený pohybu pístu, jinými slovy akustické hmotnosti, má velikost R_a .

$$m_a = \frac{\rho(l + 2\Delta l)}{S_o} \quad [m^{-4}kg; kg \cdot m^{-3}, m, m, m^2] \quad (4.1)$$



Obr. 4.3: Řez Helmholtzovým rezonátorem (děrovanou deskou) s kruhovým otvorem

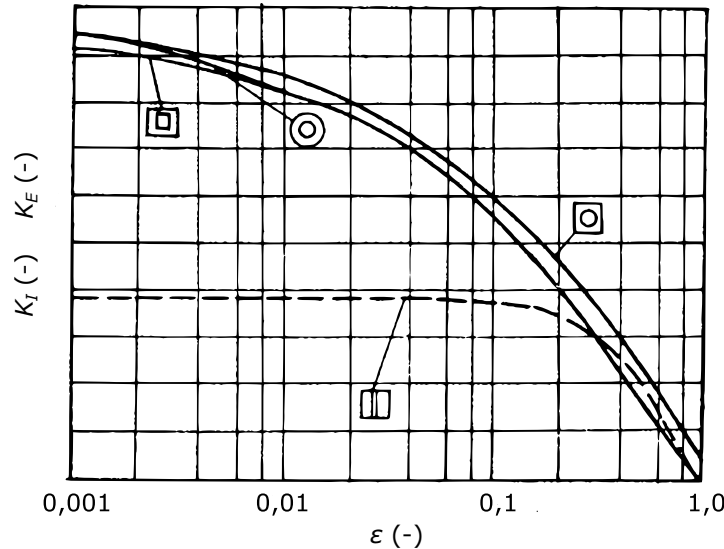
Jelikož přechod mezi dutinou a otvorem není z hlediska vlastností pohybujícího média skokový, ale plynulý, je třeba zavést korekci délky otvoru $2\Delta l$. Ta nahrazuje plynulý přechod doplněním o spolukmitající hmotnost před a za otvorem a je znázorněna na obr. 4.3. Koncová korekce podle U. Ingarda je: [2]

$$2\Delta l = \sqrt{S_o} K_I \quad [m; m^2, -] \quad (4.2)$$

kde K_I součinitel děrování závislý na činiteli děrování ε , jejichž vzájemná závislost je na obr. 4.4 a pro činitel děrování platí: [2]

$$\varepsilon = \frac{S_o}{S_d} \quad [-; m^2] \quad (4.3)$$

kde S_o je plocha otvoru a S_d průřez dutiny rezonátoru.



Obr. 4.4: Závislost koncové korekce K_I na činiteli děrování pro kruhové, čtvercové a obdélníkové otvory (pro měření v interferometru) [Převzato z [2]]

Za výše uvedených předpokladů a v případě kolmého dopadu zvukových vln je rezonanční kmitočet dán vztahem:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_o}{V(l + 2\Delta l)}} \quad [Hz, m/s, m^2, m^3, m, m] \quad (4.4)$$

nebo

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{d(l + 2\Delta l)}} \quad [Hz, m/s, -, m, m, m] \quad (4.5)$$

kde l je hloubka otvoru a d hloubka dutiny.

V případě obdélníkových otvorů o délce a a šířce b lze rovnici 4.5 upravit dosazením následujícího výrazu za ε : [2]

$$\varepsilon = \frac{ab}{S_d} \quad [-; m, m, m^2] \quad (4.6)$$

Potom tedy [2]

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{ab}{V(l + 2\Delta l)}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{ab}{V(l + bK_E)}} \quad [Hz] \quad (4.7)$$

kde K_E je Ingardův korekční součinitel pro obdélníkový otvor. Dále platí:

$$2\Delta l = bK_E \quad [m] \quad (4.8)$$

Pro K_E lze psát: [2]

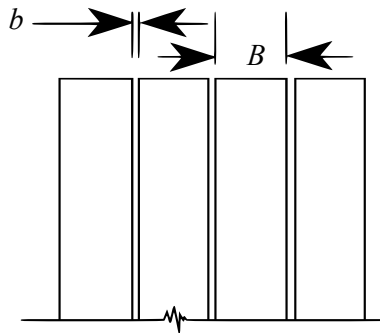
$$K_E = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{a}{b}} \quad [-; m, m] \quad (4.9)$$

Pro všesměrový dopad se rezonanční kmitočet zvyšuje asi o 40 %. [2]

Otvory rezonátorů nemusí být vždy jednoduché, lze použít rezonátory s otvory kuželovými, eliptickými, štěrbinovými, štěrbinovými se šikmými stěnami otvorů, se štěrbinou mezi válci a další. Tvar otvoru má vliv na koncovou korekci, respektive na velikost součinitele K_E , respektive K_I . [2]

4.1 Laťový rezonátor

Zvláštním případem Helmholtzova rezonátoru je laťový rezonátor. Latě jsou umístěny v určité vzdálenosti od stěny a jsou mezi nimi mezery o určité šířce. Hmotnost vzduchu ve štěrbinách tak funguje jako píst a hmotnost vzduchu za latěmi jako pružina, stejně jako bylo uvedeno výše. Užší štěrbinu a hlubší dutina snižují rezonanční frekvenci. Za latě se opět pro zvýšení absorpce přidává porézní materiál, například kamenná vata.



Obr. 4.5: Schématické znázornění pohledu na laťový rezonátor [Převzato z [8]]

Podle [9] lze pro korekční součinitel pro laťový rezonátor konečné délky psát:

$$K_E = \frac{1}{\pi} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{2a}{b} \quad [-; m, m] \quad (4.10)$$

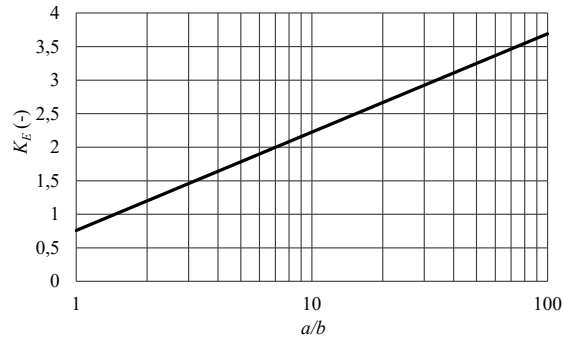
kde a je délka mezery mezi latěmi a b je šířka mezery mezi nimi podle 4.5. Závislost K_E na poměru a/b zachycuje graf 4.6.

Pokud je uvažován laťový rezonátor s nekonečně dlouhými latěmi, tak se předpis pro korekční součinitel změní na: [9]

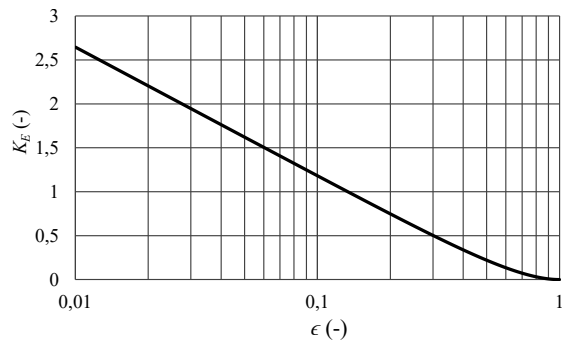
$$K_E = \frac{2}{\pi} \ln \left(\csc \frac{\pi}{2} \varepsilon \right) \quad [-] \quad (4.11)$$

Kde ε je dáno 4.12. Závislost K na činiteli děrování ε ukazuje graf 4.7.

$$\varepsilon = \frac{b}{B} \quad [-; m, m] \quad (4.12)$$



Obr. 4.6: Korekční součinitel pro latě konečné délky [Převzato z [9]]



Obr. 4.7: Korekční součinitel pro latě nekonečné délky [Převzato z [9]]

Pokud je objem vzduchu v rezonátoru vyšší a předpokládá se řada jednotlivých rezonátorů, pro rezonanční frekvenci poté platí následující: [9]

$$\frac{l + 2\Delta l}{\varepsilon \cdot d} = \frac{\cotg(k_0 d)}{k_0 d} \quad (4.13)$$

kde ε je činitel děrování podle 4.12, d , l , $2\Delta l$ jsou v metrech a odpovídají obr. 4.2 a k_0 je konstanta vlnové délky na rezonančním kmitočtu, pro kterou platí:

$$k_0 = \frac{2\pi}{c} f_0 \quad [-; m/s, Hz] \quad (4.14)$$

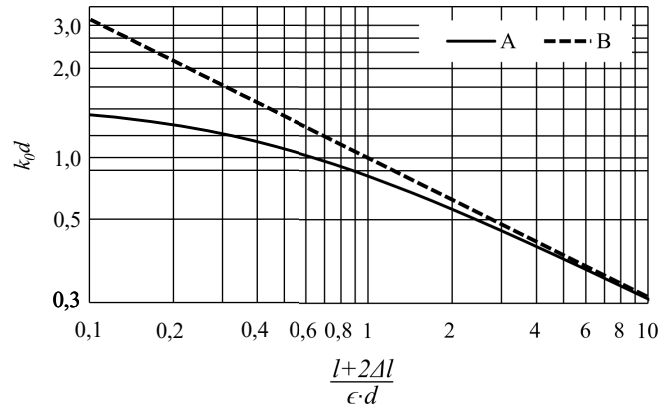
Po rozšíření výrazu $\cotg(k_0 d)$ lze rovnici 4.13 přepsat do tvaru:

$$\frac{l + 2\Delta l}{\varepsilon \cdot d} = \frac{1}{(k_0 d)^2} \quad (4.15)$$

Vyjádřením k_0 z rovnice 4.15 a dosazením do 4.14 získáme již dříve uvedený vztah 4.5. Rozdíl mezi rovnicemi 4.13 a 4.15 je patrný na grafu 4.8.

