

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
KET – Katedra materiálů a technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Určení pohltivosti akustických prvků v dozvukové komoře ve svislé konfiguraci

Autor práce: **Lukáš Nolč**
Vedoucí práce: **Ing. Stanislav Bouzek**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš NOLČ**
Osobní číslo: **E19B0022P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Určení pohltivosti akustických prvků v dozvukové komoře ve svislé konfiguraci**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte normu ČSN EN ISO 354 a určete možnosti měření pohltivosti akustických prvků ve svislé konfiguraci.
2. Realizujte vhodný měřicí přípravek na stěnu dozvukové komory umožňující montáž obvyklých rozměrů akustických prvků.
3. Porovnejte výsledky měření činitele zvukové pohltivosti ve svislé a vodorovné konfiguraci.


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**



Seznam doporučené literatury:

- ČSN ISO 354 – Akustika. Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti.
- M. Krňák. Akustické obklady.
- F. Kolmer, J. Kyncl. Prostorová akustika.
- T.J. Cox, P. D'Antonio. Acoustic Absorbers and Diffusers.
- L. L. Beranek → Acoustics.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se v úvodu zabývá teorií týkající se měření v dozvukové komoře. V teoretické části jsou nadefinovány odborné termíny, postupy a metody používané v prostorové akustice a při měření doby dozvuku. V praktické části je poté uveden postup výroby přípravku určeného pro měření akustických obkladů v dozvukové komoře ve svislé konfiguraci. Další část je věnována měření doby dozvuku s dvěma odlišnými akustickými obklady a následnému určení jejich činitele zvukové pohltivosti. Na závěr je uvedeno zhodnocení, jaký vliv má konfigurace akustického prvku na jeho činitele zvukové pohltivosti.

Klíčová slova

Doba dozvuku, dozvuková komora, činitel zvukové pohltivosti, akustický prvek

Abstract

This bachelor's thesis deals with the theory of measurements in the reverberation chamber. The theoretical part defines technical terms, procedures and methods used in room acoustics and in measuring reverberation time. The practical part is focused to the production of the construction that is needed for measuring of acoustic elements in the reverberation chamber, in a vertical configuration. The next part is devoted to measuring of the reverberation time with two different acoustic tiles and the subsequent determination of their sound absorption factor. In the conclusion is determined whether the configuration of the acoustic element influences its sound absorption factor.

Key Words

Reverberation time, reverberation chamber, sound absorption factor, acoustic element

Obsah

Úvod.....	1
1 Teoretická část.....	2
2 Norma ČSN EN ISO 354	3
2.1 Definice termínů uvedených v ČSN EN ISO 354.....	3
2.1.1 Dozvuková křivka.....	3
2.1.2 Doba dozvuku	4
2.1.3 Hladina akustického tlaku.....	5
2.1.4 Ekvivalentní pohltivá plocha místnosti.....	6
2.1.5 Ekvivalentní pohltivá plocha zkušební vzorku.....	6
2.1.6 Plocha zkušební vzorku	6
2.1.7 Činitel zvukové pohltivosti.....	6
2.2 Dozvuková komora a její náležitosti.....	6
2.2.1 Difúzní zvukové pole a jeho dosažení	7
2.2.2 Ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové místnosti.....	8
2.3 Zkušební vzorky určené pro měření.....	9
2.4 Způsoby montování zkušebních vzorků do dozvukové komory.....	10
2.4.1 Montáž typu A	10
2.4.1 Montáž typu B	10
2.4.2 Montáž typu E.....	11
2.4.1 Montáž typu G	12
2.4.2 Montáž typu I.....	12
2.5 Měření doby dozvuku.....	13
2.5.1 Vlhkost a teplota při měřeních.....	13
2.5.2 Metoda přerušného šumu	13
2.5.3 Metoda integrované impulsové odezvy	14
2.5.4 Zpracování měřených dat a výpočet pohltivosti	16
2.5.5 Závěrečné operace s výsledky	17
3 Praktická část.....	18

4	Konstrukce přípravku pro měření v dozvukové komoře	19
5	Měření v dozvukové místnosti FEL ZČU	22
5.1	Měření doby dozvuku v prázdné dozvukové místnosti.....	24
5.2	Měření doby dozvuku s plošným akustickým obkladem	26
5.3	Zhodnocení měření.....	31
6	Ověření ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory	32
7	Určení činitele zvukové pohltivosti.....	34
7.1	Výpočet ekvivalentní pohltivé ploch zkušební vzorku	34
7.2	Výpočet činitele zvukové pohltivosti.....	37
8	Závěr.....	39
	Literatura.....	41
	Seznam obrázků.....	43
	Seznam tabulek	45
	Seznam příloh	46
	Přílohy.....	I

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
A_1	Ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory	$[m^2]$
A_2	Ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory s umístěným zkušebním vzorkem	$[m^2]$
A_T	Ekvivalentní pohltivá plocha zkušebního vzorku	$[m^2]$
A_P	Přepočítaná ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory	$[m^2]$
A_{1PK}	Ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory, pro měření s reproduktorem na pozici Z1	$[m^2]$
A_{1SK}	Ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory s přípravkem ve svislé konfiguraci, pro měření s reproduktorem na pozici Z1	$[m^2]$
A_{1TSK}	Ekvivalentní pohltivá plocha zkušebního vzorku ve svislé konfiguraci, pro měření s reproduktorem na pozici Z1	$[m^2]$
$ATSK$	Výsledná ekvivalentní plocha zkušebního vzorku z podhledových desek, při měření ve svislé konfiguraci	$[m^2]$
ATP	Výsledná ekvivalentní pohltivá plocha zkušebního vzorku z podhledových desek, při měření na podlaze	$[m^2]$
C	Konstanta korekce impulzové odezvy na integrovaném rozsahu	$[-]$
c	Rychlost zvuku ve vzduchu	$[m/s]$
E	Zpětně integrovaný kvadrát impulzové odezvy	
f	Frekvence	$[Hz]$
f_s	Schroederova frekvence	$[Hz]$
l_{max}	Nejdelší vzdálenost dvou bodů na hranici dozvukové komory	$[m]$
L_P	Hladina akustického tlaku	$[dB]$
L_{Pn}	Hladina akustického tlaku pro n-tý pokles	$[dB]$
m	Součinitel útlumu ve vzduchu s ohledem na aktuální klimatické podmínky v komoře	$[m^{-1}]$
MX	Pozice umístění mikrofonů v dozvukové komoře	
N	Celkový počet poklesů hladiny akustického tlaku	$[-]$
PC	počítač	
p	Akustický tlak	$[Pa]$
p_0	Referenční hodnota akustického tlaku	$[Pa]$
$p(\tau)$	Akustický tlak impulzové odezvy v čase τ	$[Pa]$
S	Plocha zkušebního vzorku	$[m^2]$
S_v	Výsledná hodnota plochy zkušebního vzorku	$[m^2]$
S_{max}	Horní hranice plochy vzorku v dozvukové komoře	$[m^2]$
T	Doba dozvuku	$[s]$
T_{PK}	Průměrná hodnota doby dozvuku získaná zprůměrováním $T1_{PK}$ a $T2_{PK}$	$[s]$

T_{SK}	Průměrná hodnota doby dozvuku získaná zprůměrováním $T1_{SK}$ a $T2_{SK}$	[s]
T_P	Průměrná hodnota doby dozvuku získaná zprůměrováním $T1_P$ a $T2_P$	[s]
T_0	Optimální doba dozvuku v daném prostoru	[s]
T_1	Průměrná doba dozvuku v dozvukové komoře, bez umístěného zkušební vzorku	[s]
T_2	Průměrná doba dozvuku v dozvukové komoře, s umístěným zkušebním vzorkem	[s]
$T1_{PK}$	Průměrná doba dozvuku, prázdné dozvukové komory, při aktivním reproduktoru na pozici Z1	[s]
$T1_{SK}$	Zprůměrovaná doba dozvuku, pro měření s reproduktorem na pozici Z1 s přípravkem ve svislé konfiguraci	[s]
$T1_P$	Zprůměrovaná doba dozvuku, pro měření s reproduktorem na pozici Z1 s přípravkem umístěným na podlaze dozvukové komory	[s]
$T2_{PK}$	Průměrná doba dozvuku, prázdné dozvukové komory, při aktivním reproduktoru na pozici Z2	[s]
$T2_{SK}$	Zprůměrovaná doba dozvuku, pro měření s reproduktorem na pozici Z2 s přípravkem ve svislé konfiguraci	[s]
$T2_P$	Zprůměrovaná doba dozvuku, pro měření s reproduktorem na pozici Z2 s přípravkem umístěným na podlaze dozvukové komory	[s]
T_{MX}	Doba dozvuku, změřená mikrofonom na pozici MX	[s]
T_{60}	Doba dozvuku pro pokles o 60 dB	[s]
t	Časový okamžik konce integrace	[s]
t_1	Výchozí čas integrace	[s]
t_0	Čas při hladině akustického tlaku L_P o 10 dB vyšší než v bodě t_1	[s]
V	Objem dozvukové komory	[m ³]
V_{PK}	Objem dozvukové komory, využité při měřeních	[m ³]
X	Souřadnice	[mm]
Y	Souřadnice	[mm]
Z	Souřadnice	[mm]
$Z1$	Pozice umístění reproduktoru v dozvukové komoře	
$Z2$	Pozice umístění reproduktoru v dozvukové komoře	
α	Činitel zvukové pohltivosti, počítaný z poměru energií	[-]
α_s	Činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvuku	[-]
τ	Čas	[s]

Úvod

Doba dozvuku je parametr, se kterým se setkáváme dnes a denně, aniž bychom jej výrazně vnímali. V uzavřených prostorech, jako je například učebna nebo přednášková místnost, lze často narazit na nesrozumitelný projev přednášejícího. V tomto případě to nemusí být vždy jeho chyba, protože náš sluchový vjem může ovlivnit právě nevyhovující akustické prostředí dané dobou dozvuku. Je to veličina spadající do oboru zvaného prostorová akustika a souvisí s celou řadou dalších veličin, kterým se tato bakalářská práce bude věnovat.

Nejen mluvené slovo, ale například i hudba či zpěv mohou být negativně ovlivněny dobou dozvuku. Aby byl podpořen komfort poslechu, je tedy nutné s dobou dozvuku pracovat, a to tak, že se budeme zabývat celým prostorem, kde je zvuk reprodukován. Je nutné zvolit vhodné akustické materiály a celé prvky. Rozložení akustického pole ovlivní nejen volba konkrétního materiálu, ale i jeho konfigurace a umístění v prostoru.

Aby bylo možné ověřit parametry těchto akustických materiálů, je nutné je podrobit měření v dozvukové komoře. Protože se tato práce zabývá porovnáním činitelů zvukové pohltivosti daných akustických obkladů v nestandardní svislé konfiguraci oproti běžné měřicí konfiguraci na podlaze, byl vyhotoven přípravek, který umožňuje právě umístění akustických obkladů do dozvukové komory ve svislé konfiguraci.

Pro určení činitele zvukové pohltivosti je nutné změřit dobu dozvuku. Ta se získává při měřeních v dozvukové komoře, kdy je nutné postupovat podle normy [1]. Pro měření lze využít celou řadu metod získávání doby dozvuku, nicméně tato práce je zaměřena výhradně na metodu přerušného šumu. Pomocí této metody byly získány výsledné doby dozvuku. V dalším kroku byly určeny ekvivalentní pohltivé plochy měřeného vzorku. Poslední část je věnována právě určení výsledného činitele zvukové pohltivosti měřených akustických obkladů.

V závěru práce je porovnáno, zda má konfigurace akustického prvku vliv na jeho pohltivost. Jsou zde také uvedeny možné důvody rozdílnosti měřených parametrů a způsob, jakým problematiku řešit.

1 Teoretická část

Teoretická část vychází výhradně z normy [1], která udává podmínky a požadavky na určení činitele zvukové pohltivosti v dozvukové komoře. Budou zde popsány definice základních akustických veličin, které je potřeba využít a znát při měření doby dozvuku a následných výpočtech s ní spojených. Dále se bude zabírat rozměrovými náležitostmi dozvukové komory, které mají vliv na samotné chování zvuku v tomto uzavřeném prostoru a ovlivňují tak měřenou dobu dozvuku. Budou zde vysvětleny vlastnosti, které by měla dozvuková komora mít při samotných měřeních z hlediska teploty či vlhkosti, protože tyto parametry zásadně ovlivňují šíření zvuku. Pro měření doby dozvuku lze využít několik metod, nicméně větší část teorie bude věnována metodě přerušného šumu, která byla použita při měřeních v této bakalářské práci. Protože sledovanou veličinou při měřeních v dozvukové místnosti je doba dozvuku, bude část teoretického úvodu věnována právě popisu měření této veličiny. Krátce zde bude popsáno jak zpracovat měřené veličiny a jak postupovat při výpočtech, vedoucích k získání činitele zvukové pohltivosti. Úsek teorie bude věnován konstrukcím s akustickým materiálem, určených pro měření v dozvukové komoře a pro jejich reálné použití. Část textu se bude věnovat přílohám normy, které se zabírají možnostmi montáže a následným měřením akustických vzorků.

2 Norma ČSN EN ISO 354

Norma se zabývá měřením doby dozvuku v dozvukové komoře a následným určováním činitele zvukové pohltivosti. Dozvuková komora je uzavřenou místností se specifickými rozměry a vlastnostmi, které je nutné při měřeních dodržovat. Norma v podstatě pojednává o tom, jak je zvukem vytvořená energie pohlcována danou plochou v uzavřeném prostoru. Jak velké množství energie bude pohlceno, závisí u pohltivých materiálů často na úhlu dopadu této energie na danou plochu. Protože je téměř nepředvídatelné, pod jakým úhlem vlny zvuku budou dopadat na dané plochy, je nejvýhodnější pro účely normalizace uvažovat rovnoměrné úhlové rozložení dopadů. Důležité je při tom všem uvažovat i různou pohltivost jednotlivých materiálů. Uvažujeme-li rovnoměrné úhlové rozložení dopadů zvukových vln a skutečnost, že je akustická intenzita v každém bodě místnosti stejná, označuje se takové prostředí za difúzní a dopady zvuku jako náhodné.

Cílem normy je stanovení vhodné metody měření doby dozvuku, aby bylo možné následně data zpracovat s co nejmenší chybou. Výsledky získané při měřeních podle této normy mohou být použity pro porovnání jednotlivých akustických materiálů nebo konstrukcí a pro výpočty spojené s prostorovou akustikou.