Rezonanční kmitočet lze potom určit při znalosti hodnoty levé strany rovnice 4.13, kde $2\Delta l$ získáme pomocí 4.8. Z grafu 4.8 se odečte součin $k_0 d$, který se následně dosadí do vztahu odvozeného z 4.13: [9]

$$f_0 = \frac{c \cdot k_0 d}{2\pi d} \quad [Hz; m/s, -, m, m] \quad (4.16)$$



Obr. 4.8: Diagram k určení rezonanční frekvence pro děrované desky (A: rovnice 4.13) a laťový rezonátor (B: rovnice 4.15) [Převzato z [9]]

4.2 Tlumení Helmholtzova rezonátoru

U Helmholtzova rezonátoru, respektive děrovaných desek, je tlumení pro výslednou charakteristiku činitele zvukové pohltivosti velmi důležité. Akustické pole za otvorem totiž již nemá charakter rovinné vlny, která na rezonátor dopadla. Vzduch v otvoru se chová jako nestlačitelný hmotný píst, který vyzařuje do vzduchového polštáře v dutině rezonátoru. V případech, kdy rozměry otvoru jsou mnohem menší než polovina vlnové délky uvažovaného zvuku, se toto vyzařování děje ve tvaru kulové vlny. To se projevuje dříve popsanou skutečností, kdy kromě vzduchu v otvoru kmitá i vzduch před otvorem a za otvorem ve stejné fázi, jako v otvoru. Proto je zavedena korekce délky otvoru rezonátoru. I zde musí být splněna rovnice kontinuity, totiž, že součin okamžité akustické rychlosti v a průřezu S , neboli akustická objemová rychlost, musí být v celém objemu konstantní. [3]

$$v_d \cdot S_d = v_o \cdot S_o \quad [m/s, m^2] \quad (4.17)$$

kde v_d a S_d je rychlost a průřez dutiny a v_o a S_o je rychlost a průřez otvoru. Jinak zapsáno:

$$\frac{v_d}{S_d} = \frac{v_o}{S_o} = \varepsilon \quad (4.18)$$

kde ε je činitel děrování.

Jelikož je plocha otvoru vždy menší než průřez vzduchového polštáře kolmý na směr šíření vzduchu, dochází v otvoru i v korigovaných délkách Δl před a za otvorem k transformaci okamžité akustické rychlosti. To vede ke změně měrného akustického odporu podle vztahů: [3]

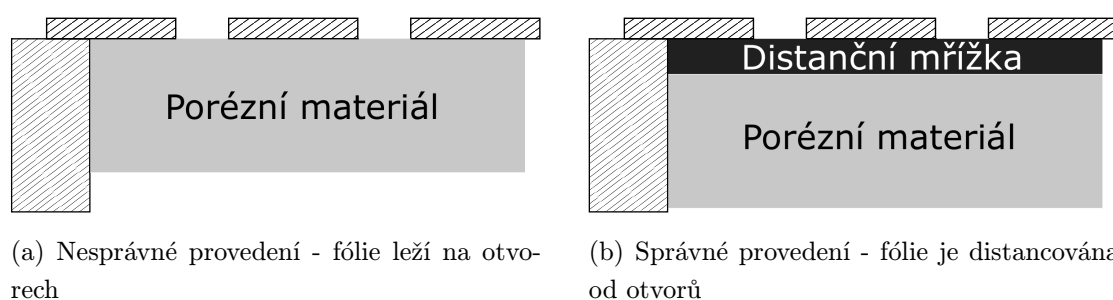
$$r_o = r_d \cdot \varepsilon \quad [Pa \cdot s \cdot m^1] \quad (4.19)$$

$$r_d = \frac{r_o}{\varepsilon} \quad [Pa \cdot s \cdot m^1] \quad (4.20)$$

Ze vztahů je patrné, že měrný akustický odpor v otvoru r_o je ε krát větší než měrný akustický odpor dutiny rezonátoru r_d .

To v praxi znamená, že umístění porézního materiálu v oblasti otvoru je kritické, zvláště při velkých otvorech, kterým odpovídají velké korigované délky Δl . V této situaci by došlo k transformaci měrného akustického odporu porézního materiálu podle rovnice 4.20. [3]

Běžně však jsou akustické porézní materiály z důvodu optimálních vlastností tlusté 60 až 100 mm a při použití děrovaných desek je korigovaná délka otvoru pouze 0,5 cm. Tím pádem do oblasti korigovaných délek zasahuje jen malá část tloušťky porézního materiálu a následné zvýšení výsledného měrného akustického odporu vlivem transformace tak není výrazné. [3]

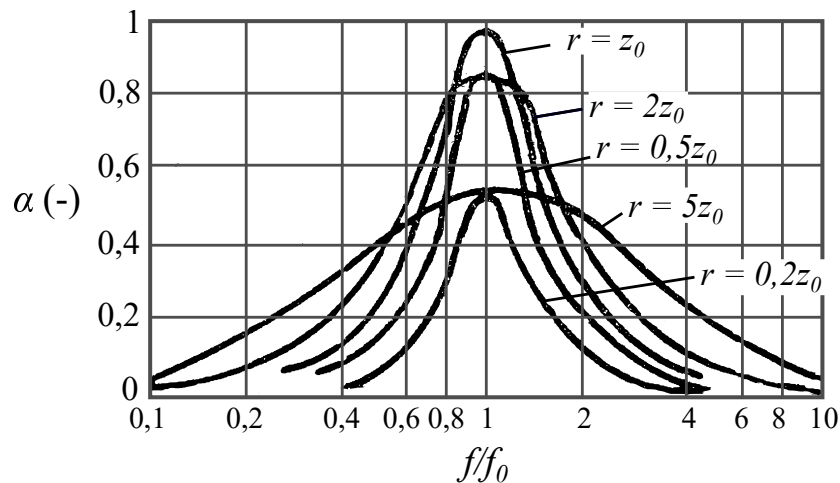


Obr. 4.9: Znázornění umístění porézního materiálu pokrytého fólií

Obvykle je ale nutné porézní materiál z hygienických důvodů zabalit. K tomu se využívá tenká a lehká plastová fólie, která díky tenkosti výrazně neovlivní vlastnosti porézního materiálu. Může ale nastat situace podle obrázku 4.9a, kdy fólie těsně doléhá na otvory čelního panelu. Tím zasahuje do oblasti korigované délky otvorů a je nucena kmitat v ploše otvoru stejnou akustickou rychlostí. Fólie je ale zezadu mechanicky tlumena porézním materiálem a sama sebe ještě tlumí vlivem vnitřního třetí a ohybového kmitání, čímž nastane výrazné přetlumení rezonátoru. Dochází k transformaci měrného akustického odporu a navíc i měrné akustické hmotnosti folie. Tím je výrazně zvýšena měrná akustická hmotnost otvoru rezonátoru, což vede k poklesu rezonančního kmitočtu. [3]

Proto se mezi fólií a děrovanou desku vkládá distanční mřížka o výšce 0,5 cm viz. obr. 4.9b. Ta je obvykle vyrobena ze zvlněného drátěného pletiva. I přesto se ale vlivem folie zhruba dvojnásobně zvyšuje výsledný akustický odpor rezonátoru, než jak by tomu bylo bez folie. [3]

Pomocí měrného akustického odporu r lze nejlépe charakterizovat tlumení rezonátoru, na kterém závisí velikost dosažené absorpce i šířka pásma pohltivosti panelu. To je názorně vidět na obr. 4.10, který ukazuje, že pokud je tlumící odpor r rezonátoru menší než vlnový odpor vzduchu $z_0 = \rho c$, pohlcuje panel v úzkém pásmu s nízkým maximum absorpce. Maximální pohltivosti je potom dosaženo pro $r = z_0$. Pokud velikost r roste nad velikost z_0 , snižuje se maximum absorpce, ale pásmo pohltivosti se značně rozšíří. Při návrhu tlumení je proto třeba k tomuto přihlídnout. [2]

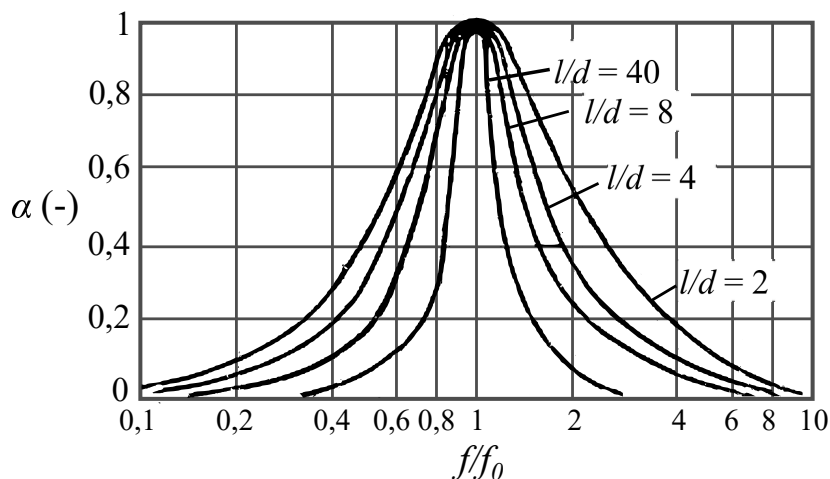


Obr. 4.10: Kmitočtové závislosti α_0 pro různá tlumení rezonátoru s poměrem $l/d = 4$
[Převzato z [2]]

Šířku pásma pohltivosti panelu kolem rezonanční frekvence udává činitel jakosti Q . Ten je závislý na poměru l/d , kde l je tloušťka panelu a d je hloubka dutiny. Z většího poměru plyne větší činitel jakosti Q , jak ukazuje obr. 4.11. [2]

Křivky uvedené na obr. 4.10 platí pouze pro jediný rezonátor s poměrem $l/d = 4$. Zároveň je uvažován kolmý dopad zvukových vln. Pro maximální pohltivost $r = z_0$ je na obr. 4.11 vidět závislost šířky pásma na poměru l/d . Uvedené vztahy lze použít i pro všesměrový dopad, ale výsledek je nutné o 40% zvýšit. [2]

Velikost tlumení a činitele zvukové pohltivosti určitého provedení pohltivého obkladu nelze většinou dostatečně přesně určit výpočtem. Obvykle je zapotřebí experimentální měření v interferometru a dozvukové komoře. [2]

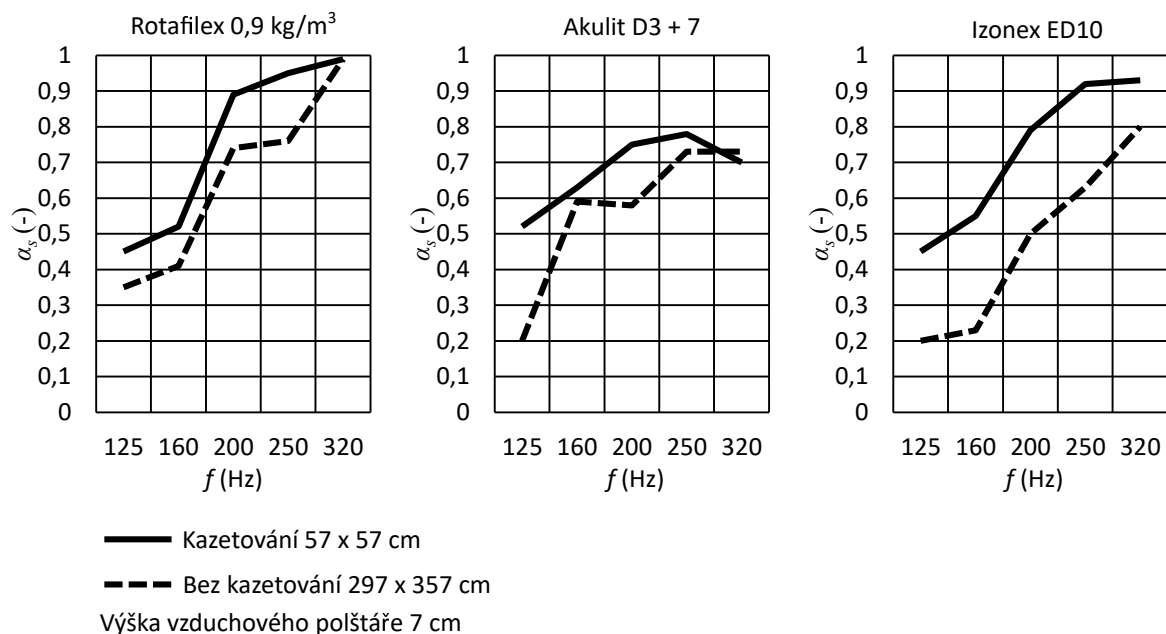


Obr. 4.11: Kmitočtová závislost rezonátorů s různým poměrem l/d v případě, že $r = z_0$
[Převzato z [2]]

Při výpočtu obvykle uvažujeme ztráty vznikající vlivem vazkosti vzduchu na stěnách otvoru rezonátoru. Tyto ztráty se výrazněji projevují, až když je délka otvoru větší než jeho průměr. Pokud je délka otvoru malá a povrch hladký, budou i ztráty vlivem vazkosti vzduchu malé. [3]

4.3 Vliv rozdělení vzduchového polštáře

Kmitočtovou charakteristiku činitele zvukové pohltivosti ovlivňuje objem vzduchového polštáře za čelní stěnou konstrukce. Jeho objem určuje akustickou poddajnost, která u velkých dutin ztrácí svoje vlastnosti. Proto je nutné vzduchový polštář rozdělit tzv. kazetováním. Rozdíl mezi děleným a neděleným vzduchovým polštářem ukazuje obr. 4.12. Kazetování je také nutné při kombinaci více typů akustických obkladů. [3]



Obr. 4.12: Vliv kazetování vzduchového polštáře na činitel zvukové pohltivosti různých konstrukcí [Převzato z [3]]

5

Návrh modulárního systému pro měření Helmholtzových rezonátorů

Modulární systém je navržen tak, aby umožňoval uchycení latí i děrovaných panelů o standardních rozměrech 600 x 600 mm nebo 1200 x 600 mm. Rezonanční kmitočet lze ladit změnou hloubky dutiny v úrovních uvedených v tab. 5.1. Změna hloubky je prováděna vrstvením profilů s hloubkou 60 a 100 mm, přičemž základem je vrstva 60 mm, na kterou lze volitelně přidat další 60 mm nebo 100 mm profily. To neplatí u hloubky 120 mm, kdy jsou jako základní profily použity 100 mm. K hloubce profilů je třeba přičíst 20 mm hloubky prkna sloužícího k uchycení čelních panelů nebo latí. V případě použití latí lze rezonanční kmitočet měnit prakticky prakticky libovolně šířkou mezery mezi latěmi.

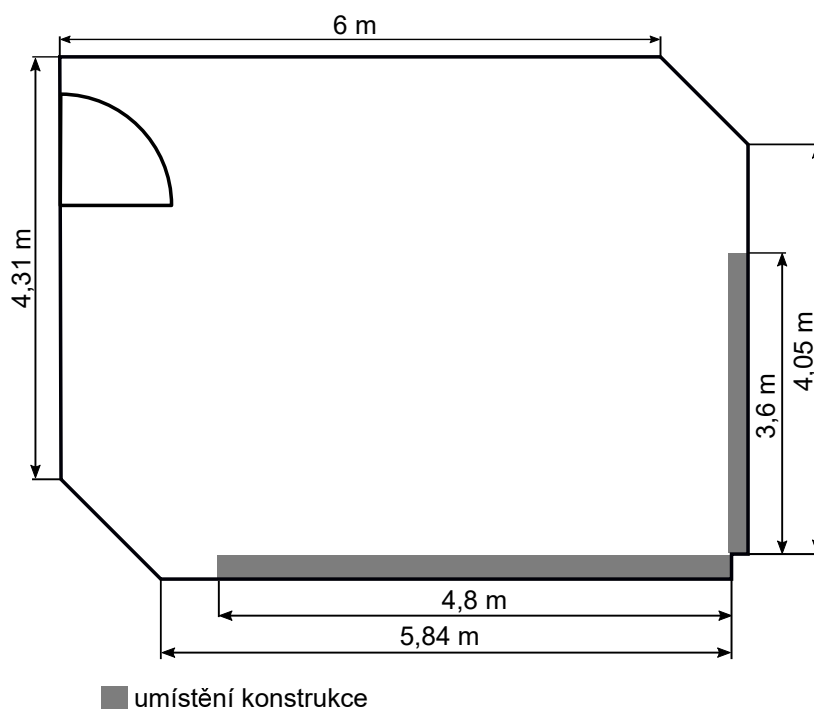
d [mm]				
80	120	140	180	240

Tab. 5.1: Varianty nastavení hloubky dutiny rezonátoru

Variabilitu dále zvyšuje několik možností umístění v dozvukové místnosti. Konstrukci lze umístit vodorovně na podlahu, tak jak předepisuje norma ČSN EN ISO 354. Primárně ale návrh počítá s upevněním svisle na stěny, protože to více odpovídá reálnému použití v interiérech. Před montáží na stěnu komory bude konstrukce opatřena ochranným nátěrem, protože v komoře se měří při vlhkostech až 80%. Varianty umístění na stěnu jsou zobrazeny na obr. 5.1. Podle předpokládaného použití lze volit mezi umístěním na jednu stěnu, nebo rozdělením plochy vzorku na stěny dvě, čímž se docílí rohového uspořádání.

5.1 Popis konstrukce

Sestava byla navrhována s ohledem na jednoduchost konstrukce. Z hlediska výroby i uskladnění je tvořena jen z několika málo typů dílů, které se ve velké míře opakují. Ze dvou druhů profilů, dvou druhů dělicích příček, dvou druhů čelních latí a výměnných latí sloužících k opakovanému zavrtávání vrutů připevňujících měřený vzorek.



Obr. 5.1: Půdorys dozvukové místnosti se znázorněním variant umístění na zeď

Nosnou konstrukci tvoří profily o s hloubkou 60 mm, které jsou umístěné svisle a z pravé i levé strany mají rovnoměrně rozloženo pět drážek o šířce 20 mm a hloubce 10 mm. Jedna sada těchto profilů (16 kusů) je určena pro trvalé umístění na zdi dozvukové komory, druhá sada 9 kusů je určena pro zvětšení hloubky rezonátoru. Pro větší variabilitu hloubek konstrukce jsou k dispozici i obdobné profily, tentokrát ale s hloubkou 100 mm v počtu devíti kusů.

Profily lze vrstvit na sebe až do tří vrstev a dosáhnout tím různých hloubek konstrukce. Spojování je zajištěno šrouby se zapuštěnou hlavou, pro které jsou připravené závitové vložky a průchozí otvory v profilech.

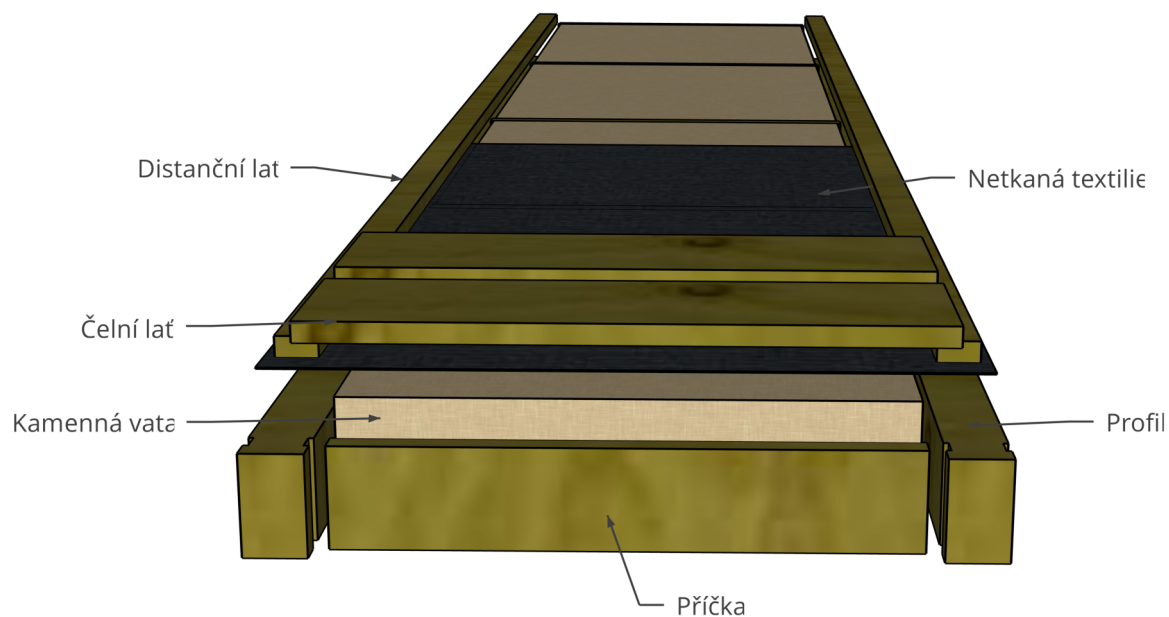
Na profil se přidělavá distanční lať, na kterou se vruty připevňují čelní latě. Připevňování čelních latí pomocí vrutů je jednoduché, ale pokud se konstrukce ověří v praxi, bylo by možné místo distančních latí použít vodící lišty a čelní latě opatřit posuvnými kameny. Lať by tak stačilo nasunout a zafixovat dotažením kamene.