2.1 Definice termínů uvedených v ČSN EN ISO 354

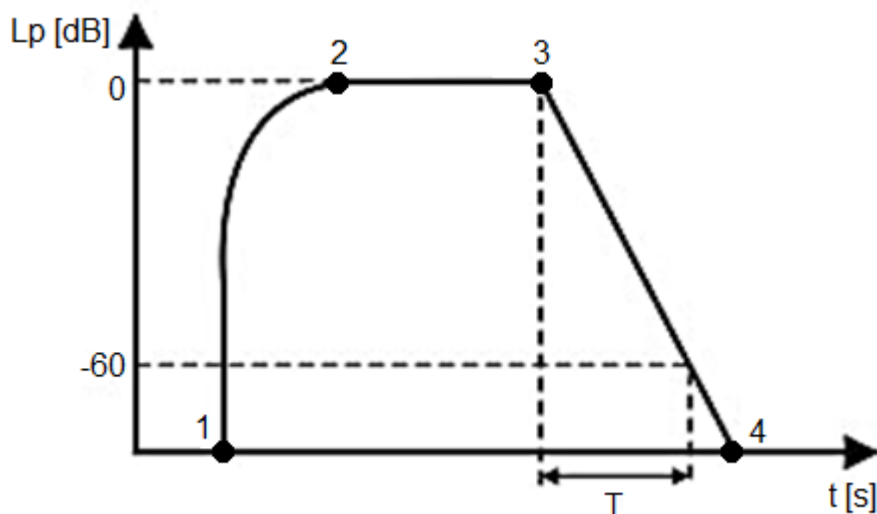
Pro správné pochopení a orientaci v normě ČSN EN ISO 354 je potřeba definovat některé odborné termíny a veličiny, které se používají hlavně v prostorové akustice a lze jimi popsat chování zvuku v uzavřeném prostoru. [1]

2.1.1 Dozvuková křivka

Jedná se o grafické vyjádření klesající hladiny akustického tlaku v uzavřeném prostoru v závislosti na čase, kdy nejsledovanější částí je pokles L_P po ukončení generování zvuku.

Obrázek 1 zobrazuje teoretický průběh závislosti hladiny akustického tlaku na čase, kde lze pozorovat začátek generování zvuku, tedy postupný nárůst hladiny akustického tlaku L_P v uzavřené místnosti mezi body 1 a 2. Mezi body 2 a 3 se závislost chová jako přímka, což reprezentuje nasycení uzavřeného prostoru zvukovou energií na maximální možnou hodnotu. Pokles křivky mezi body 3 a 4 je část, kde v bodě 3 je generování zvuku zdrojem přerušeno a zvuk následně v prostoru zaniká vlivem odrazů a pohlcení. Oblast mezi body 3 a 4 označujeme jako dozvukovou křivku. Popisovaná závislost je čistě teoretickou, reálná je v jednotlivých částech nepravidelná, což je zapříčiněno nerovnoměrným rozložením zvuku

v místnosti, odrazy zvukových vln od stěn a jiných přítomných překážek, rušivými vlivy nebo i charakterem generovaného zvuku a dalšími okolnostmi. [2]

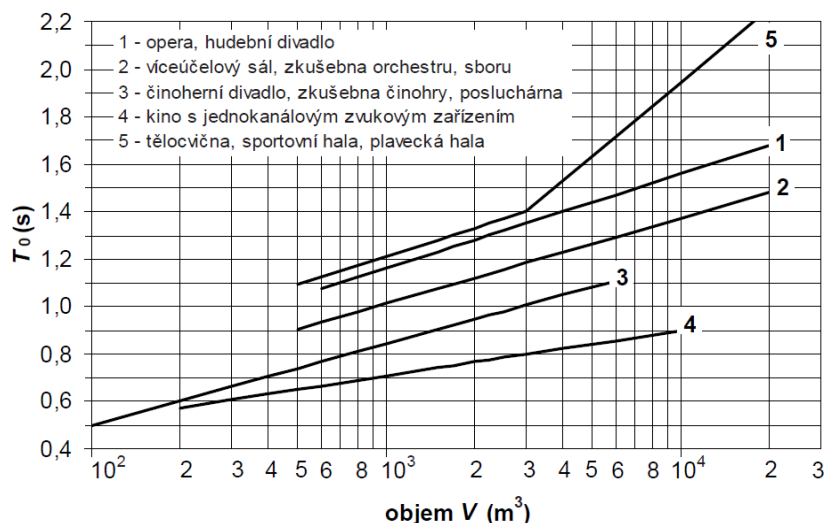


Obr.1 Teoretický příklad dozvukové křivky, zdroj viz [2], upraveno autorem dne 17.2.2022

2.1.2 Doba dozvuku

Je to doba T udávaná v sekundách, za kterou by došlo po přerušení generování zvuku k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB. Tato definice je založena na předpokladu, že je v ideálním případě závislost mezi L_p a časem lineární a že hladina akustického tlaku šumu pozadí je dostatečně nízká, což teoreticky vyobrazuje část křivky mezi body 3 a 4 na obrázku 1. Abychom této lineární části v reálném případě docílili, používáme lineární extrapolaci počáteční části křivky.[1]

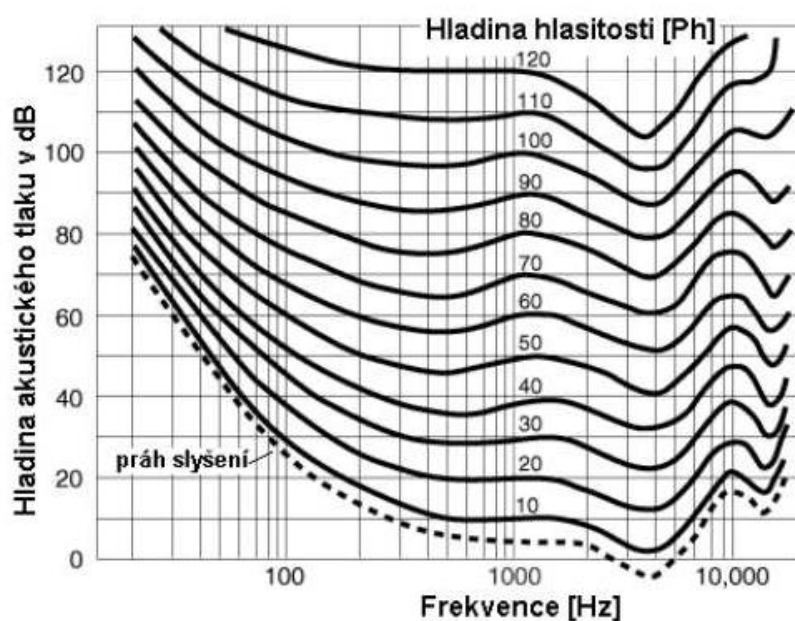
Z pohledu reálného vnímání doby dozvuku se jedná o velmi subjektivní parametr. Často je posuzován v souvislosti s prostorem, v jakém se posluchač nachází. Například doporučenou dobou dozvuku pro poslech mluveného slova v přednáškové místnosti je rozmezí 0,5 až 1,1 sekundy. Velký vliv má na tento parametr objem místnosti, ve které se nacházíme, a pohltivost jednotlivých stěn. Přibližnou ideální dobu dozvuku v závislosti na objemu místnosti vyobrazuje graf na obrázku 2. Závislost nám říká, v jakém rozmezí by se doba dozvuku T_0 měla pohybovat na frekvenci 1000 Hz v konkrétním prostoru. [11]



Obr.2 Závislost optimální doby dozvuku T_0 pro zvuk o frekvenci 1000 Hz na objemu uzavřeného prostoru V , zdroj viz [11]

2.1.3 Hladina akustického tlaku

Akustický tlak reprezentuje změny tlaku v prostoru, které jsou způsobeny zvukovými vlnami. Hladina akustického tlaku je často spojována se sluchovým vjemem. Graficky lze toto vyjádřit pomocí křivek stejně vnímané hlasitosti, tzv. izofon, které jsou závislostí hladin akustického tlaku na frekvenci zvuku. Nejmenší možná hladina akustického tlaku, která vyvolá sluchový vjem, též zvaná jako práh slyšení, je 0 dB. Naopak nejvyšší akustický tlak, který je pro lidské ucho ještě snesitelný, je přiřazován hodnotě zhruba 120 dB a je nazýván práh bolesti. Jednotlivé izofony jsou vyobrazeny na obrázku 3.[3]



Obr.3 Grafické znázornění jednotlivých izofon, zdroj viz [4]

Pro matematické vyjádření hladiny akustického tlaku lze použít vztah uvedený v [5]:

$$L_p = 20 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2.1)$$

kde

L_p je hladina akustického tlaku v dB;

p akustický tlak v Pa;

p_0 referenční hodnota akustického tlaku ($2 \cdot 10^5$ Pa);

2.1.4 Ekvivalentní pohltivá plocha místnosti

Plocha reprezentující dokonale pohltivý povrch bez uvažování ohybových jevů, která by jako jediný pohltivý objekt v jinak dokonalém odrazivém prostoru vedla k téže době dozvuku. Výsledná plocha je označena symbolem A_I v případě prázdné komory, nebo A_2 v případě komory, ve které se nachází měřený vzorek, a je udávána v m^2 .

2.1.5 Ekvivalentní pohltivá plocha zkušební vzorku

Plocha určená rozdílem ekvivalentní pohltivé plochy dozvukové komory spolu se zkušebním vzorkem a ekvivalentní pohltivé plochy dozvukové komory bez zkušební vzorku. Výsledná plocha je označována A_T a je též udávána v m^2 .

2.1.6 Plocha zkušební vzorku

Jedná se o plochu pokrytou zkušebním vzorkem, umístěným v dozvukové komoře na podlaze nebo na stěně. Tento rozměr značíme S a udáváme jej v m^2 .

2.1.7 Činitel zvukové pohltivosti

Tento činitel značíme α_S a jedná se o bezrozměrné číslo. Norma o něm pojednává jako o poměru A_T ku S . Toto zvolené označení norma uvádí, aby se činitel zvukové pohltivosti α_S nezaměnil s tím, který je vyhodnocován z poměru zvukové energie pohlcované danou plochou ku zvukové energii dopadající na tuto danou plochu. Ten je poté označován pouze α . Jeho rozsah se pochybuje od 0 do 1 a opět se jedná o bezrozměrné číslo, někdy vyjadřované i v procentech. Námi sledovaný parametr α_S je třeba odlišit od α , protože může dosahovat vyšších hodnot než 1, a to například z důvodu existence ohybového jevu na hraně materiálu. Výsledný činitel poté na rozdíl od α v procentech neuvádíme. [1] [6]

2.2 Dozvuková komora a její náležitosti

Pro měření doby dozvuku a určení činitele zvukové pohltivosti je nutným prostorem tzv. dozvuková komora.

Co se týče technických parametrů, jedním z nejdůležitějších jsou rozměry místnosti. Naměřené výsledky jsou závislé na chování zvuku v této komoře a její rozměry toto chování ovlivňují. Objem dozvukové komory V by dle normy neměl být menší než 150 m^3 . Pro dosažení optimálních výsledků měření je však doporučený objem alespoň 200 m^3 . Dalším omezením je pak horní hranice V , která by neměla překročit 500 m^3 . V případě takové velikosti komory by již docházelo k nezanedbatelným nepřesnostem měření zvukové pohltivosti na vysokých kmitočtech kvůli pohltivosti samotného vzduchu.

Dalším technickým parametrem, který je potřeba sledovat, je tvar dozvukové komory. Nejdelší vzdálenost dvou bodů na hranici místnosti musí být menší než 1,9násobek objemu komory umocněného na $1/3$. Matematicky lze toto vyjádřit následovně:

$$l_{max} < 1,9 \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (2.2)$$

kde

l_{max} je nejdelší vzdálenost dvou bodů na hranici místnosti v m;

V je objem dozvukové komory udávaný v m^3 ;

V případě, že chceme docílit rovnoměrného rozložení vlastních kmitů částic v celém objemu místnosti, zvláště ve frekvenčních pásmech nízkých kmitočtů, nesmí být poměr stran dozvukové komory poměrem malých celých čísel. [1]

2.2.1 Difúzní zvukové pole a jeho dosažení

Pro měření doby dozvuku je potřeba v dozvukové komoře dosáhnout difúzního zvukového pole. Teoreticky ideální difúzní zvukové pole by mělo mít v celém uzavřeném prostoru stejnou střední hodnotu zvukem vytvořené hladiny energie. Dále by mezi jednotlivými složkami v každém bodě tohoto zvukového pole v daném prostoru měl platit zákon energetické superpozice. Poslední podmínkou existence ideálního difúzního zvukového pole je, že v každém měřicím bodě existuje rovnoměrné rozložení středních toků akustické energie ze všech směrů v prostoru. [5]

V reálných případech se tomuto zvukovému poli snažíme alespoň přiblížit, a to pomocí pevných difuzorů nebo rotujících křídel. Difuzory by měly být tenké, mírně prohnuté a náhodně rozmístěné v dozvukové komoře v celém jejím prostoru. Tyto desky musí mít co nejmenší zvukovou pohltivost, aby docházelo k úplným odrazům zvukových vln. Jejich plošná hmotnost by ideálně měla být alespoň 5 kg/m^2 . Plocha odrazivých desek by se měla pohybovat v rozmezí $0,8 - 3 \text{ m}^2$. Cílem těchto difuzorů je náhodně odrážet zvukové vlny.

Kontrola, zda jsme dosáhli požadovaného difúzního zvukového pole, se provádí tak, že si zvolíme vhodný zkušební vzorek. Ten se poté namontuje podle jednoho z typů montáže

z kapitoly 2.4 do dozvukové komory. S umístěným vzorkem realizujeme měření jeho zvukové pohltivosti. Začíná se s dozvukovou komorou, ve které difuzory nejsou osazené. Následně se měření opakují, ale se vzrůstajícím počtem difuzorů. Pro každé měření se počítá průměrná hodnota činitele zvukové pohltivosti v oblasti od 500 Hz do 5000 Hz. Tyto získané hodnoty α_S následně vynášíme do grafu v závislosti na přibývajícím počtu difuzorů. V grafickém vyjádření této závislosti pak lze vypožorovat, že pro určitý počet difuzorů začíná být průměrná hodnota činitele zvukové pohltivosti konstantní. To znamená, že přidávání počtu difuzorů do místnosti nemá smysl, protože jsme tím dosáhli optimálního stavu difúzního zvukového pole. [1]

V reálných prostorech velmi záleží na tvaru a rozměrech prostoru, protože i v čtvercových místnostech může vzniknout po dosažení Schroederovy frekvence f_S přijatelné difúzní pole i bez použití difuzorů. Schroederovu frekvenci lze vypočítat dle vztahu: [8] [7]

$$f_S = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.3)$$

kde

f_S je Schroederova frekvence v Hz;

T_{60} je doba dozvuku pro pokles o 60 dB, udávaná v s;

V je objem místnosti v m^3 ;

2.2.2 Ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové místnosti

Aby byla v dozvukové komoře zajištěna dostatečně dlouhá doba dozvuku, norma [1] určuje maximální hranice ekvivalentních pohltivých ploch v níže uvedených třetinooktávových frekvenčních pásmech. V případě, že není v dozvukové komoře umístěný měřený zkušební vzorek, platí pro maximální ekvivalentní pohltivé plochy určitá krajní hodnota. Norma udává, že v daných třetinooktávových frekvenčních pásmech f nesmí A_I překročit uvedené hodnoty v tabulce 1.