Dělicí příčky slouží k rozdělení vnitřního prostoru ve svislém směru na více menších částí, což ovlivňuje akustickou poddajnost vzduchového polštáře, jak je uvedeno v kapitole 4.3. Zasouvají se do drážek svislých profilů, jak je vidět na obr. A.5a. Podle hloubky svislého profilu, do kterého se umísťují, mají šířku buď 60 mm nebo 100 mm.

Čelní latě, tvořící přední plochu rezonátoru umožňují složení různě velkých ploch a variant. Delší latě mají délku 1800 mm (přes 3 pole konstrukce) a kratší 600 mm. Hrany čelních latí jsou hoblované, aby nedocházelo ke ztrátám vazkostí vzduchu ve štěrbině, jak bylo uvedeno v kapitole 4.2.

Na obrázku 5.2 je počítačový model rozložené části realizované sestavy. Ilustruje roz-

vrstvení a způsob sestavení jednotlivých částí, přední latě jsou pro přehlednost zobrazeny pouze dvě, reálnou situaci rozmístění čelních latí ukazuje vizualizace na obr. 5.3. Nákres stejné varianty je i v příloze na obr. A.5b.



Obr. 5.2: Vizualizace rozložené části modulárního systému s popisem částí



Obr. 5.3: Vizualizace jedné sekce modulárního systému s rozestupy čelních latí 44 mm

	Kusů	Hloubka [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]
Základní profil 60	16	60	60	2460
Nástavný profil 60	9	60	60	2460
Nástavný profil 100	9	60	100	2460
Příčka 60	80	20	60	555
Příčka 100	40	20	100	555
Distanční lať	9	20	40	2400
Čelní latě 180	32	19	140	1800
Čelní latě 60	32	19	140	600

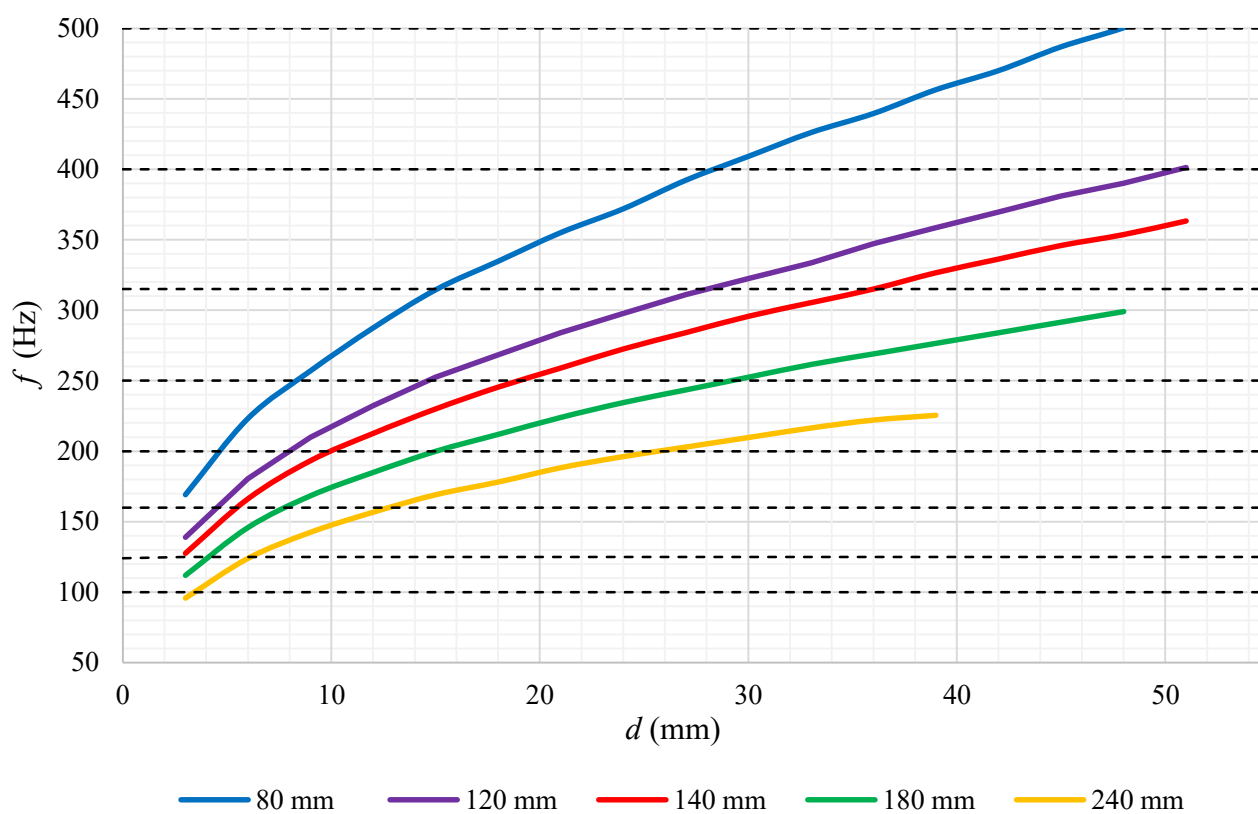
Tab. 5.2: Seznam dřevěných částí konstrukce s jejich rozměry a počtem.

5.2 Teoretické vlastnosti

K výpočtu teoretického rezonančního kmitočtu navrženého řešení byl použit postup ze závěru kapitoly 4.1. Vztahy byly přepsány do programu Microsoft Excel a hodnoty vypočítány s odstupňováním po 3 mm šířky šterbiny, další rozměry jsou v tab. 5.3. Pro výpočet byla uvažována pouze prázdná vzduchová dutina bez tlumícího materiálu. Použití tlumícího materiálu by zvýšilo tlumení na rezonančním kmitočtu, ale také by posunulo rezonanční kmitočet níže. Na grafu 5.4 je vidět závislost na šířce mezery mezi latěmi pro všechny nastavitelné varianty hloubek dutiny. Na grafu jsou také vyneseny kmitočty třetinoctávkových pásem.

Tloušťka přední latě l [mm]	19
Šířka latě B [mm]	140
Šířka šterbiny b [mm]	3 až 51
Hloubka dutiny d [mm]	80 až 240

Tab. 5.3: Návrh rezonátoru - rozměry rezonátoru



Obr. 5.4: Teoretické rezonanční kmitočty navrženého rezonátoru v závislosti na hloubce d a šířce mezery mezi latěmi b

6

Měření vzorků rezonátorů v dozvukové komoře

Měření proběhlo v dozvukové komoře ZČU v Plzni ve dnech 27. a 28. 5. 2020. Objem komory je 214,9 m³. Pro co nejdelší dobu dozvuku prázdné komory jsou stěny opatřeny tvrdým odrazivým nátěrem. K zajištění náhodného a mnohonásobného odrazu je v prostoru zavěšeno více různě velkých a zakřivených desek z plexiskla. Půdorys komory s jejími rozměry a umístěním vzorku je na obr. 6.2. Parametry prázdné komory byly měřeny při průměrné teplotě 19,9°C a průměrné vlhkosti 72,1 %. Doby dozvuku prázdné komory jsou uvedeny v tabulce 6.1.

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
T [s]	15,2	15,0	18,7	18,8	18,8	17,0	16,0	14,1	12,6
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T [s]	11,2	10,0	8,8	7,9	6,9	5,9	5,1	4,0	3,2

Tab. 6.1: Doba dozvuku prázdné dozvukové komory

Vzorek byl realizován podle návrhu v kapitole 5. Byla zvolena hloubka dutiny 120 mm, byly tedy použity profily vysoké 100 mm, ke kterým byly přidány 20 mm distanční latě. Konstrukce bez vaty je vidět na obrázku 6.1. Do takto rozkazetované plochy byla umístěna skelná vata Isover Domo plus 100 o tloušťce 100 mm a hustotě 12,5 kg/m³. Vata byla překryta netkanou textilií s hmotností 50 g/m². Uspořádání je vidět na obr. 5.2. Jelikož došlo po rozbalení vaty k zvětšení jejího objemu a distanční latě jsou umístěny na profilech 600 mm od sebe, původně uvažovaná mezera 20 mm se zmenšila na cca 5 mm.

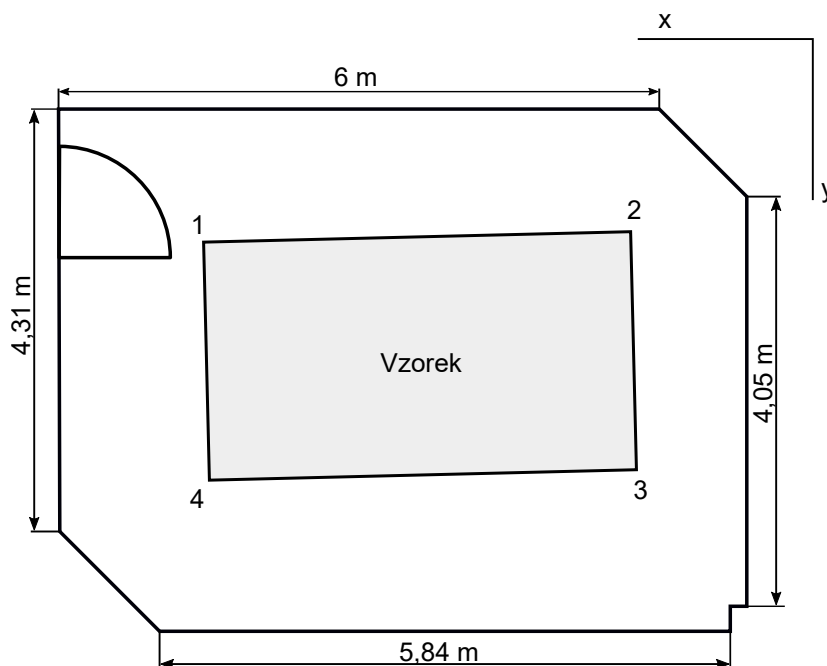
Vzorek byl umístěn na podlahu tak, aby žádná z jeho stran nebyla rovnoběžná se stěnou. Přesné umístění zachycuje obr. 6.2 a umístění rohů konstrukce je uvedeno v tabulce 6.2. Podle normy ČSN EN ISO 345 má mít vzorek pro komoru o objemu $V=200$ m³ plochu mezi 10 a 12 m². Jelikož jeden rozměr vzorku je pevně dán (2,46 m), byla pro měření zvolena sestava ze sedmi sekcí. Šířka vzorku by tak podle návrhu měla být 4,2 m,



Obr. 6.1: Konstrukce před vložením vaty

větší již nebylo možné do komory umístit. Výsledná plocha vzorku byla $10,33 \text{ m}^2$, což splňuje doporučení normy.

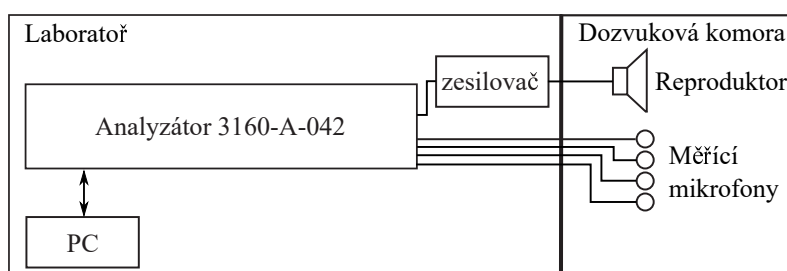
Měření pomocí všesměrových mikrofónů pro difúzní pole B&K typ 4943 bylo provedeno na 12 pozicích pro 2 různé polohy zdroje. Před samotným měřením byla provedena jejich kalibrace. Pozice mikrofónů a zdroje jsou v příloze na obr. A.6. Čtveřice měřících mikrofónů třídy 1 a zdroj zvuku byly připojeny k analyzátoru Brüel & Kjaer, který umožňuje připojení čtveřice mikrofónů. Norma ČSN EN ISO 354 požaduje minimálně 12 měřících míst. Protože k dispozici jsou pouze 4 mikrofóny, byly vytvořeny 3 varianty po 4 pozicích a po změření jedné varianty byly mikrofóny přesunuty na další měřící místa. Požadavkem normy jsou dále 2 pozice zdroje zvuku pro každou pozici mikrofónu. Celkem tedy dostáváme 6 konfigurací. Pro každou konfiguraci bylo měření třikrát opakováno a naměřená doba dozvuku následně průměrována. Jako zdroj zvuku sloužil reproduktor Yamaha S1151V napájený zesilovačem QSC PLX 1804. Budícím signálem byl růžový šum, který má stejnou energii ve všech třetinooktákových pásmech. Doba dozvuku byla vyhodnocována právě pro třetinooktáková pásma. Blokové schéma měřících přístrojů je na obr. 6.3 a jejich seznam je uveden v tabulce 6.3.



Obr. 6.2: Poloha měřeného vzorku v dozvukové komoře

Číslo rohu	x [m]	y [m]
1	5,45	1,81
2	1,2	1,35
3	5,19	4,24
4	0,93	3,78

Tab. 6.2: Poloha měřeného vzorku v dozvukové komoře



Obr. 6.3: Blokové schéma zapojení měření doby dozvuku v dozvukové komoře

	výrobce	kusů
analyzátor 3160-A-042	Brüel & Kjaer	1
mikrofon 4943-C-001	Brüel & Kjaer	4
zesilovač PLX 1804	QSC	1
reproduktor S1151V	Yamaha	1
software Labshop PULSE	Brüel & Kjaer	

Tab. 6.3: Měřící přístroje

6.1 Výsledky měření

Měřením na třech variantách šířky štěrbin mezi latěmi byl ověřen vliv tvaru štěrbin na činitel zvukové pohltivosti. Byly to varianty se šířkou štěrbin 4 mm, 19 mm a 44 mm. Velikosti štěrbin jsou vidět na obr. 6.4. Varianta s úzkými štěrbinami o šířce 4 mm měla silný rezonanční charakter a rezonanční frekvence odpovídala dříve provedenému výpočtu, jak je uvedeno v tab. 6.4. Výsledky měření větších mezer se od výpočtů odchýlily, navíc neměli jasně viditelný vrchol rezonančního kmitočtu. Výpočet předpokládal strmější nárůst rezonanční frekvence v závislosti na zvětšení šířky štěrbin mezi latěmi, jak ukazuje obr. 5.4. Reálně se však u větších štěrbin měnil rezonanční kmitočet mnohem méně, kdy více než zdvojnásobení šířky štěrbin z 19 mm na 44 mm znamenalo jen malý posun rezonanční frekvence.

b [mm]	4	19	44
Předpokládaná f_0 [Hz]	155	274	377
Změřená f_0 [Hz]	160	200	250

Tab. 6.4: Předpokládaná a změřená rezonanční frekvence měřených variant

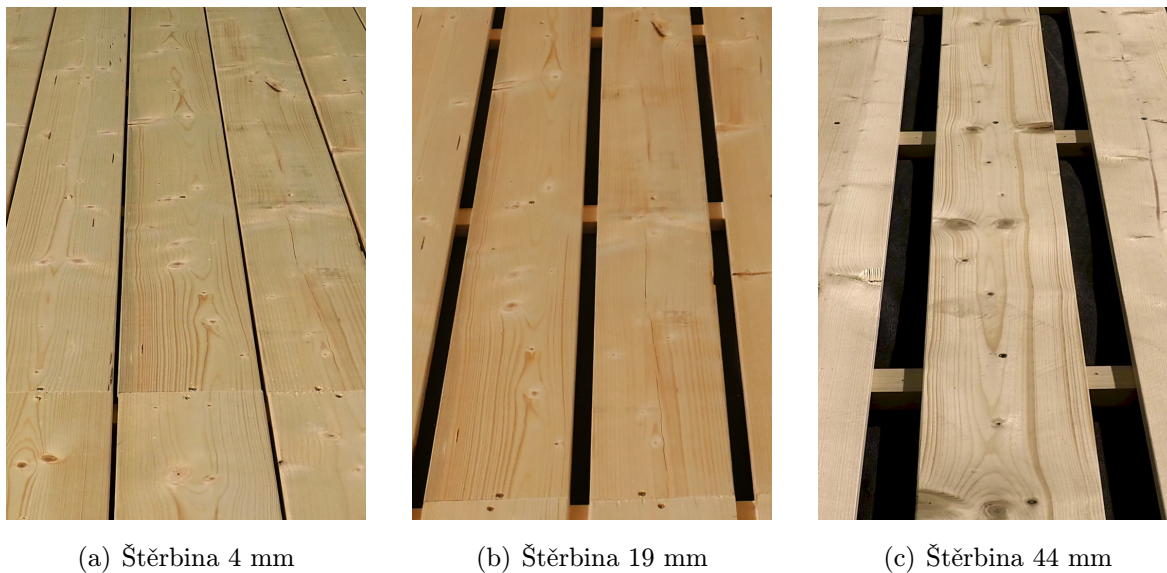
Důvodem malých změn rezonanční frekvence při větších otvorech může být korekce délky otvoru zasahující do vaty, jelikož reálný odstup byl pouze 5 mm. Pro větší otvory by bylo vhodné zvětšit odstup otvorů rezonátoru od porézního materiálu. Odkrytí větší plochy vaty se také projevilo větším tlumením v celém měřeném pásmu. Vrchol činitele zvukové pohltivosti již tak nebyl tolik výrazný.

Celková plocha štěrbin a prken pro jednotlivé varianty je v tab. 6.5. Čelní plocha tak nebyla vždy úplně stejná, protože počet použitých latí závisel na velikosti štěrbin a čelní plocha mohla přesahovat plochu nosné konstrukce.

Šířka štěrbin b [mm]	4	19	44
Plocha štěrbin S_o [m ²]	0,27	1,2	2,22
Plocha latí S [m ²]	10	9,41	8,23
Činitel děrování ε [-]	0,027	0,128	0,27

Tab. 6.5: Celková plocha prken a štěrbin s odpovídajícím činitelem děrování

Jelikož tloušťka latí byla 19 mm, tak při štěrbině o šířce 19 mm byl měřen otvor se čtvercovým tvarem. Naměřená doba dozvuku pro tuto variantu je uvedena v tabulce 6.6, hodnoty jsou průměrem měření z dvou pozic zdroje. Oproti tabulce 6.1 je patrné velké zkrácení v oblasti nízkých kmitočtů, kdy doba dozvuku prázdné komory přesahovala 15 s. Rezonátor dobu dozvuku nízkých kmitočtů zkrátil pod 3 sekundy. V příloze v tabulce B.4 jsou uvedeny doby dozvuku pro všechny tři měřené varianty, kdy je uvedena doba dozvuku pro první umístění zdroje zvuku, pro druhé umístění a průměr obou umístění.