Tabulka 1 Maximální pohltivé plochy dozvukové komory o objemu $V=200 m^3$, zdroj viz [1]

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
A_I [m²]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A_I [m²]	6,5	7	7,5	8	9,5	10,5	12	13	14

Norma uvádí ekvivalentní pohltivé plochy pouze pro objem místnosti $200 m^3$, proto je nutné v případě jiných objemů A_I přepočítat dle vztahu:

$$A_p = A_1 \cdot \left(\frac{V}{200}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.4)$$

kde

A_p je přepočítaná hodnota ekvivalentní pohltivé plochy dozvukové komory v m^2 ;

A_1 je ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory, při $V=200 \text{ m}^3$, v m^2 ;

Jedná se o velmi důležitý parametr, protože je součástí výpočtu činitele zvukové pohltivosti α_s . [1]

2.3 Zkušební vzorky určené pro měření

Norma [1] uvádí možnou velikost plochy zkušební vzorku stejně jako v předchozí kapitole pro objem místnosti $V=200 \text{ m}^3$. Konkrétní plocha vzorku v dozvukové komoře o tomto objemu by se měla pohybovat mezi 10 až 12 m^2 . V případě, že je dozvuková komora jiného objemu, je potřeba přepočítat horní hranici plochy dle následujícího vztahu:

$$S_v = S_{max} \cdot \left(\frac{V}{200}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.5)$$

kde

S_v je výsledná hodnota plochy vzorku v m^2 ;

S_{max} je horní hranice plochy vzorku v dozvukové komoře (12 m^2);

V je objem dozvukové komory, na který je S_{max} přepočítáván, udávaný v m^3 ;

Pravidlem je, že čím je větší dozvuková komora, tím větší by měl být i zkušební vzorek. Je-li měřený vzorek z hlediska zvuku málo pohltivý, je třeba volit horní hranici jeho plochy.

Tvar a technologie montáže zkušební vzorku jsou také dány normou [1]. Vzorek musí mít buď tvar čtverce, nebo obdélníku. Poměr stran celkové plochy zkušební vzorku by se měl pohybovat mezi 0,7 a 1. V klasickém případě měření jsou vzorky umístovány na podlahu, a to tak, že jsou alespoň 1 metr vzdáleny od každé stěny dozvukové místnosti, kdy by okraje vzorku neměly být rovnoběžné s nejbližší stěnou dozvukové komory.

Další možností umístění zkušební vzorku oproti klasickému způsobu je umístění přímo na stěnu dozvukové komory. Vzorek je poté montován na určitou plochu místnosti za použití jednoho z montážních způsobů, které norma připouští. Více informací o montážních způsobech bude uvedeno v kapitole 2.4.

Norma udává i pravidla pro samostatné objekty s pohltivými vlastnostmi, nicméně v této bakalářské práci se budeme věnovat pouze plošným vzorkům. Vliv umístění vzorku bude ověřen v praktické části této bakalářské práce. [1]

2.4 Způsoby montování zkušebních vzorků do dozvukové komory

Norma [1] uvádí několik možných způsobů montáže vzorku do dozvukové komory. Konkrétní způsob montáže je volen v závislosti na zamýšleném použití pohltivých prvků.

2.4.1 Montáž typu A

V tomto případě se jedná o standardní způsob umístění vzorku například na podlahu dozvukové místnosti, kde může být také pevně přichycen pomocí upevňovacích prvků. Obvodový rám obepínající vzorek musí být tvořen masivním odrazivým materiálem. Nejčastěji je sestaven buď z plechů o tloušťce 1 mm, nebo ze sádrokartonové či dřevěné desky tlusté alespoň 12,5 mm. Při montování rámu musí být zajištěno, že mezi rámem a podlahou nebude žádná vzduchová mezera. To samé platí i pro akustický materiál, který také musí být těsně přisazen k rámu, aby mezi těmito částmi nemohl pronikat vzduch. Vznikne-li vzduchová mezera mezi výše uvedenými komponenty soustavy, je třeba použít těsnicí materiál, jako je lepidlo, páska nebo tmel, aby se zabránilo pohlcování zvuku. V protokolu o měření je poté třeba uvést užitou metodu těsnění a materiál. Stejně tak zde bude uveden způsob, jakým byl kompletní zkušební vzorek přichycen k podlaze. Výjimkou může být případ, kdy se při běžném užívání zkušebního vzorku utěsněný rám u zdi nepoužívá. V takové situaci je možné měření bez utěsněného rámu. Další výjimka může nastat u odkrytých boků rámu. Standardně by totiž boky rámu měly být zakryté, aby nedocházelo k pohlcení zvuku mimo čelní plochu. Měření s odkrytými boky rámu je možné, je-li zkušební vzorek v reálné situaci takto používán, avšak je třeba plochu boků zahrnout při výpočtech celkové plochy vzorku. Další náležitostí montáže typu A je, že horní strana rámu, tedy jeho čelo, musí být zarovnáno s povrchem zkušebního vzorku. Pokud je zkušební vzorek překryt materiálem s neuzavřeným povrchem, jako je například děrovaná deska, jeho detailní popis musí být opět uveden v závěrečném protokolu o daném měření.

2.4.1 Montáž typu B

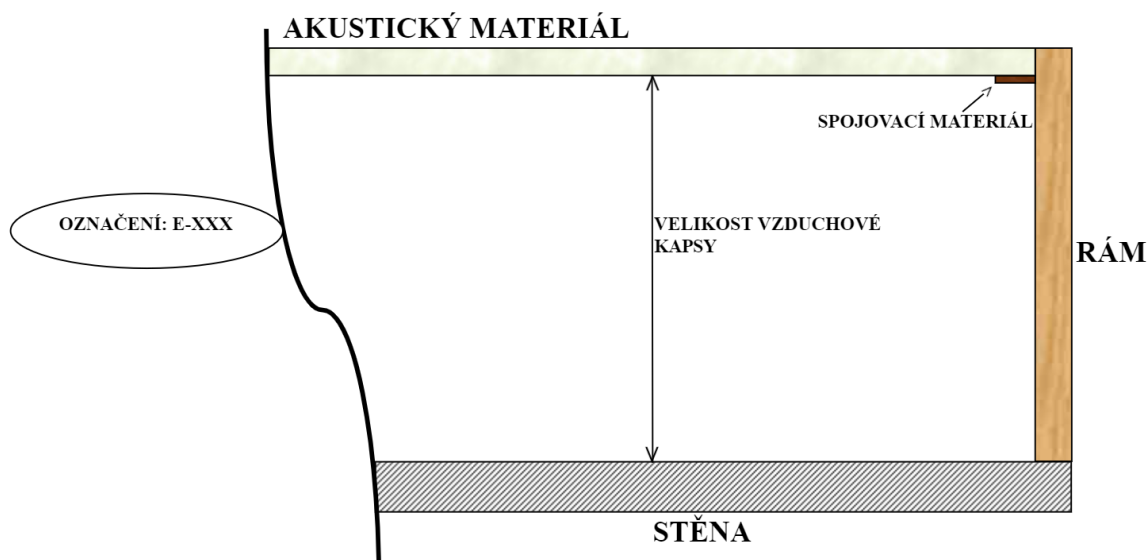
Tento typ montáže je používán u výrobků lepených přímo na povrch podkladové desky, kdy vzniká tenká vzduchová mezera mezi výrobkem a povrchem podkladu. Postup při realizaci montáže začíná přilepením vzorku na sádrokartonovou desku, která je přímo spojena se stěnou místnosti. Lepidlo nanášíme na čtyři místa zadní strany zkušebního vzorku. Aby vznikla vzduchová mezera, je mezi zkušební vzorek a sádrokartonovou desku vložena podložka o tloušťce 3 mm a velikosti 25x25 mm. Tato vzduchová mezera je zakryta masivním rámem. Ten obepíná celý akustický materiál včetně sádrokartonové desky. Pro

realizaci rámu lze opět použít ocelové plechy o tloušťce 1 mm nebo sádkartonové či dřevěné desky tlusté 12,5 mm. Mezi akustickým materiálem a rámem, stejně tak mezi povrchem místnosti a rámem nesmí být vzduchová mezera. Rám tedy musí být utěsněn jak u stěny, tak i u spojů s akustickým materiálem přilepeným na podkladové desce. Čelo rámu má být jako v předchozím případě zarovnáno s povrchem pohltné plochy.

2.4.2 Montáž typu E

Zajímavým způsobem z hlediska cíle této bakalářské práce je typ montáže E. Pro tento typ montáže je poznávacím znakem, že při montáži za zkušebním vzorkem vzniká vzduchový polštář. O tom, jak je vzduchová mezera velká, vypovídá označení typu montáže. Například označení E-200, kdy E je označení typu montáže a 200 je vzdálenost udávaná v milimetrech mezi lícem materiálu, na který dopadají zvukové vlny, a mezi povrchem stěny, ke které je vzorek přimontován. V praxi jsou běžně používány vzdálenosti 200, 300, 400 mm, ale je možno použít i jiné rozměry vzduchových mezer.

Z hlediska materiálu musí být rám opět buď ocelový, dřevěný, nebo z jakéhokoliv neporézního materiálu. Podmínkou je i jeho plošná hmotnost, která by měla být minimálně 20 kg/m². Tento rám spolu s akustickým materiálem s danou pohltností musí uzavírat vzduchový polštář mezi stěnou a vzorkem. V místě dotyku rámu se stěnou musí být opět zajištěno pevné utěsnění, aby bylo zabráněno proudění vzduchu do prostor, který rám obklopuje. To může být realizováno opět například pomocí tmelů či jiných izolačních nebo spojovacích materiálů. Utěsnění musí být zajištěno i mezi akustickým materiálem a rámem, stejně jako v předchozím případě. Poslední podmínkou této realizace je, že akustický materiál musí být zarovnan s čelní stranou rámu. Tato realizace dává smysl v případě umístění akustického prvku na stěnu či na strop. Norma uvádí i možnost měření na podlaze, nicméně vzhledem k běžnému používání tohoto typu montáže v reálném prostředí nedává měření na podlaze velký smysl. Snad jen pro porovnání výsledků s konfiguracemi na stěně nebo stropě.



Obr.4 Znárodnění montáže typu E, vytvořeno v online aplikaci SmartDraw

2.4.1 Montáž typu G

Typ této montáže je zaměřen na akustické prvky, které je možné použít jako závěs, okenní roletu nebo například okenní záclonu. V těchto případech se do dozvukové komory prvek umístí tak, aby byl závěs rovnoběžně se stěnou a v určité vzdálenosti od podlahy. Označení musí být stejné jako v předchozím případě takové, které nám udává konkrétní vzdálenost zkušební vzorku od stěny zavěšení. Norma uvádí výchozí označení G-100, což znamená, že je zkušební vzorek vzdálen 100 mm od stěny, na které byl uchycen. Chceme-li využít jinou vzdálenost, je to možné, ale daný rozměr musí být pak celočíselným násobkem 50 mm. Pokud je akustický prvek v praxi realizován i s rámem, je třeba jej při měřeních také použít. Pro akustický materiál a rám platí pravidla jako v předchozích případech montáže, a to taková, že vzorek musí být těsně přisazen k rámu a rám utěsněn u dané stěny. V případě jiných uspořádání musí být daná konfigurace detailně popsána v protokolu o měření.

2.4.2 Montáž typu I

Jedná se o akustické materiály stříkané přímo na povrch místnosti, jako je například omítka, některé druhy nátěrů nebo stříkaných pěn. Tento materiál je nutné umístit na vhodný podklad, který se po nanesení a následném vytvrzení nebo zaschnutí nijak nezdeformuje. Při měření zkušebních vzorků v dozvukové komoře je třeba využít montáž typu A. Je nutné tedy využít i rám z neporézního materiálu, kdy platí stejná pravidla pro utěsnění a další náležitosti.

2.5 Měření doby dozvuku

V kapitole 2.1.2 je již definován termín doba dozvuku. Jedná se tedy o určité doznívání zvuku poté, co byl přerušen zdroj generující zvuk. Tento parametr je velmi závislý na odrazivých vlastnostech ploch ve sledované místnosti. Zatímco vysoce odrazivé akustické prvky a obklady zapříčiní jeho pomalý pokles, vysoce absorpční materiály naopak dobu dozvuku zkracují. [9]

Pro měření doby dozvuku norma [1] uvádí dva možné způsoby. Metodu přerušného šumu a metodu integrované impulzové odezvy, které budou detailněji popsány níže v této kapitole.

2.5.1 Vlhkost a teplota při měřeních

Ještě před samotným měřením je potřeba zajistit podmínky v prostoru z hlediska relativní vlhkosti a teploty. Vzhledem k tomu, že se při změně těchto parametrů mění zvuková pohltivost vzduchu, mění se i doba dozvuku. Mohlo by dojít k negativnímu ovlivnění výsledků, a tedy k chybám při vyhodnocování. Relativní vlhkost by se měla pohybovat mezi 30 až 90 % a teplota by poté měla být minimálně 15 °C. Během měření by se však oba parametry měly měnit minimálně, aby byly zajištěny téměř stejné podmínky po celou dobu měření, a tudíž nedošlo k vzniku chyby při vyhodnocování výsledků.

Zkušební vzorek je třeba umístit do komory již při zvlhčování prostoru, aby pro něj byly zajištěné stejné podmínky a během měření již nedocházelo k změnám vlhkosti nebo teploty vlivem aklimatizace zkušebního vzorku. I při dodržení výše uvedených pravidel je po měření nutné použít korekci naměřených dat, která kompenzuje chybu vzniklou změnou teploty a relativní vlhkosti během měření.