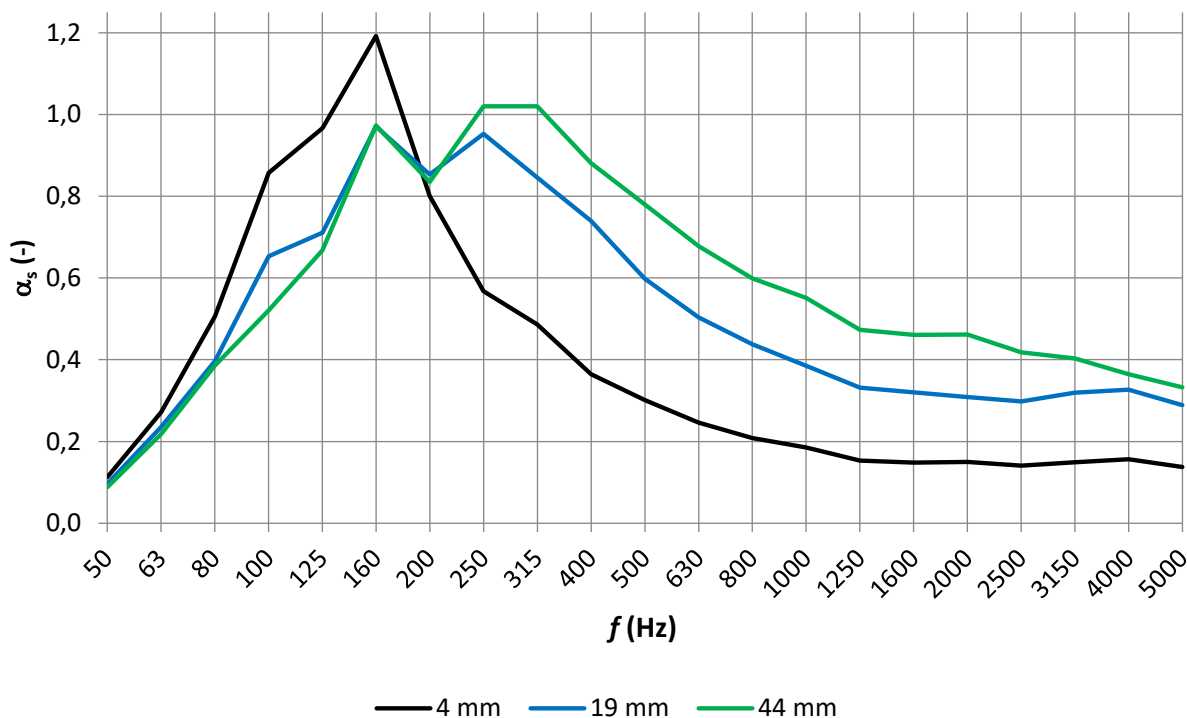


Obr. 6.4: Detail na měřené varianty štěrby Helmholtzova rezonátoru

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

Tab. 6.6: Doba dozvuku se vzorkem ve variantě šířky štěrby 19 mm

Z naměřených dob dozvuku byly vypočítány hodnoty činitele zvukové pohltivosti, které jsou vyneseny zvlášť pro zdroj zvuku v první poloze (obr. 6.5), druhé poloze (obr. 6.6) a na obr. 6.7 je vynesen průměr těchto měření. Z některých měření vyšel činitel zvukové pohltivosti větší než jedna, což odporuje rozsahu α definovanému v kapitole 2.3. Podle normy ČSN EN ISO 354 se hodnoty přesahující $\alpha_S = 1$ mají omezit na hodnotu jedna.

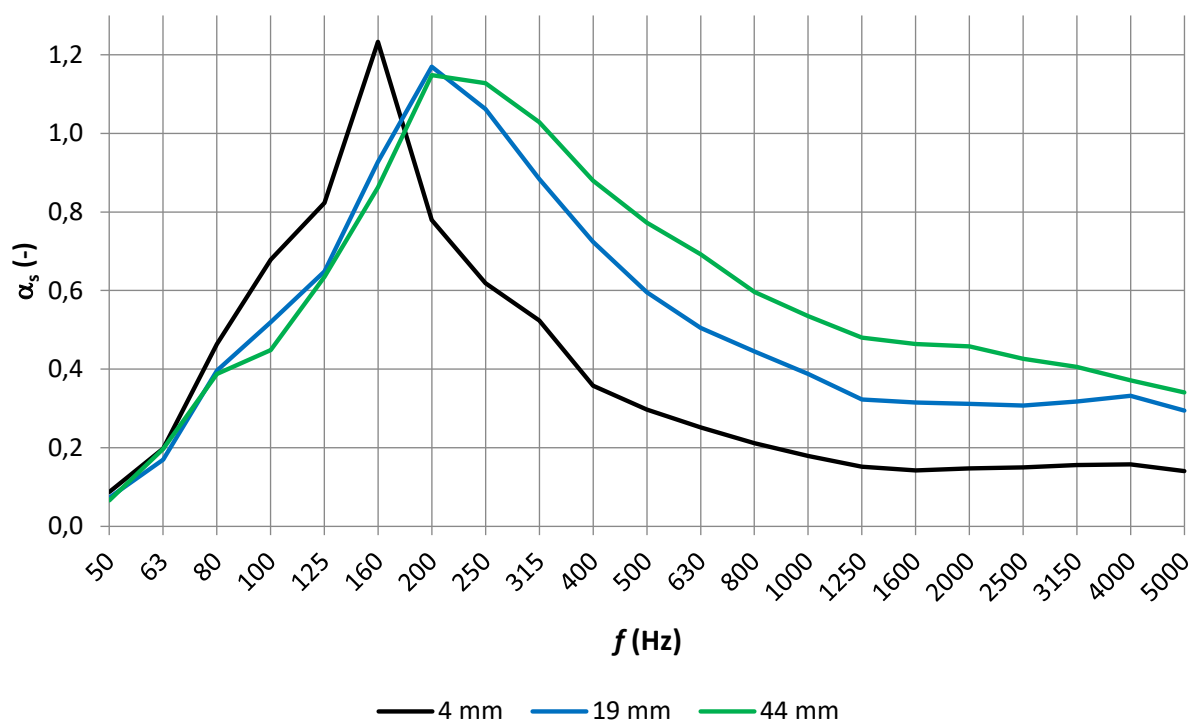
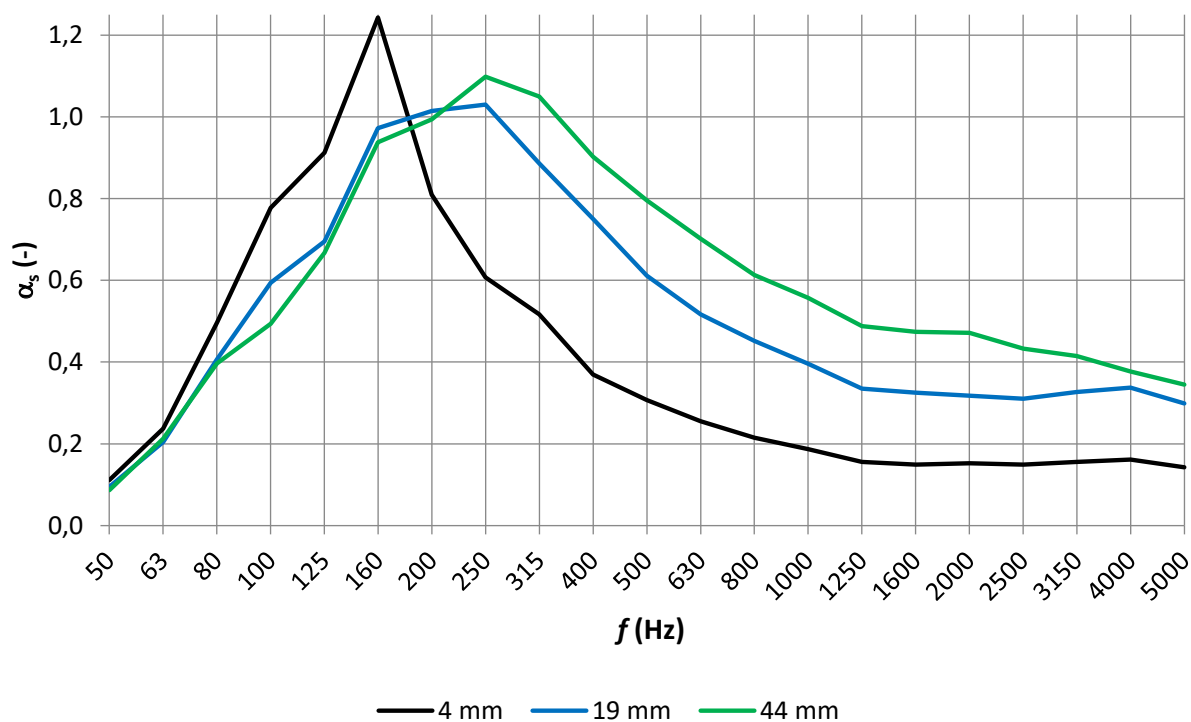


Obr. 6.5: Činitel zvukové pohltivosti α_S pro polohu zdroje Z1

U variant s většími štěrbinami (19 mm, 44 mm) jsou patrné rozdílné výsledky v závislosti na pozici zdroje zvuku v oblasti nejvyšší pohltivosti. Měření z pozice Z2 má očekávaný průběh, zatímco výsledky ze Z1 mají v pásmu 200 Hz propad.

Z grafu 6.7 je jasně vidět snížení činitele jakosti Q s rostoucí šířkou štěrbin. Největší činitel jakosti je u varianty velikosti štěrbin 4 mm, kdy je jasně patrný rezonanční vrchol. U větších štěrbin je pásmo pohltivosti rozšířené. Větší štěrbin v kombinaci s malým odstupem netkané textilie od otvoru měli zřejmě za následek zvýšení měrného akustický odporu r . Vrchol již u větším štěrbin také není jednoznačný. To může být způsobeno měřením s rozlišením jednoho třetinooktávového pásma. Pokud se totiž rezonance nachází na rozmezí dvou pásem, dojde k rozložení do obou pásem a není tak naměřen ostrý rezonanční vrchol.

V příloze jsou fotky s celkovým pohledem na měřené varianty. Konkrétně na obr. A.2 se štěrbinou 4 mm, obr. A.3 se štěrbinou 19 mm a na obr. A.4 varianta se štěrbinou o šířce 44 mm.

Obr. 6.6: Činitel zvukové pohltivosti α_s pro polohu zdroje Z2Obr. 6.7: Činitel zvukové pohltivosti α_s zprůměrovaný z měření s dvěma pozicemi zdrojů

7

Závěr

Tématem práce byla konstrukce nízkofrekvenčních tlumících prvků na principu Helmholtzových rezonátorů. První část zahrnuje vysvětlení základních pojmů z oboru prostorové akustiky důležitých pro tuto práci a zmiňuje i další používané konstrukce akustických prvků. Další kapitola se věnuje měření doby dozvuku v dozvukové místnosti a určení činitele zvukové pohltivosti měřených vzorků. Čtvrtá kapitola popisuje princip Helmholtzova rezonátoru a uvádí základní způsoby výpočtu rezonančního kmitočtu pro různé typy. Následující kapitola se věnuje již samotnému návrhu modulárního systému Helmholtzova rezonátoru vycházejícího z dříve uvedených teoretických znalostí. Navržený systém umožňuje měření v poloze, která bude odpovídat reálnému umístění vzorků a zajistí jednodušší montáž. Lze tak kromě umístění na podlaze využít i umístění na jedné stěně, nebo rohové umístění. Proto bude základ konstrukce napevno umístěn na stěnu komory. Systém má několik stupňů nastavení tloušťky vzduchového polštáře a vzduchový polštář může být kazetován. Kromě latí lze na čelní stranu připevnit i akustické panely o rozměrech 600x600 mm.

Pomocí dříve uvedených výpočtů byl vytvořen graf závislosti rezonanční frekvence na velikosti štěrbin mezi latěmi a hloubce vzduchového polštáře. Na základě těchto výpočtů a porovnání s výsledky kalkulátoru pro návrh Helmholtzova rezonátoru byla pro měření zvolena varianta s výškou vzduchového polštáře 120 mm.

Funkčnost navržené konstrukce byla ověřena při měření v dozvukové komoře ZČU. Pro měření byla zvolena varianta umístění na podlaze. Pro zvýšení tlumení byla do dutiny umístěna skelná vata o tloušťce 100 mm, která byla překryta netkanou textilií. Byly změřeny tři varianty šířky štěrbin mezi latěmi a tím byl ověřen vliv tvaru štěrbin na činitel zvukové pohltivosti. Na základě měření se použitý způsob výpočtu rezonanční frekvence ukázal jako nepřesný. Nerespektoval vliv tlumení netkané textilie a skelné vaty. Rozdíl v rezonančních frekvencích jednotlivých variant byl tak menší, než se původně očekávalo a u větších štěrbin je vrchol charakteristiky činitele zvukové pohltivosti nejednoznačný. Výsledky měření jsou dále zhodnoceny v kap. 6.1. Získané výsledky měření v konfiguraci na podlaze komory budou použity pro porovnání s měřením po instalaci na svislou stěnu komory. Tím se ověří vliv umístění vzorku na výsledky měření.

Navržený modulární systém je konstrukčně velmi jednoduchý a při měření se projevilo nedostatečné zajištění odstupů tlumící skelné vaty od otvorů, kdy netkaná textilie nezabránila zvětšení objemu skelné vaty. Pro zjednodušení procesu přípravy a měření by bylo vhodné konstrukci doplnit vodíci lištami, jak bylo naznačeno v kap. 6.1.

Literatura

- [1] VEVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Vyd. 1. Brno : VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1283-6
- [2] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 242, [1] s.
- [3] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Praha : VÚZORT, 1971.
- [4] ČSN EN ISO 354. *Akustika – Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2003
- [5] ČSN EN ISO 11654. *Akustika – Absorbéry zvuku používané v budovách – Hodnocení zvukové pohltivosti*. Praha: Český normalizační institut, 1998
- [6] ČSN EN ISO 2282–2. *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [7] COX, Trevor J.. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. D'ANTONIO, Peter. Boca Ratón, FL: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017. ISBN 9781498740999.
- [8] EVEREST, F. Alton. *Master handbook of acoustics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2009. ISBN 978-0-07-160332-4.
- [9] MAEKAWA Z., P. Lord. *Environmental and Architectural Acoustics*. Londýn: E & FN Spon, 1993. ISBN 0-419-15980-0.
- [10] Bouzek, Stanislav. *Návrh akustických úprav malých poslechových prostorů*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Martin SCHLOSSER.
- [11] Arqen [online]. Arqen Sonic, ©2015 [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: <http://arqen.com/store/vicoustic-super-bass-extreme-trap/>
- [12] 1st-acoustics [online]. Wuhan Henyuan technology Co.,Ltd, [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: http://1st-acoustics.com/product/Perforated_acoustic_panels.html

- [13] 1st-acoustics [online]. Wuhan Henyuan technology Co.,Ltd, [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: <http://1st-acoustics.com/product/Pyramidal'Diffusers.html>
- [14] První Chodská [online]. První Chodská, ©2015 [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: <https://www.chodska.cz/kamenna-vata-rockwool-p36.html>
- [15] Akustické materiály [online]. Akustické materiály s.r.o., ©2020 [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: <https://www.akustickematerialy.cz/produkt/panel-5cm/>
- [16] ACOUSTIC GRG PRODUCTS [online]. Acoustic GRG Products, ©2020 [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: <http://www.rpgeurope.com/products/product/skyline.html>
- [17] Gloriet [online]. Gloriet, ©2006 [cit. 13.6.2020]. Dostupné z: http://www.zvukove-studio.cz/pics/obklad1_velky.jpg

Příloha A

Obrázky



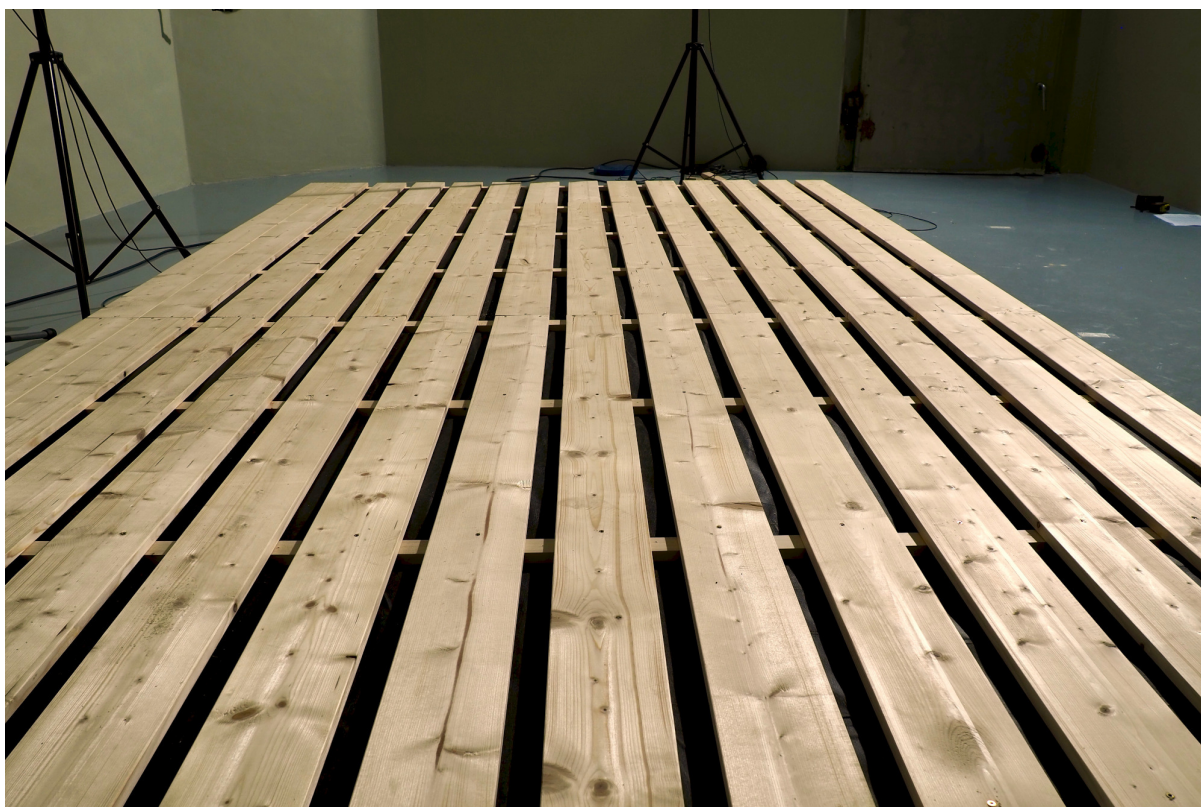
Obr. A.1: Celkový pohled na rezonátor umístěný v komoře