2.5.2 Metoda přerušného šumu

Jedná se o jednu z metod používaných pro měření doby dozvuku v dozvukové komoře i mimo ni. Již v kapitole 2.1 byly uvedeny základní informace spojené s touto metodou, ale pro správné pochopení metody zde bude více popsána. Nejprve je nutné vybudit dozvukovou komoru signálem odvozeným ze širokopásmového nebo pásmového šumu se spojitým kmitočtovým spektrem. Použijeme-li širokopásmový šum, musí být jeho spektrum v dozvukové komoře takové, aby rozdíly hladin akustického tlaku v sousedních třetinooktávových pásmech byly menší než 6 dB. Při používání pásmového šumu je kladen důraz na skutečnost, že šířka pásma signálu musí být nejméně jedna třetina oktávy.

Aby došlo k dostačujícímu vybuzení prostoru zvukovým signálem, je nutné, aby zdroj generoval zvuk do té doby, než dojde k ustálení L_p ve všech uvažovaných kmitočtových pásmech. Norma proto udává, že doba buzení prostoru pro získání ustálené hladiny akustického tlaku by měla být alespoň poloviční oproti očekávané době dozvuku. Úroveň buzení musí být taková, aby dolní hladina vyhodnocovaného rozmezí akustického tlaku byla minimálně o 10 dB vyšší než L_p rušivého pozadí v každém měřeném třetinooktávovém pásmu. Při používání signálu s pásmem širším, než je 1/3 oktávy, může dojít vlivem různé doby dozvuku pro sousední kmitočtová pásma signálu ke zkreslení ve spodní části dozvukové křivky. Jsou-li doby dozvuku sousedních pásem rozdílné o 1,5násobek, pak se dozvukové křivky zaznamenávají a následně vyhodnocují s nejkratšími dobami dozvuku samostatně za pomoci třetinooktávového filtrování zvukového signálu.

Vzhledem k buzení šumovým signálem je tato metoda dostatečně přesná pouze v případě, že jsou měření opakována pro stejná rozmístění mikrofonů a zdroje zvuku. Pro průměrování je možné použít dvě metody. První metodou je skupinové průměrování, vycházející ze vztahu:

$$L_p(t) = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (2.6)$$

kde

$L_p(t)$ je hladina průměrného akustického tlaku v závislosti na čase, pro N poklesů, v dB;

$L_{pn}(t)$ je hladina akustického tlaku n-tého poklesu v čase, měřená v dB.

Druhou možností je využití aritmetického průměrování výsledných dob dozvuku. Při použití tohoto způsobu jsou jednotlivé dozvukové křivky vyhodnocovány samostatně a výsledné doby dozvuku vycházející z těchto křivek následně aritmeticky průměrovány.

Měření se provádí v dozvukové komoře, kde jsou rozmístěny jednotlivé mikrofony s všesměrovou charakteristikou. Mikrofony jsou rozmístěny tak, aby byly alespoň 1,5 metru od sebe, 1 metr od každé stěny dozvukové komory a 2 metry od zdroje zvuku. Norma [1] uvádí, že minimální počet pozic mikrofonu je 12 a minimální počet zdrojů zvuku 2. Výsledkem je tedy 12x2 dozvukových křivek.

2.5.3 Metoda integrované impulsové odezvy

Tuto metodu lze realizovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je metoda přímá, při které je impulz, charakterem co nejbližší Diracovu impulzu, generován například výstřelem z pistole, prasknutím nafukovacího balonku a podobně. Důležité je, aby impulz zabíral

dostatečnou šířku frekvenčního pásma a aby také prostor dozvukové komory dostatečně vybudil svou energií. Přímá metoda spočívá v přímém měření a snímání zvuku měřicím systémem bezprostředně po vygenerování impulsu.

Druhou možností je nepřímá metoda integrované impulzové odezvy, kde se využívá zvukových signálů, které vygenerují impulzovou odezvu. Je však nutné speciální zpracování signálu daným měřicím systémem. Vzhledem k tomu, že tato metoda může zlepšit odstup signálu od šumu, klesají nároky na dynamický rozsah generátoru zvuku oproti přímé metodě. Chceme-li zvýšit odstup signálu od šumu, používáme tzv. synchronizované průměrování. Během tohoto průměrování je však nutné stále kontrolovat, zda je impulzová odezva při všech měřeních neměnná.

Generovaný signál musí zabírat šířku pásma větší, než je jedna třetina oktávy. V ideálním případě by měl být širokopásmový signál tvarován tak, aby pokrýval třetinooktávová pásma se středními kmitočty od 100 Hz do 5 kHz, uvedenými v Tabulce 2.

Pro další zpracování signálu je nutné jej filtrovat po třetinooktávových pásmech, což lze provést před nebo po digitalizaci impulzové odezvy pomocí analogových či digitálních filtrů. K samotné filtraci však musí dojít ještě před integrováním signálu.

Integrací filtrovaného signálu získáváme téměř totožný výsledek dozvukového poklesu jako v případě použití metody přerušového šumu. Integrace se provádí dle vztahu:

$$E(t) = \int_0^{\infty} p^2(\tau) \cdot d\tau - \int_0^t p^2(\tau) \cdot d\tau = \int_{\infty}^t p^2(\tau) \cdot d(-\tau) \quad (2.7)$$

kde

$E(t)$ je zpětně integrovaný kvadrát impulzové odezvy v čase t ;

$p(\tau)$ je akustický tlak impulzové odezvy v čase τ ;

Dozvukový pokles určený tímto výchozím vztahem, ve kterém figuruje každé kmitočtové pásmo signálu, je potřeba dodatečně upravit kvůli šumu pozadí v koncové části dozvukové křivky:

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) \cdot d(-\tau) + C \quad (2.8)$$

kde

$E(t)$ je zpětně integrovaný kvadrát impulzové odezvy v čase t ;

$p(\tau)$ je akustický tlak impulzové odezvy v čase τ udávaný v Pa;

t_1 je výchozí bod integrace udávaný v s;

t je koncový bod integrace (čas) v s;

C je konstanta korekce impulzové odezvy na integrovaném rozsahu;

Výchozí bod integrace volíme tak, aby byla splněna podmínka $t_I > t$. Nejlepší volby konstanty C lze dosáhnout, uvažujeme-li exponenciální pokles energie se stejnou rychlostí, jaká je dána kvadrátem impulzové odezvy mezi dobami t_0 a t_I , kde t_0 reprezentuje dobu, kdy je hladina akustického tlaku L_P o 10 dB vyšší než v bodě t_I . Při zanedbání konstanty C dojde k systematickému podhodnocení doby dozvuku.

2.5.4 Zpracování měřených dat a výpočet pohltivosti

Pro měření v této práci byla využita metoda přerušného šumu, proto vyhodnocování dat proběhlo následujícím způsobem. Dozvuková křivka se začíná vyhodnocovat pro hladinu akustického tlaku o 5 dB nižší, než byla úroveň buzení. Jedná se o oblast s mírným časovým odstupem za okamžikem vypnutí zdroje zvuku. Vyhodnocuje se pokles o 20 nebo 30 dB, v každém případě musí být dodrženo, že dolní hladina oblasti vyhodnocování poklesu akustického tlaku je alespoň 10 dB nad hlukem pozadí.

Dozvukovou křivku lze popsat přímkou a následně jednoduše stanovit dobu dozvuku T_{60} , která reprezentuje oblast poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB.

Získané doby dozvuku ze všech měření jsou pro jednotlivá třetinooktávová kmitočtová pásma (uvedená v tabulce 2) průměrovány. Výsledkem tohoto průměrování jsou doby T_1 a T_2 . Doba T_1 je zprůměrovaná doba dozvuku v prázdné dozvukové komoře bez umístěného vzorku a T_2 naopak se zkušebním vzorkem.

Tabulka 2 Hodnoty třetinooktávových frekvenčních pásem, udávané v Hz, data převzána z [1], tabulka vytvořena v MS Excel

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

Při znalosti hodnot T_1 a T_2 lze určit další potřebné hodnoty, které vedou až k výpočtu činitele zvukové pohltivosti.

Pro určení celkové ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku A_T musí být nejprve určena ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory bez a se zkušebním vzorkem A_1 a A_2 . Pro výpočet A_T poté platí vztah:

$$A_T = A_2 - A_1 = \left(\frac{55,3 \cdot V}{c_2 \cdot T_2} - 4 \cdot V \cdot m_2 \right) - \left(\frac{55,3 \cdot V}{c_1 \cdot T_1} - 4 \cdot V \cdot m_1 \right) \quad (2.9)$$

kde je:

A_T ekvivalentní pohltivou plochu zkušební vzorku v m^2 ;

A_1 ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory bez zkušební vzorku v m^2 ;

A_2 ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory se zkušebním vzorkem v m^2 ;

V celkový objem dozvukové komory v m^3 ;

T_1 průměrná doba dozvuku bez zkušební vzorku v dozvukové komoře v s;

T_2 průměrná doba dozvuku se zkušebním vzorkem v dozvukové komoře v s;

m_1, m_2 součinitel útlumu ve vzduchu s ohledem na aktuální klimatické podmínky v komoře v m^{-1}

c_1 a c_2 rychlost šíření zvuku ve vzduchu při daných tepelných podmínkách v m/s .

Výsledný výpočet potřebného činitele zvukové pohltivosti α_S lze realizovat pomocí vztahu:

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S} \quad (2.10)$$

kde

α_S je výsledný činitel zvukové pohltivosti;

A_T ekvivalentní pohltivá plocha zkušební vzorku v m^2 ;

S je celková plocha dozvukové komory v m^2 ;

2.5.5 Závěrečné operace s výsledky

V závěru zprávy z měření musí být uvedeny výsledky formou tabulky a grafu pro všechna třetinooktávová pásma, ve kterých byl činitel zvukové pohltivosti určován. Výsledné informace by se měly pohybovat ve výše uvedených rozsazích. V případě, že předmětem zkoumání byl jednotlivý objekt s pohltivými vlastnostmi, je do výsledků nutné zahrnout i jeho ekvivalentní pohltivou plochu, na rozdíl od rovinných pohltivých obkladů a jiných sestav. Závěrečný protokol musí obsahovat veškeré náležitosti uvedené normou [1].

3 Praktická část

Po nadefinování teoretických podkladů, potřebných pro realizaci této bakalářské práce, je možné pokračovat praktickou částí. Ta se bude částečně zabírat konstrukcí přípravku, určeného pro montáž akustických materiálů do dozvukové komory v akustických laboratořích FEL ZČU. Konstrukce vychází z teoretického návrhu modulárního systému v bakalářské práci Josefa Holáta [12], kde je poprvé uvedena myšlenka tohoto přípravku ve spojitosti s měřením Helmholtzových rezonátorů. Tento přípravek byl realizován pouze částečně a nebyl namontován na stěnu dozvukové komory. Tato bakalářská práce plynule navazuje na teoretický návrh jeho realizací po provedení několika drobných úprav. Konstrukce tohoto přípravku bude blíže popsána v následujícím textu.

Hlavním cílem práce je porovnat výsledky měření doby dozvuku (resp. dopočítaného činitele zvukové pohltivosti) pro měření stejného vzorku ve vodorovné konfiguraci na podlaze dozvukové komory a ve svislé konfiguraci na její stěně.

V závěru budou shrnuta všechna měření a porovnány jednotlivé výsledky naměřených veličin jednotlivých materiálů a vše bude doprovázeno grafickým a tabulkovým vyobrazením.

4 Konstrukce přípravku pro měření v dozvukové komoře

Konstrukce přípravku určeného pro připevnění různých akustických materiálů a následné měření doby dozvuku v dozvukové komoře vychází z návrhu uvedeného v bakalářské práci Josefa Holáta [12]. Univerzální přípravek umožňuje sestavení různých variant akustického obkladu, především změnu jeho celkové tloušťky a skladby, které mají zásadní vliv na frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti. Přípravek se skládá z několika sad svislých dílů tvořících jednotlivá „patra“ konečné skladby. Ve svislých dílech jsou výřezy umožňující vsazení přiček a rozkasetování celkové plochy běžného rastru 600x600 mm.

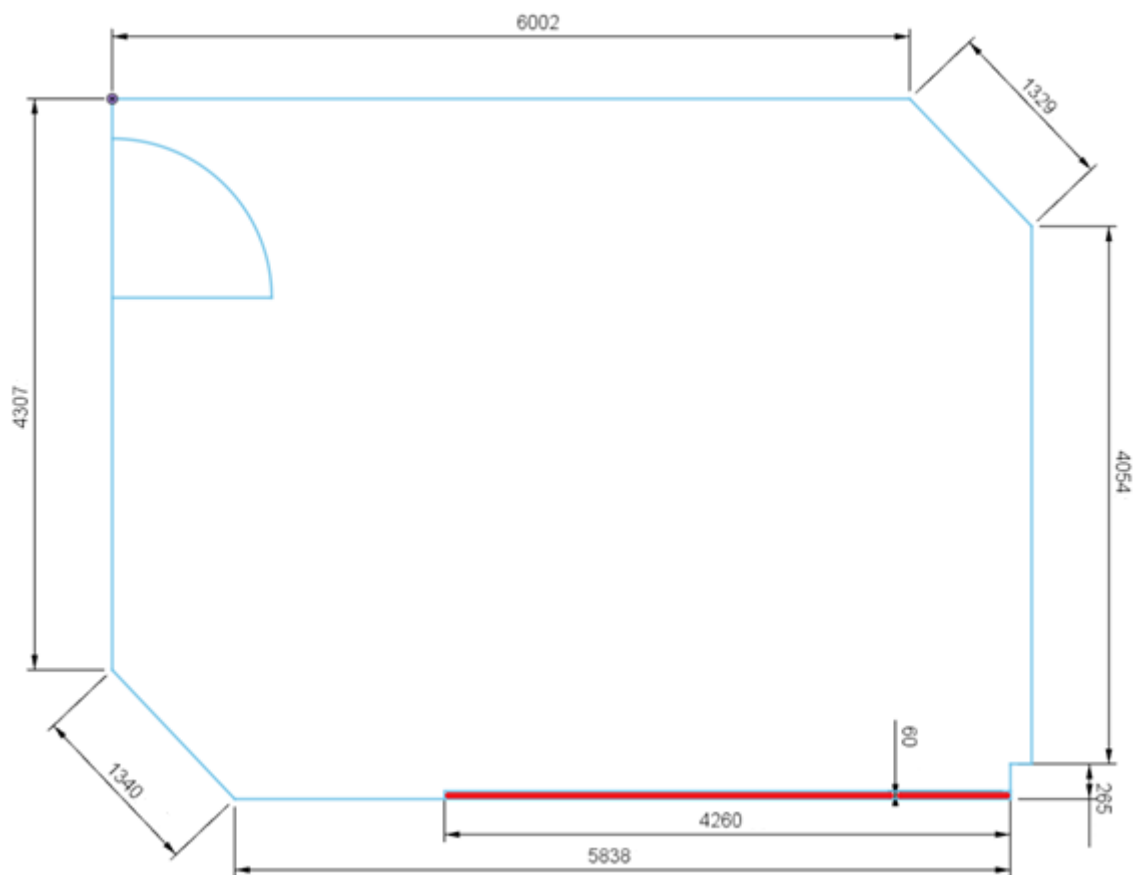
Svislé díly jsou vyhotovené z dřevěného masivu, kdy je každý vysoký 2,46 metru, 60 mm široký a hluboký 60 nebo 100 mm. Tím je zajištěna variabilita hloubky dutiny obkladu (60, 100, 120, 160 nebo 220 mm). Původní návrh nepojednával o přichycení jednotlivých základových trámů ke stěně, proto byl rozšířen o rozmístění děr na základové trámy a stěnu. Otvory byly navrženy tak, aby bylo možné připevnění konstrukce ke zdi a umožňovaly připojení dalších nadstavbových trámů k základovým pomocí šroubů a závitových tyčí.

Postup konstrukce započal frézováním drážek a zahloubení do neopracovaných základových trámů. Následně byly vyvrtány otvory v místech určených k přichycení ke stěně. Uprostřed vyfrézovaných zahloubení byly vyvrtané ty samé otvory pro možnost připevnění nadstavbových trámů. Do vyfrézovaných zahloubení na zadních stranách základových trámů byly umístěny nárazecí matice velikosti M10, sloužící k přišroubování nadstavbových trámů.



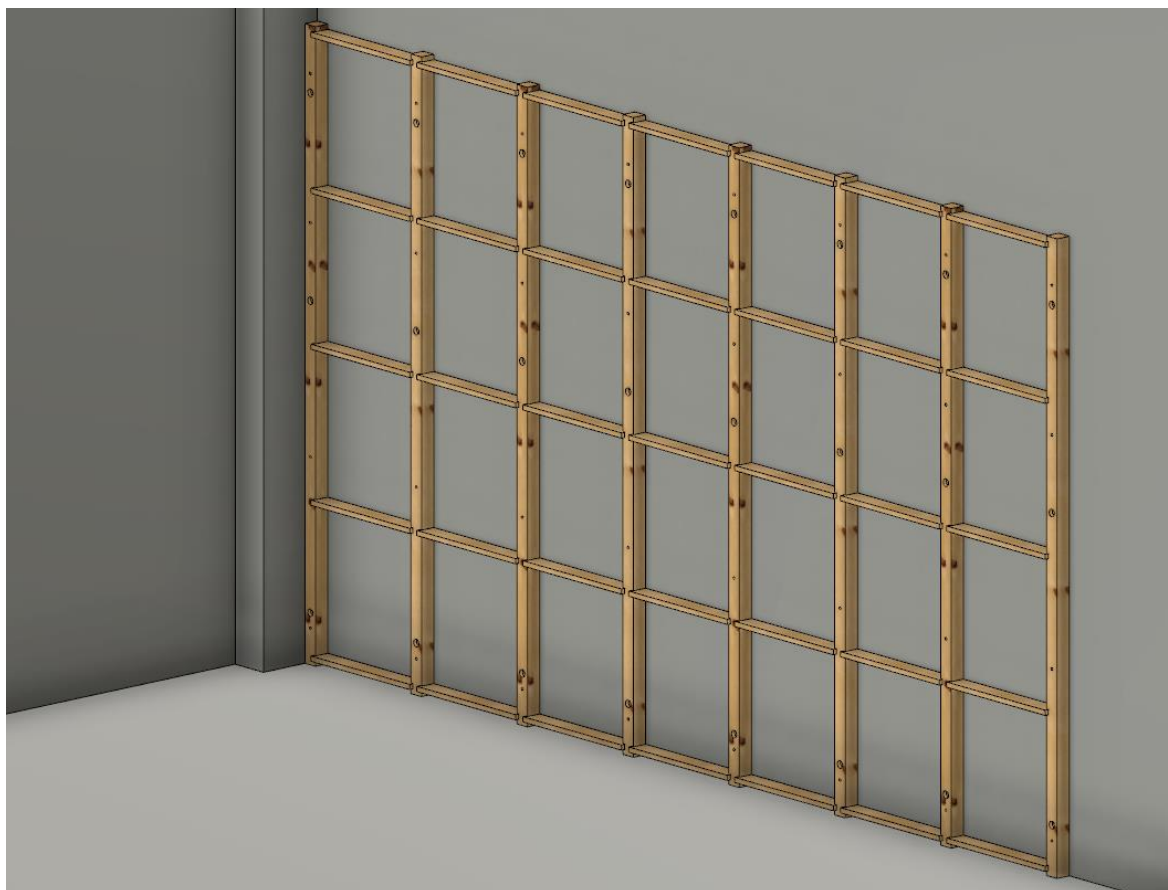
Obr.5 Nárazecí matice, zdroj viz [10]

Po přípravě jednotlivých dřevěných dílů byla možná jejich instalace na stěnu dozvukové komory. Do stěny byly ukotveny průvlakové kotvy o rozměru M10 x 100 a k nim přišroubovány jednotlivé svislé trámy. Zatím byla namontována pouze část přípravku na delší stěně komory (viz obrázek 6), návrh ale počítá i s rozšířením na kratší stranu a následné možné měření vzorků přes roh místnosti.



Obr.6 Půdorys dozvukové místnosti (červeně vyznačen přípravek), vytvořeno v Autodesk Fusion 360

Tento přípravek je vyhotoven tak, aby v dozvukové místnosti bylo možné měřit plošné akustické materiály podle typu montáže E. Tento typ je detailně popsán v kapitole 2.4.2. Jedná se o uspořádání, kdy je vytvořen vzduchový polštář za akustickým materiálem. Ten může být v některých případech vyplněn porézním materiálem (např. kamennou vatou). Spoluvytvoření vzduchové kapsy a zároveň utěsnění mezi stěnou a akustickým materiálem zajišťují dřevěné trámy a dělicí příčky, reprezentující požadovaný rám z neporézního materiálu. Aby byla zajištěna variabilita velikosti vzduchového polštáře při měřeních, je možné na základní konstrukci montovat nadstavbové trámy o hloubce 60 a 100 mm. Základní konstrukce, již namontovaná do dozvukové komory, je vyobrazena na modelu, který byl vytvořen v programu Autodesk Fusion 360, na obrázku 7.



Obr.7 Model umístěného přípravku v dozvukové komoře (prázdná dozvuková komora), vytvořeno v Autodesk Fusion 360

Model je vyobrazen se všemi základními komponenty přípravku. Přípravek lze modifikovat odebráním dělicích příček, připevněním nadstavbových trámů, přidáváním různých plošných akustických materiálů, které je možné připevnit pomocí dalších montážních dřevěných latí. Plocha montovaných obkladů může dosahovat až $10,48 \text{ m}^2$.

Hlavním důvodem umístění přípravku na stěnu je možnost montáže akustických prvků tak, jak budou poté používány v reálném prostředí, a to především akustických obkladů založených na rezonančním principu, jejichž parametry mohou být závislé na poloze.

Umístění přípravku na stěnu také zajišťuje jednodušší manipulaci s měřicí technikou a tím zrychluje proces měření. Vzhledem k dobrému přístupu ke všem částem přípravku se montáž vzorku na měřicí přípravek z hlediska náročnosti na vybavení a dobu montáže výrazně nezhoršila.

5 Měření v dozvukové místnosti FEL ZČU

Veškerá níže uvedená měření probíhala, vzhledem k jejich rozsahu, v akustických laboratořích FEL ZČU během několika dnů. Celý proces měření je proveden v souladu s pravidly uvedenými v normě [1]. V dozvukové komoře jsou umístěny 4 měřicí mikrofony Brüel & Kjaer 4943 s všesměrovou charakteristikou určené pro difuzní akustické pole a 2 pasivní reproduktory. V sousední laboratoři se pak nachází analyzátor, zesilovače, počítač se softwarem pro řízení měření a exportování dat a spojovací kabeláž. Seznam použitých přístrojů je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3 Seznam použitých přístrojů při měřeních v dozvukové komoře, vytvořeno v MS Excel

přístroj	označení	výrobce	označení v dokumentaci	počet kusů
mikrofon	4943-C-001	Brüel & Kjaer	1,2,3,4	4
analyzátor	3160-A-042	Brüel & Kjaer	Analyzátor	1
reproduktor	S1151V	Yamaha	Z1, Z2	2
zesilovač	Q1212	Electro Voice	Zesilovač	1
počítač			PC	1
přívody k reproduktorům				2
přívody k mikrofونům	1,2,3,4			4
ethernetový kabel				1
software	PULSE	Brüel & Kjaer		1

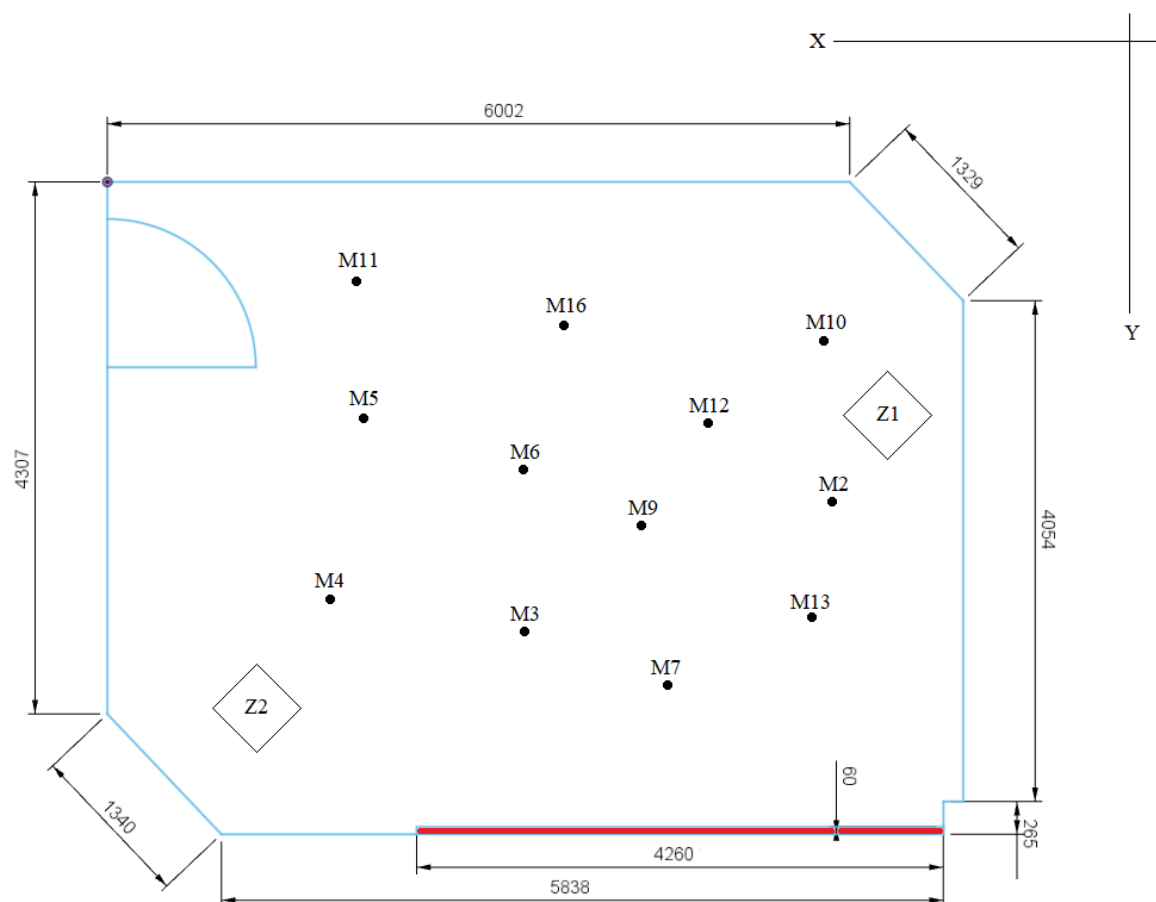
Umístění jednotlivých mikrofونů a reproduktorů je na obrázku 8 a jejich konkrétní souřadnice udává tabulka 4 a 5.

Tabulka 4 Tabulka se souřadnicemi umístění mikrofونů, vytvořeno v MS Excel

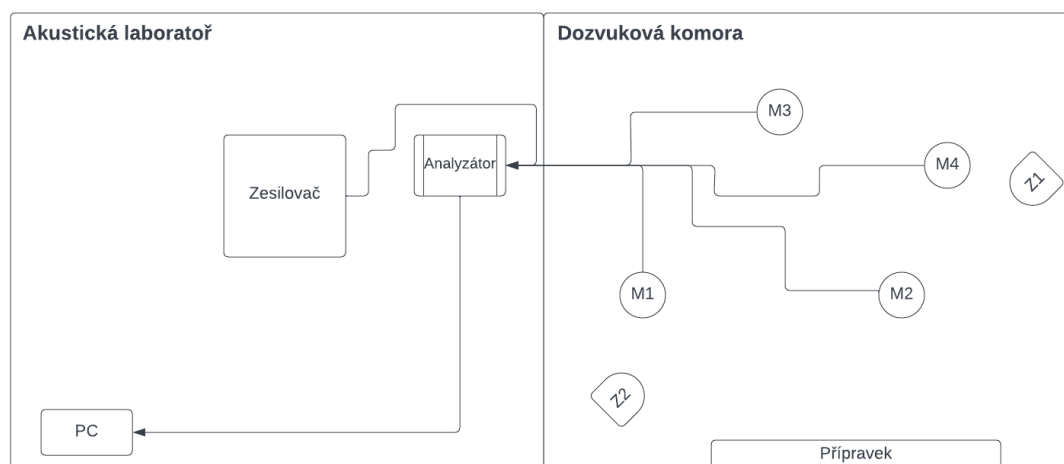
uspořádání	mikrofon	X [mm]	Y [mm]	Z - výška [mm]
1	M2	1300	2640	1600
	M3	3700	3840	1700
	M4	5300	3640	1300
	M5	5000	2040	2600
2	M6	3900	2640	1800
	M7	2700	4240	2100
	M9	2500	3040	1500
	M10	1300	1440	1300
3	M11	5000	1040	1800
	M12	2100	2240	1500
	M13	1700	3640	2600
	M16	3300	1240	1300

Tabulka 5 Tabulka se souřadnicemi umístění reproduktorů, vytvořeno v MS Excel

	označení	X [mm]	Y [mm]
reproduktor	Z1	6280	2500
	Z2	1500	4100

**Obr.8** Půdorys dozvukové komory s pozicemi mikrofonů a zdrojů (rozměry jsou udávány v mm), vytvořeno v Autodesk Fusion 360

Čtveřice mikrofonů umístěná do jedné ze 3 konfigurací je připojena k analyzátoru v laboratoři. Pasivní reproduktory na pozici Z1, Z2 jsou připojené k zesilovači s možností nastavení zesílení a volby použití konkrétního reproduktoru. Pro měření se vždy používá jen jeden reproduktor. Zesilovač se následně připojí ke generátorovému výstupu analyzátoru. Pro možnost ovládání měření a získání naměřených hodnot je potřeba zajistit propojení mezi analyzátozem a počítačem pomocí ethernetového kabelu. Po propojení všech komponent měřicí soustavy je možné spustit program PULSE od firmy Brüel & Kjær. Pomocí kalibrátoru je před začátkem samotného měření provedena kalibrace mikrofonů. Jako poslední je nutné změřit relativní vlhkost a teplotu v dozvukové komoře. Na obrázku 9 je vyobrazeno blokové schéma zapojení měřicího systému popisující propojení jednotlivých komponent.