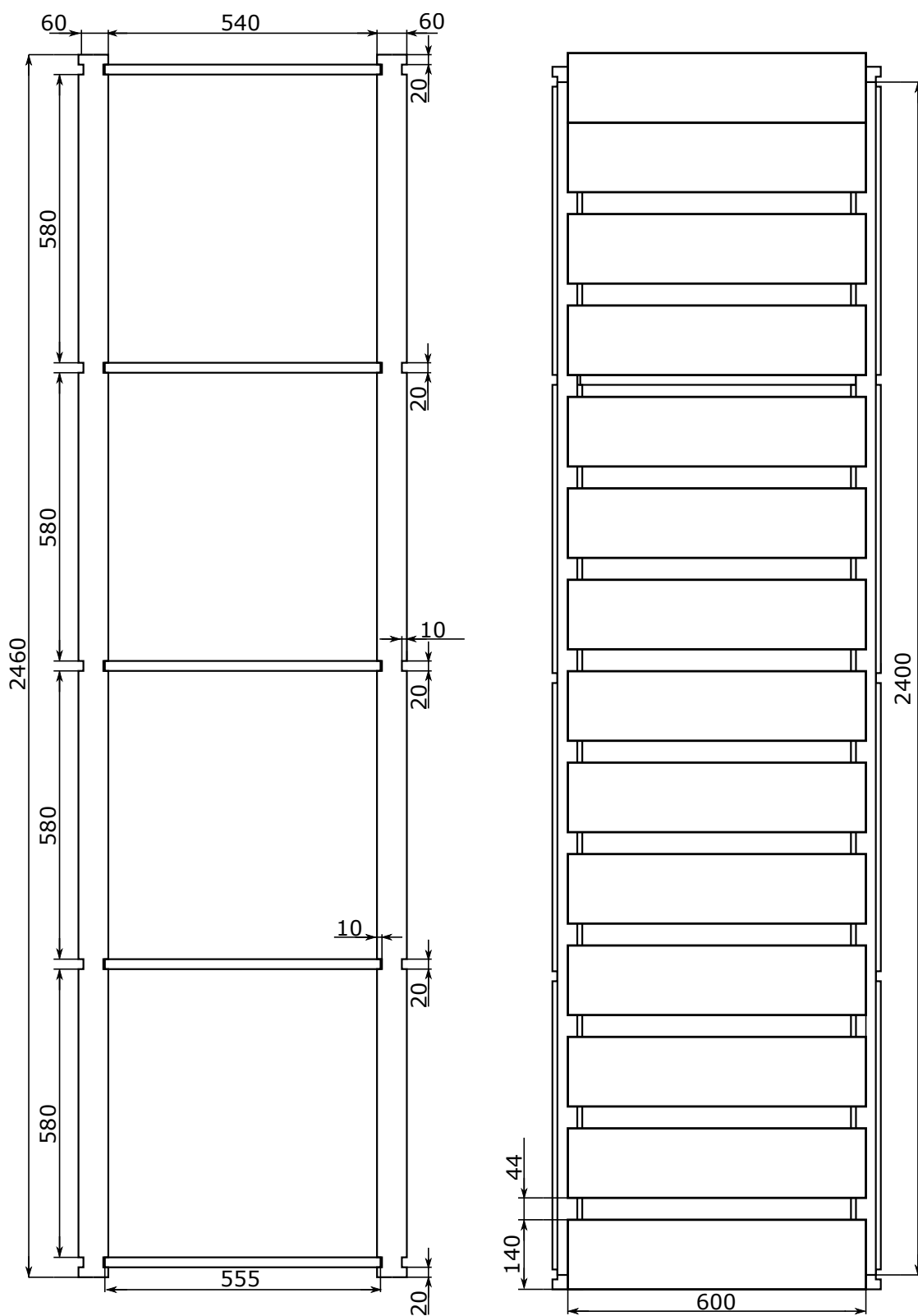
Obr. A.2: Rozložení čelních latí pro variantu mezery 4 mm



Obr. A.3: Rozložení čelních latí pro variantu mezery 19 mm



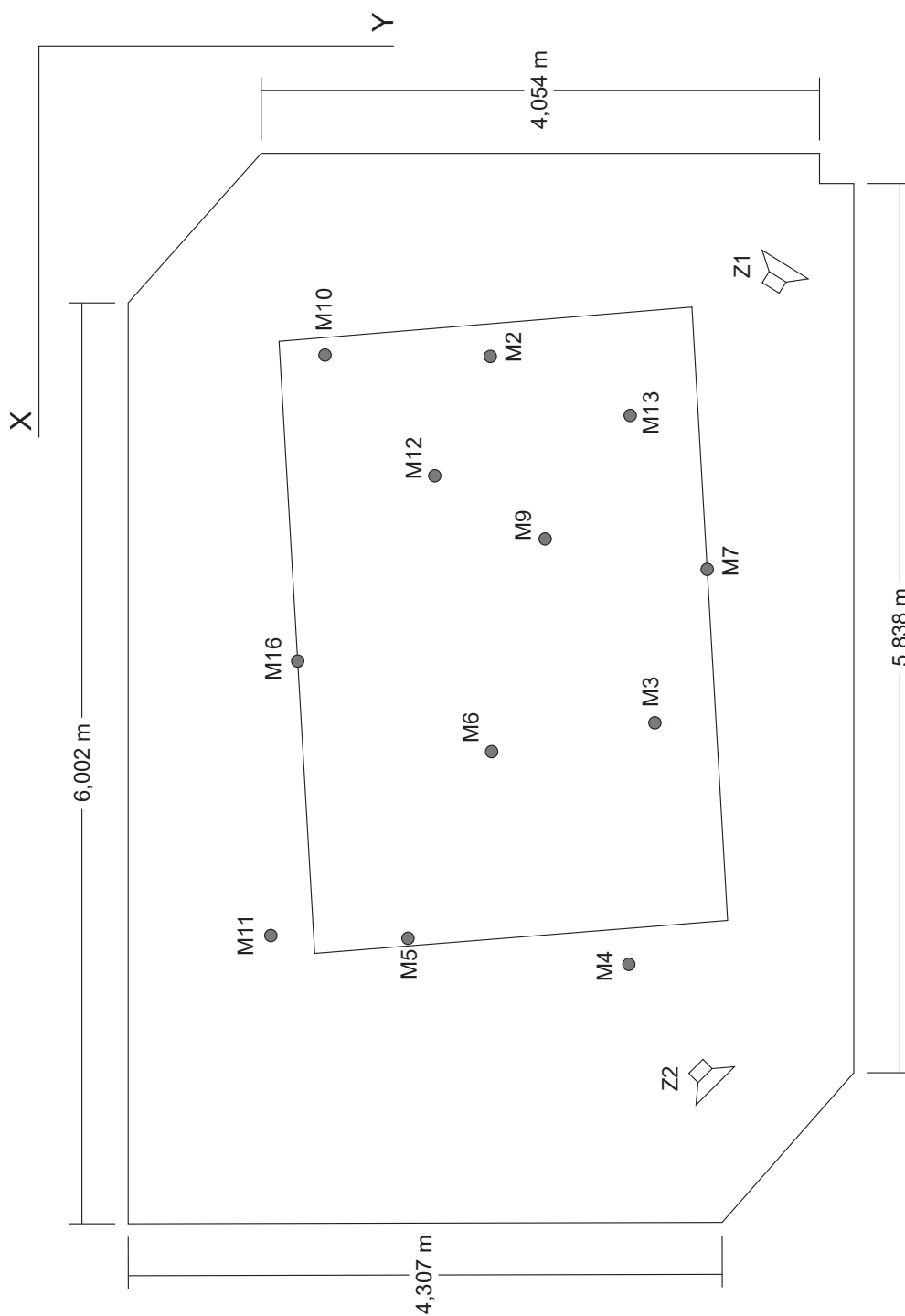
Obr. A.4: Rozložení čelních latí pro variantu mezery 44 mm



(a) Sestava profilů a příček

(b) Ukázka rozložení předních latí ve variantě s mezerou 44 mm

Obr. A.5: Nákres jedné sekce rezonátoru



Obr. A.6: Rozměry dozvukové komory, polohy mikrofonů [Převzato z [10]]

Příloha B

Tabulky

Skupina	Mikrofon	Mikrofon v PULSE	x [m]	y [m]	h [m]
1	M2	2	1,3	2,64	1,6
1	M3	4	3,7	3,84	1,7
1	M4	1	5,3	3,64	1,3
1	M5	3	5	2,04	2,6
2	M6	3	3,9	2,64	1,8
2	M7	1	2,7	4,24	2,1
2	M9	4	2,5	3,04	1,5
2	M10	2	1,3	1,44	1,3
3	M11	1	5	1,04	1,8
3	M12	3	2,1	2,24	1,5
3	M13	4	1,7	3,64	2,6
3	M16	2	3,3	1,24	1,3

Tab. B.1: Skupiny mikrofonů a jejich polohy v dozvukové komoře

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

Tab. B.2: Polohy zdroje v dozvukové komoře

Měření	Šířka šterbiny [mm]	Pozice zdroje	Skupina mikrofonů	Teplota [°C]	Vlhkost [%]
1	4	Z1	1	19,9	73
2	4	Z2	1	19,9	73
3	4	Z2	2	19,9	73
4	4	Z1	2	19,9	73
5	4	Z1	3	19,9	72
6	4	Z2	3	19,9	72
7	19	Z1	1	19,9	72,5
8	19	Z2	1	19,9	73
9	19	Z2	2	19,9	72
10	19	Z1	2	19,9	72,5
11	19	Z1	3	19,9	71,5
12	19	Z2	3	19,9	71,8
13	44	Z1	1	19,9	74
14	44	Z2	1	20,1	73
15	44	Z2	2	20,1	73
16	44	Z1	2	20,1	73
17	44	Z1	3	20	73,5
18	44	Z2	3	20	73,6

Tab. B.3: Měřicí podmínky a konfigurace

Štěrbina [mm]	4			19			44		
Zdroj	Z1	Z2	Z12	Z1	Z2	Z12	Z1	Z2	Z12
f [Hz]	T [s]								
100	3,09	3,77	3,43	3,8	4,58	4,19	4,48	5,08	4,78
125	2,81	3,21	3,01	3,57	3,86	3,72	3,74	3,92	3,83
160	2,44	2,38	2,41	2,91	3,04	2,97	2,9	3,23	3,06
200	3,43	3,49	3,46	3,26	2,48	2,87	3,32	2,52	2,92
250	4,49	4,21	4,35	2,96	2,7	2,83	2,8	2,57	2,68
315	4,9	4,66	4,78	3,21	3,11	3,16	2,75	2,74	2,75
400	5,84	5,91	5,87	3,53	3,59	3,56	3,07	3,08	3,07
500	6,24	6,27	6,25	4,02	4,03	4,02	3,3	3,32	3,31
630	6,53	6,48	6,5	4,35	4,35	4,35	3,55	3,5	3,52
800	6,61	6,57	6,59	4,55	4,51	4,53	3,73	3,74	3,74
1000	6,48	6,5	6,49	4,68	4,63	4,65	3,79	3,85	3,82
1250	6,31	6,29	6,3	4,72	4,76	4,74	3,94	3,89	3,91
1600	5,87	5,87	5,87	4,51	4,51	4,51	3,79	3,75	3,77
2000	5,27	5,26	5,26	4,22	4,18	4,2	3,53	3,54	3,53
2500	4,73	4,7	4,71	3,87	3,85	3,86	3,4	3,39	3,39
3150	4,19	4,13	4,16	3,45	3,44	3,45	3,18	3,16	3,17
4000	3,4	3,38	3,39	2,9	2,88	2,89	2,81	2,78	2,8
5000	2,8	2,79	2,8	2,49	2,48	2,48	2,41	2,39	2,4

Tab. B.4: Doba dozvuku všech tří variant šířky štěrby měřeného vzorku