Obr.9 Blokové schéma měřicí soustavy, pro získávání doby dozvuku, vytvořeno online v Lucidchart

Samotné měření je řízeno od počítače přes software PULSE. Doba dozvuku je vždy měřena 4 mikrofony tvořícími jednu konfiguraci. Pro každou konfiguraci je nejprve použito buzení z reproduktoru na pozici Z1 a poté Z2. Aby byly výsledky korektní, pro každou kombinaci pozic mikrofonů a zdroje zvuku se zaznamenají 3 poklesové křivky. Získané doby dozvuku jsou vždy průměrovány a takto získané parametry následně vloženy do excelových souborů. Výsledkem je tabulka, ve které jsou zprůměrované doby dozvuku pro každou pozici mikrofonu a polohu zdroje zvuku. Příkladem je tabulka 6. V tabulce lze sledovat, že je doba dozvuku v jednotlivých třetinooktákových pásmech odlišná. Zkoumaná třetinooktávová pásma jsou uvedena v tabulce 2 v kapitole 2.5.4.

5.1 Měření doby dozvuku v prázdné dozvukové místnosti

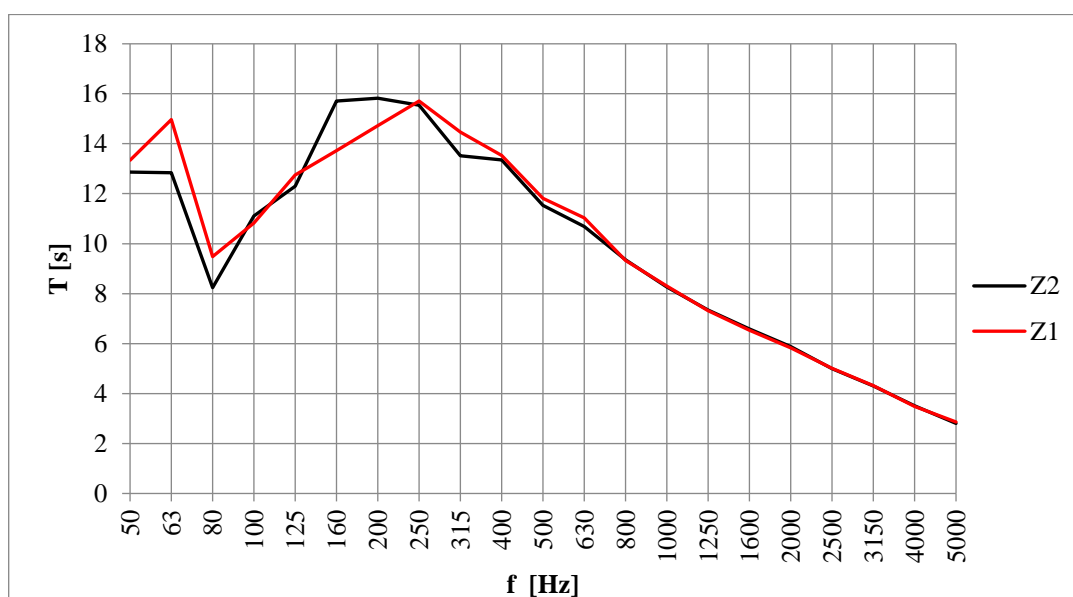
Získávání doby dozvuku prázdné dozvukové komory je z hlediska určování činitele zvukové pohltivosti velmi důležité, protože α_S lze počítat jako podíl A_T ku S . Právě ve výpočtu ekvivalentní pohltivé plochy obkladu figuruje ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory, kterou lze získat výpočtem ze změřené doby dozvuku.

Jako prázdnou dozvukovou komoru bereme dozvukovou místnost FEL ZČU, ve které je již namontovaný základní vyhotovený přípravek, bez akustického obkladu.

Rozmístění měřicí techniky, její propojení a další příprava je popsána v kapitole 5. Postup měření splňuje požadavky normy [1]. Výsledky měření doby dozvuku prázdné komory jsou uvedeny v tabulce 6 a v grafu na obrázku 10. Doby dozvuku jsou uvedeny pro každý mikrofon na pozicích MX.

Tabulka 6 Naměřené doby dozvuku mikrofony na pozicích MX v prázdné dozvukové komoře, pro umístění zdroje Z1, vytvořeno v MS Excel

f [Hz]	T _{M2} [s]	T _{M3} [s]	T _{M4} [s]	T _{M5} [s]	T _{M6} [s]	T _{M7} [s]	T _{M9} [s]	T _{M10} [s]	T _{M11} [s]	T _{M12} [s]	T _{M13} [s]	T _{M16} [s]
50	12,56	12,10	12,59	15,45	12,86	14,51	12,29	12,14	11,99	16,83	14,94	11,86
63	18,25	10,16	17,57	18,90	18,74	15,28	18,56	7,93	9,89	18,38	16,55	9,37
80	10,11	10,36	10,29	11,19	9,93	9,36	8,75	9,35	8,31	7,57	9,05	9,43
100	8,35	13,54	11,07	12,11	9,74	9,85	12,41	10,98	8,50	9,65	8,13	15,53
125	12,47	13,51	12,63	13,49	13,47	11,88	11,68	13,45	11,71	13,33	12,32	13,04
160	14,45	14,75	14,39	14,40	13,72	13,51	13,43	13,28	12,78	13,34	13,34	13,27
200	14,39	14,04	14,31	15,63	13,87	16,22	14,28	13,95	14,90	14,91	15,28	14,85
250	16,14	15,20	15,82	15,67	15,74	15,45	16,02	15,69	15,47	15,31	16,67	15,31
315	14,40	14,44	14,38	14,33	14,52	13,96	13,97	14,32	14,39	14,17	15,59	15,09
400	13,33	13,53	13,29	13,66	13,25	13,22	13,86	13,82	13,43	13,86	13,40	13,65
500	12,13	11,96	12,07	12,15	11,63	11,41	12,06	11,77	11,47	11,73	11,64	11,71
630	11,10	11,03	11,14	11,15	10,65	11,24	11,20	10,95	11,04	10,73	11,20	10,96
800	9,47	9,44	9,38	9,24	9,38	9,17	9,45	9,31	9,35	9,12	9,40	9,26
1000	8,26	8,57	8,37	8,24	8,08	8,29	8,37	8,34	8,27	8,23	8,38	8,18
1250	7,31	7,48	7,27	7,33	7,37	7,24	7,38	7,20	7,26	7,24	7,28	7,47
1600	6,43	6,59	6,54	6,62	6,45	6,56	6,57	6,58	6,58	6,57	6,42	6,49
2000	5,78	5,92	5,84	5,90	5,87	5,79	5,93	5,61	5,74	5,75	5,97	5,82
2500	5,05	4,98	5,05	4,97	4,98	4,98	5,00	5,06	4,91	5,09	5,08	4,94
3150	4,41	4,32	4,35	4,21	4,31	4,29	4,40	4,28	4,33	4,30	4,32	4,29
4000	3,45	3,53	3,52	3,54	3,46	3,49	3,50	3,46	3,49	3,52	3,48	3,43
5000	2,85	2,89	2,84	2,93	2,82	2,83	2,91	2,82	2,86	2,89	2,91	2,80



Obr.10 Závislosti doby dozvuku na jednotlivých 1/3 oktávových pásmech : měření se zdrojem na pozici Z1 a Z2, pro prázdnou dozvukovou komoru, vytvořeno v MS Excel

Z tabulky a grafu je jasně vidět, že změřené doby dozvuku v nižších třetinoctávových pásmech jsou výrazně delší než v těch vyšších. Zatímco v pásmech 50–250 Hz je křivka velmi členitá, pro vyšší frekvence klesá s každým dalším 1/3 oktávovým pásmem téměř lineárně. Důvodem členitého začátku v oblasti nízkých frekvencí je nevyrovnané rozložení

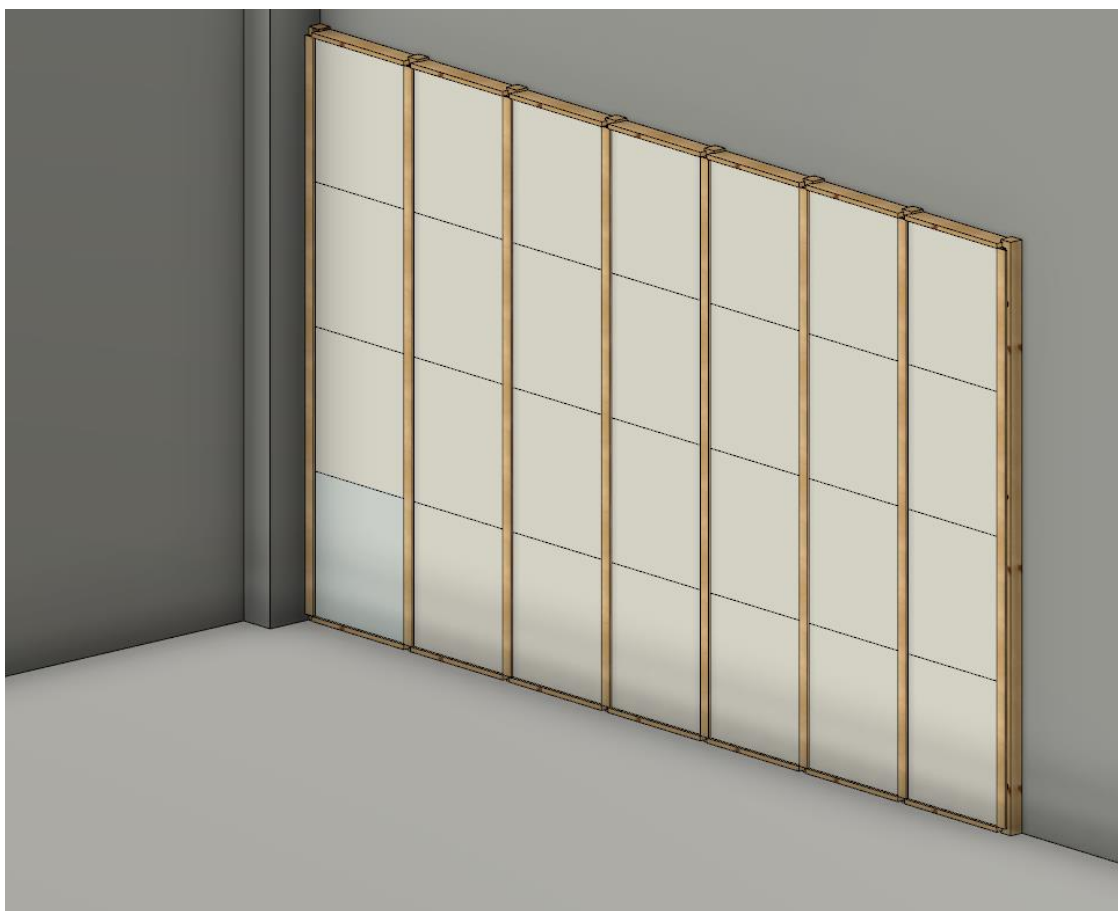
akustického pole v těchto frekvenčních pásmech (vznik stojatého vlnění) a částečně také zvuková pohltivost použitých difuzorů v dozvukové komoře.

5.2 Měření doby dozvuku s plošným akustickým obkladem

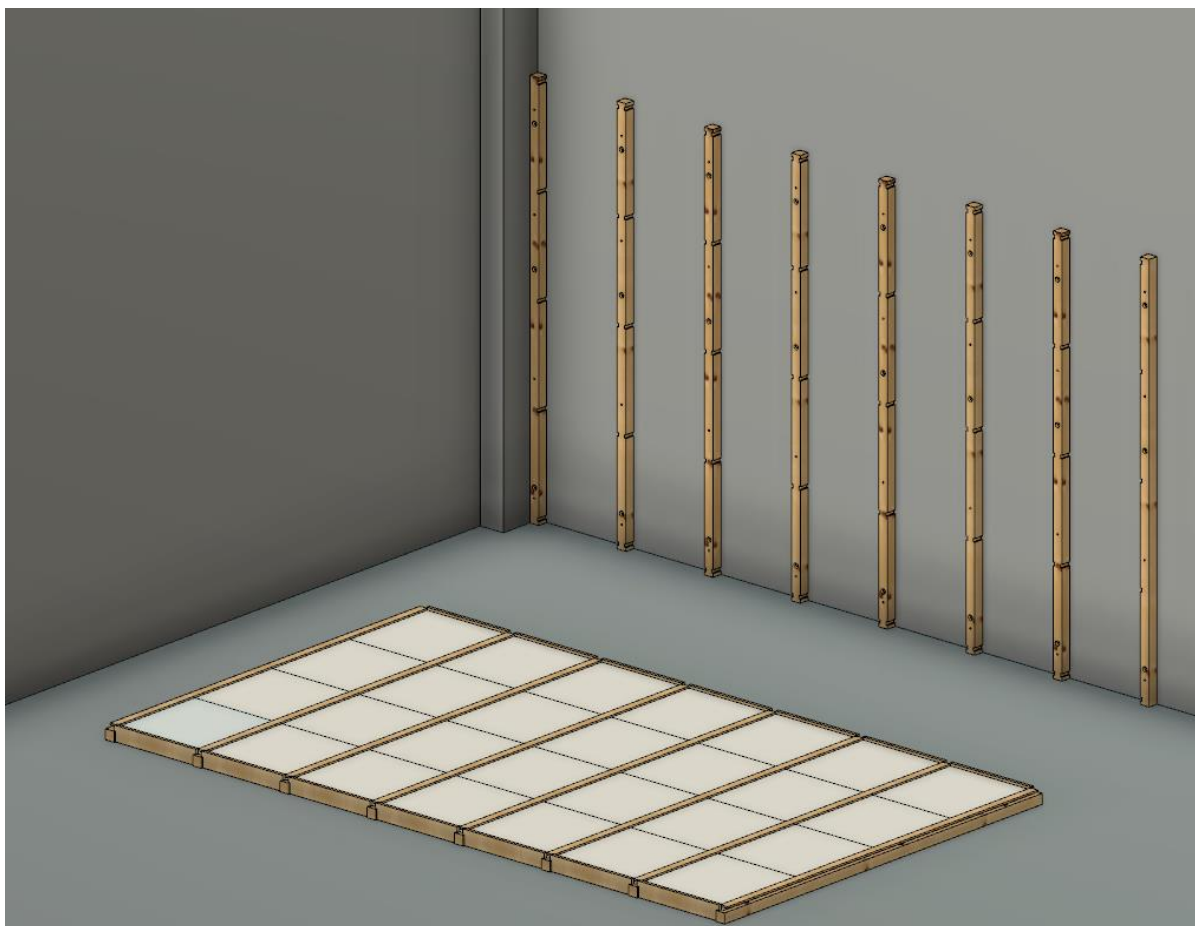
První obklad tvoří 28 podhledových desek Ecophon OPTA A 600x600 mm, o tloušťce 15 mm, který tvoří plochu 10,08 m². Na základnu měřicí konstrukce o hloubce 60 mm je připevněn pomocí dřevěných latí 2400x50x10 mm. Z horní a dolní strany je prostor za obkladem utěsněn dělicími příčkami. Situaci dokreslují modely na obrázcích 11 a 12.

Příprava a samotné měření byly provedeny opět podle postupu měření uvedeného v kapitole 5.

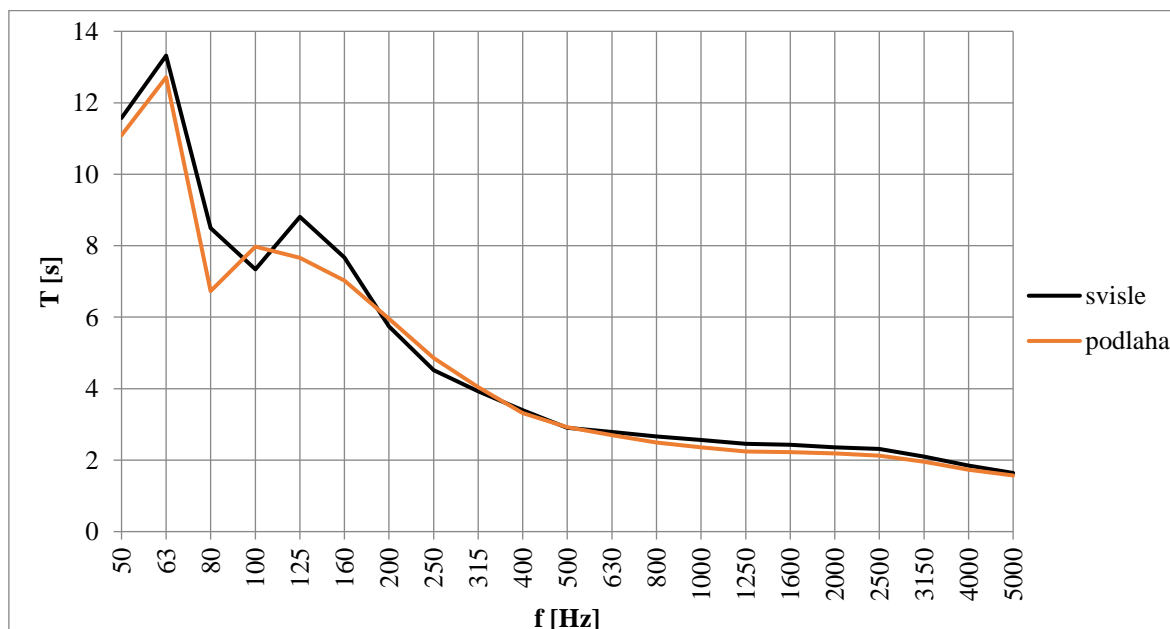
Porovnání vlivu pozice měřeného vzorku na podlaze a stěně dozvukové komory je uvedeno v grafu na obrázku 13, který zobrazuje průměrné hodnoty získané ze všech mikrofonů pro zdroj na pozici Z1. Z grafu je vidět, že se jednotlivé konfigurace v některých třetinoctávových pásmech liší, což může být zapříčiněno hned několika faktory, které budou shrnuty v závěru měření.



Obr.11 Model přípravku s akustickým obkladem *OPTA A*, ve svislé konfiguraci na stěně dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360



Obr.12 Model přípravku s akustickým obkladem *OPTA A*, na podlaze dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360



Obr.13 Zprůměrované doby dozvuku v jednotlivých 1/3 oktávnových pásmech : měření se zdrojem zvuku na pozici Z1, pro plošný obklad z podhledových desek, vytvořeno v MS Excel

Tabulka 7 Vypočtené průměrné doby dozvuku, v daných situacích a 1/3 oktávových frekvenčních pásmech, pro měření s podhledovými deskami, vytvořeno v MS Excel

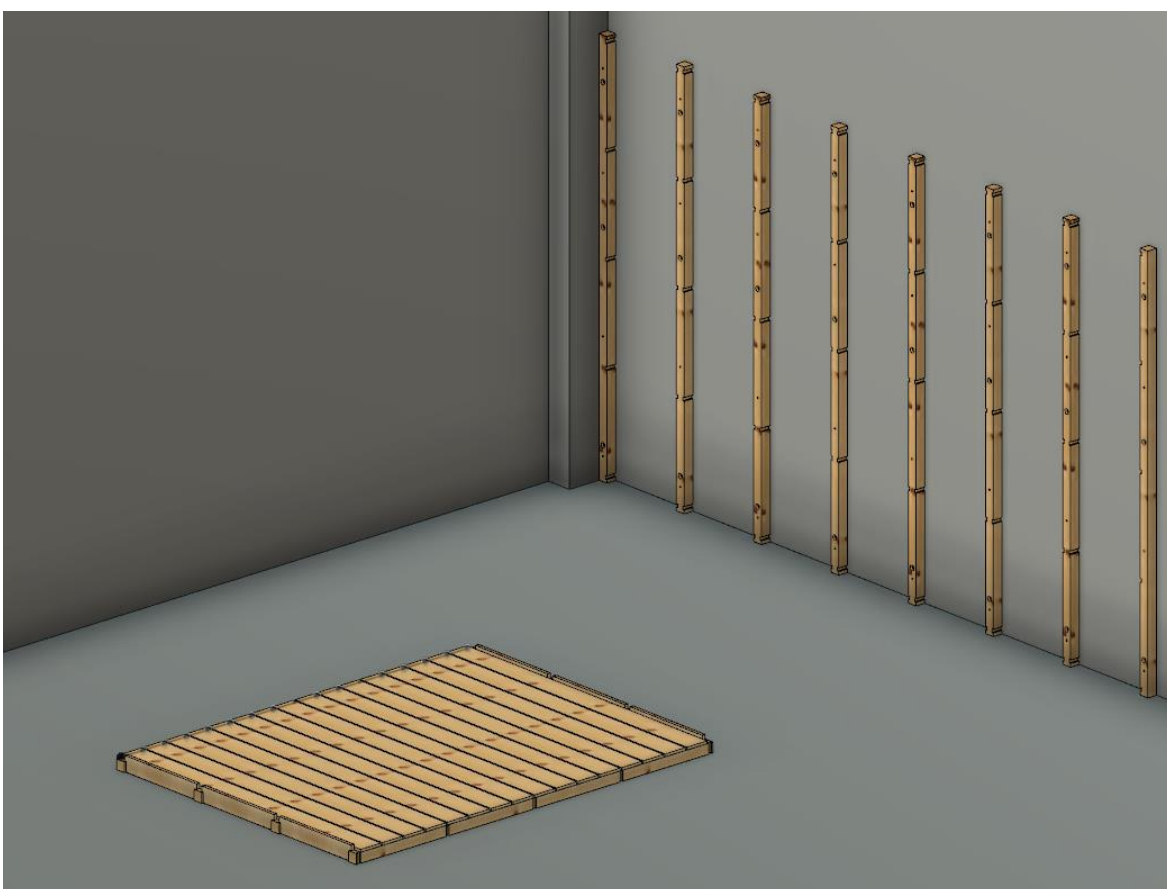
f [Hz]	T _{1PK} [s]	T _{2PK} [s]	T _{PK} [s]	f [Hz]	T _{1SK} [s]	T _{2SK} [s]	T _{SK} [s]	f [Hz]	T _{1P} [s]	T _{2P} [s]	T _P [s]
50	13,3	12,9	13,1	50	11,6	11,7	11,6	50	11,1	11,6	11,3
63	15,0	12,8	13,9	63	13,3	12,2	12,8	63	12,7	12,6	12,7
80	9,5	8,2	8,9	80	8,5	7,9	8,2	80	6,7	6,7	6,7
100	10,8	11,1	11,0	100	7,3	7,5	7,4	100	8,0	7,3	7,6
125	12,7	12,3	12,5	125	8,8	8,2	8,5	125	7,7	7,0	7,3
160	13,7	15,7	14,7	160	7,7	8,5	8,1	160	7,0	8,0	7,5
200	14,7	15,8	15,3	200	5,7	5,8	5,8	200	6,0	5,8	5,9
250	15,7	15,5	15,6	250	4,5	4,6	4,6	250	4,9	4,7	4,8
315	14,5	13,5	14,0	315	3,9	3,9	3,9	315	4,0	3,8	3,9
400	13,5	13,4	13,4	400	3,4	3,4	3,4	400	3,3	3,3	3,3
500	11,8	11,5	11,7	500	2,9	3,0	2,9	500	2,9	2,9	2,9
630	11,0	10,7	10,9	630	2,8	2,8	2,8	630	2,7	2,6	2,7
800	9,3	9,4	9,3	800	2,7	2,7	2,7	800	2,5	2,5	2,5
1000	8,3	8,3	8,3	1000	2,6	2,6	2,6	1000	2,4	2,4	2,4
1250	7,3	7,3	7,3	1250	2,5	2,5	2,5	1250	2,2	2,3	2,3
1600	6,5	6,6	6,6	1600	2,4	2,4	2,4	1600	2,2	2,2	2,2
2000	5,8	5,9	5,9	2000	2,4	2,4	2,4	2000	2,2	2,2	2,2
2500	5,0	5,0	5,0	2500	2,3	2,3	2,3	2500	2,1	2,1	2,1
3150	4,3	4,3	4,3	3150	2,1	2,1	2,1	3150	2,0	1,9	2,0
4000	3,5	3,5	3,5	4000	1,8	1,8	1,8	4000	1,7	1,7	1,7
5000	2,9	2,8	2,8	5000	1,6	1,6	1,6	5000	1,6	1,5	1,6

Druhým měřeným vzorkem byl laťový rezonátor o ploše 4,6 m² (3 pole přípravku). Pro zkonstruování rezonátoru byla použita dřevěná čelní prkna o rozměrech 1800x140x20mm. Pod nimi je vytvořena dutina o hloubce 80 mm (20 mm dřevěná lať + 60 mm základní konstrukce). Výplň dutiny je kamenná vata potažená netkanou textilií. Horní strana přípravku je opět uzavřena pomocí dělicích příček. Měření byla provedena nejprve ve svislé konfiguraci rezonátoru. Následně byl vzorek demontován a opětovně složen a změřen na podlaze komory. Rozložení rezonátoru v komoře vyobrazují modely na obrázku 14 a 15. Postup měření je opět popsán v kapitole 5.

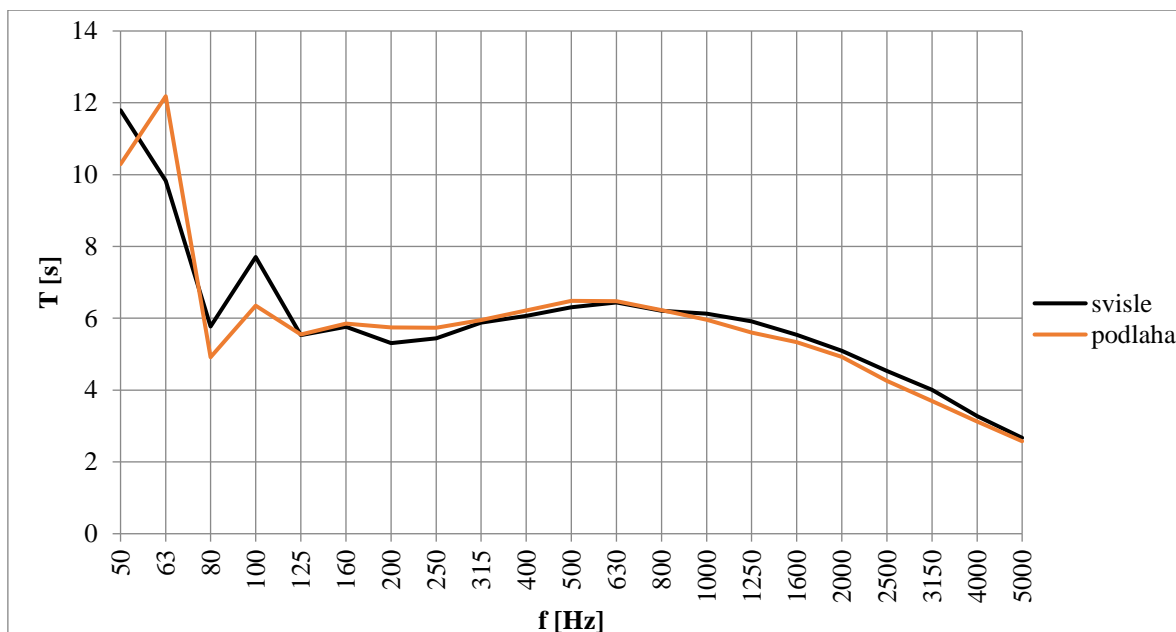
Grafické znázornění na obrázku 16 opět ukazuje rozdílné chování zprůměrovaných dob dozvuku v jednotlivých třetinoctávových pásmech. Členitost v rozmezí 50 Hz až 125 Hz je opět zapříčiněna nevyrovnaným rozložením akustického pole. Z tabulky 8 a 9 je patrné, že také na těchto nízkých frekvencích dochází k největším rozdílům změřených dob dozvuku.



Obr.14 Model laťového rezonátoru, ve svislé konfiguraci na stěně dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360



Obr.15 Model laťového rezonátoru, na podlaze dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360



Obr.16 Zprůměrované doby dozvuku v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech : měření se zdrojem zvuku na pozici Z1, pro laťový rezonátor, vytvořeno v MS Excel

Tabulka 8 Vypočtené průměrné doby dozvuku, v daných situacích a 1/3 oktávových frekvenčních pásmech, pro měření laťovým rezonátorem, vytvořeno v MS Excel

f [Hz]	T1 _{PK} [s]	T2 _{PK} [s]	T _{PK} [s]	f [Hz]	T1 _{SK} [s]	T2 _{SK} [s]	T _{SK} [s]	f [Hz]	T1 _P [s]	T2 _P [s]	T _P [s]
50	13,3	12,9	13,1	50	11,8	11,1	11,4	50	10,3	10,3	10,3
63	15,0	12,8	13,9	63	9,8	10,3	10,1	63	12,2	10,4	11,3
80	9,5	8,2	8,9	80	5,8	5,9	5,8	80	4,9	5,4	5,1
100	10,8	11,1	11,0	100	7,7	7,6	7,6	100	6,3	6,2	6,3
125	12,7	12,3	12,5	125	5,5	6,2	5,9	125	5,5	5,6	5,6
160	13,7	15,7	14,7	160	5,8	6,2	6,0	160	5,9	6,8	6,3
200	14,7	15,8	15,3	200	5,3	5,4	5,4	200	5,7	5,9	5,8
250	15,7	15,5	15,6	250	5,4	5,5	5,5	250	5,7	6,0	5,8
315	14,5	13,5	14,0	315	5,9	5,8	5,8	315	6,0	6,0	6,0
400	13,5	13,4	13,4	400	6,1	6,1	6,1	400	6,2	6,3	6,3
500	11,8	11,5	11,7	500	6,3	6,2	6,3	500	6,5	6,3	6,4
630	11,0	10,7	10,9	630	6,4	6,4	6,4	630	6,5	6,4	6,4
800	9,3	9,4	9,3	800	6,2	6,3	6,2	800	6,2	6,2	6,2
1000	8,3	8,3	8,3	1000	6,1	6,0	6,1	1000	6,0	5,9	6,0
1250	7,3	7,3	7,3	1250	5,9	5,9	5,9	1250	5,6	5,7	5,6
1600	6,5	6,6	6,6	1600	5,5	5,6	5,6	1600	5,3	5,3	5,3
2000	5,8	5,9	5,9	2000	5,1	5,1	5,1	2000	4,9	4,9	4,9
2500	5,0	5,0	5,0	2500	4,5	4,5	4,5	2500	4,3	4,3	4,3
3150	4,3	4,3	4,3	3150	4,0	3,9	4,0	3150	3,7	3,7	3,7
4000	3,5	3,5	3,5	4000	3,3	3,3	3,3	4000	3,1	3,1	3,1
5000	2,9	2,8	2,8	5000	2,7	2,7	2,7	5000	2,6	2,6	2,6

5.3 Zhodnocení měření

Z výše uvedených dat plyne zjištění, že na změřenou dobu dozvuku má vliv umístění vzorku akustického materiálu v dozvukové komoře. V rámci provedených měření byl porovnáván stejný materiál, ve stejné skladbě a o stejné ploše. Jedním z aspektů, které ovlivňují změřená data je skutečnost, že na akustický plošný obklad v dozvukové komoře může dopadat odlišné množství zvukové energie. V blízkém okolí svislých stěn komory již nejspíš není akustické pole dostatečně difuzní. To může být částečně způsobeno polohou použitých difuzorů, které jsou původně rozmístěné pro vzorek umístěný na podlaze komory. Právě z tohoto důvodu nejspíš norma uvádí podmínku vzdálenosti měřeného vzorku minimálně 1 m od stěny. Při měření na podlaze se dá očekávat, že celková zvuková energie, která dopadla na akustický materiál, byla větší než v případě svislé konfigurace.

V pásmu nízkých frekvencí jsou rozdíly dány hlavně nevyrovnaným rozložením akustického pole v dozvukové komoře, které je zapříčiněné vznikem stojatého vlnění na vlastních frekvencích prostoru.

6 Ověření ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory

Vzhledem k tomu, že byl přípravek umístěn na stěnu dozvukové komory, je třeba ověřit, jak se změnila její ekvivalentní pohltivá plocha a jestli stále splňuje limity dané normou [1]. Výsledkem tohoto ověření by měly být plochy menší nebo nejhůře stejné, jako udává norma. Pro následující výpočty využijeme naměřená data z kapitoly 5.1.

Před ověřením ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory A_{PK} je nutné stanovit průměrné hodnoty dob dozvuku. První určovanou hodnotou je $T1_{PK}$, která je průměrnou hodnotou doby dozvuku prázdné dozvukové komory, počítaná vždy v konkrétním třetinooktávovém frekvenčním pásmu. Tato hodnota vychází z hodnot změřených s reproduktorem na pozici Z1. Hodnota $T2_{PK}$ je tatáž doba dozvuku, pouze pro měření s reproduktorem Z2. Tyto parametry lze získat výpočtem:

$$T1_{PK} = \frac{T_{M2} + T_{M3} + T_{M4} + T_{M5} + T_{M6} + T_{M7} + T_{M9} + T_{M10} + T_{M11} + T_{M12} + T_{M13} + T_{M16}}{12} \quad (6.1)$$

kde

$T1_{PK}$ je průměrná doba dozvuku, prázdné dozvukové komory, při aktivním reproduktoru na pozici Z1, v s;
 T_{MX} je doba dozvuku, změřená mikrofonem na pozici MX, v s;

Máme-li vypočtené hodnoty $T1_{PK}$ a $T2_{PK}$, které jsou uvedené v tabulce 9 a 10, je možné určit $A1_{PK}$. Výpočet ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory lze provést podle vzorce:

$$A1_{PK} = \frac{55,3 \cdot V_{PK}}{c \cdot T1_{PK}} - 4 \cdot V_{PK} \cdot m_1 = \frac{55,3 \cdot 214,9}{343 \cdot 10,8} - 4 \cdot 214,9 \cdot 5,8 \cdot 10^{-5} = 3,15 \text{ m}^2 \quad (6.2)$$

kde

$A1_{PK}$ je ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory, pro měření s reproduktorem na pozici Z1, v m^2 ;

V_{PK} objem prázdné dozvukové komory v m^3 ;

c rychlost šíření zvuku vypočtená ze vztahu $c=331+0,6 \cdot \text{aktuální teplota v komoře}$, v m/s;

$T1_{PK}$ je průměrná doba dozvuku, prázdné dozvukové komory, při aktivním reproduktoru na pozici Z1, v s;
 m_1 součinitel útlumu ve vzduchu, vypočítaný dle ISO 9613-1, v m^{-1} ;

Příklady výpočtů jsou uvedeny pro třetinooktávové frekvenční pásmo 100 Hz. Získané ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory jsou uvedeny v tabulce 9 spolu s těmi, které udává norma.

Tabulka 9 Ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory získané výpočty v porovnání s normativními, vytvořeno v MS Excel

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
A₁ [m²]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
A_{1PK} [m²]	3,2	2,6	2,4	2,2	2,0	2,1	2,1	2,4	2,5
f [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A₁ [m²]	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0
A_{1PK} [m²]	2,9	3,2	3,6	3,9	4,1	4,4	4,6	4,9	4,6

V tabulce 11 je vidět, že námi vypočítané ekvivalentní pohltivé plochy jsou menší, než udává norma (A_1 : normou udávané hodnoty). Tím jsou splněny požadavky normy [1] na prázdnou dozvukovou komoru a je tak možné pokračovat výpočtem činitele zvukové pohltivosti.

7 Určení činitele zvukové pohltivosti

Pro popis pohltivých materiálů se používá parametr činitel zvukové pohltivosti α_s , který je možné dopočítat ze změřených dob dozvuku prázdné dozvukové komory a komory s měřeným vzorkem. Postup výpočtu udává norma [1]. Předmětem určování činitele zvukové pohltivosti byly opět oba měřené akustické prvky, a to zaprvé plošný podklad z podhledových desek a zadruhé laťový rezonátor. I když se jedná o akustické prvky, u kterých lze předpokládat velmi rozdílné hodnoty činitele zvukové pohltivosti, na porovnání, zda záleží na konfiguraci akustického prvku, tato skutečnost nemá žádný vliv. Budeme zde tedy porovnávat dva odlišné akustické prvky, které nám dají finální výsledek, kterým bude odpověď na otázku, zda má konfigurace vliv na výsledný činitel zvukové pohltivosti α_s .

7.1 Výpočet ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku

Nejprve je nutné provést výpočet ekvivalentní pohltivé plochy A_T . Proto musíme znát i ekvivalentní pohltivou plochu dozvukové komory s přítomným akustickým obkladem (označení v normě: A_2). Tu určíme pomocí doby dozvuku v této situaci. Výpočet těchto veličin je totožný jako při výpočtech s prázdnou dozvukovou komorou. Tyto parametry značíme $T1_{SK}$ a $T2_{SK}$, což jsou průměrné doby dozvuku v dozvukové komoře s přítomným akustickým obkladem ve svislé konfiguraci, počítané vždy v konkrétním třetinooktávním frekvenčním pásmu.

Poslední hodnoty dob dozvuku, se kterými se bude dále počítat, jsou $T1_P$ a $T2_P$, jejichž význam je totožný jako v případě $T1_{SK}$, $T2_{SK}$, pouze se jedná o parametry pro plošný akustický obklad umístěný na podlaze. Hodnoty těchto veličin lze vidět v tabulce 9 a 10.

Pro zkušební vzorek umístěný v dozvukové komoře je výpočet ekvivalentní pohltivé plochy stejný jako pro prázdnou dozvukovou komoru. Příklad výpočtu je zde uveden opět pro měření s reproduktorem na pozici Z1, s akustickým obkladem z podhledových desek:

$$A1_{SK} = \frac{55,3 \cdot V_{PK}}{c \cdot T1_{SK}} - 4 \cdot V_{PK} \cdot m_2 = \frac{55,3 \cdot 214,9}{343 \cdot 7,3} - 4 \cdot 214,9 \cdot 5,8 \cdot 10^{-5} = 4,67 \text{ m}^2 \quad (7.1)$$

kde

$A1_{SK}$ je ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory s přípravkem ve svislé konfiguraci, pro měření s reproduktorem na pozici Z1, v m^2 ;

V_{PK} objem prázdné dozvukové komory v m^3 ;

c rychlost šíření zvuku vypočtená ze vztahu $c=331+0,6 \cdot \text{aktuální teplota v komoře}$, v m/s ;

$T1_{SK}$ zprůměrovaná doba dozvuku, pro měření s reproduktorem na pozici Z1 s přípravkem ve svislé konfiguraci, v s ;

m_2 součinitel útlumu ve vzduchu, vypočítaný dle ISO 9613-1, v m^{-1} ;

Výsledná ekvivalentní pohltivá plocha zkušební vzorku ve svislé konfiguraci je poté:

$$A1_{TSK} = A1_{SK} - A1_{PK} = 4,67 - 3,15 = 1,52 \text{ m}^2 \quad (7.2)$$

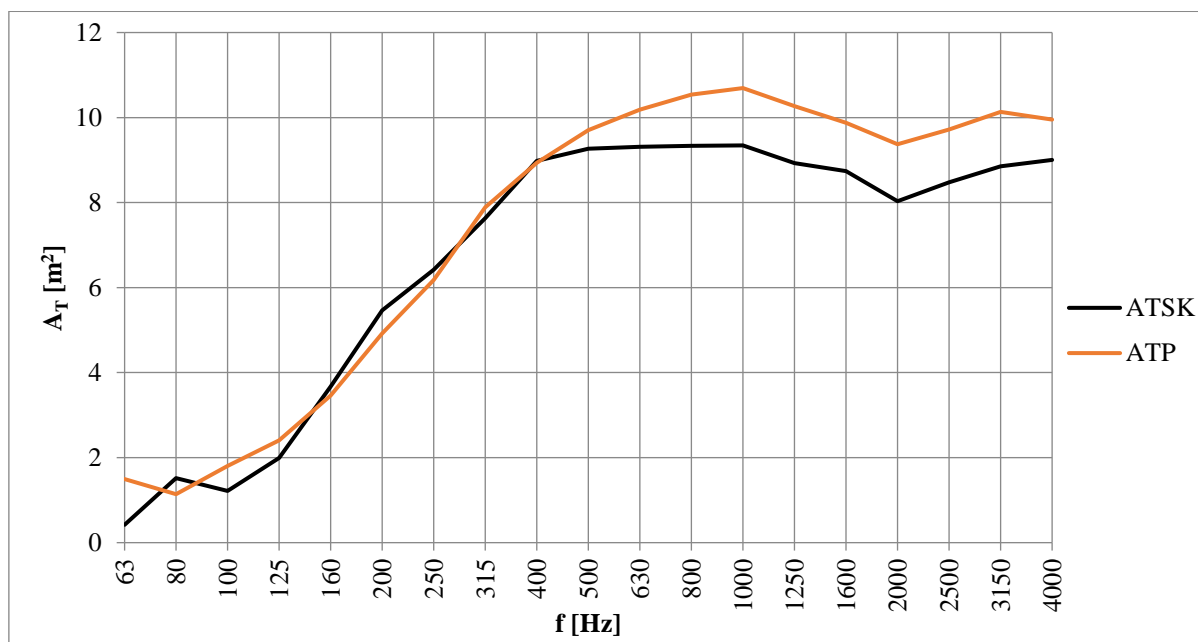
kde

$A1_{TSK}$ je ekvivalentní pohltivá plocha zkušební vzorku ve svislé konfiguraci, pro měření s reproduktorem na pozici Z1, v m^2 ;

$A1_{SK}$ je ekvivalentní pohltivá plocha dozvukové komory s přípravkem ve svislé konfiguraci, pro měření s reproduktorem na pozici Z1, v m^2 ;

$A1_{PK}$ je ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory, pro měření s reproduktorem na pozici Z1, v m^2 ;

Ten samý postup by byl proveden při výpočtu výsledné ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku v konfiguraci na podlaze. Grafické znázornění na obrázku 17 zobrazuje rozdíl ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku pro měření na podlaze a ve svislé konfiguraci, se zdrojem umístěným na pozici Z1, pro plošný obklad z podhledových desek.



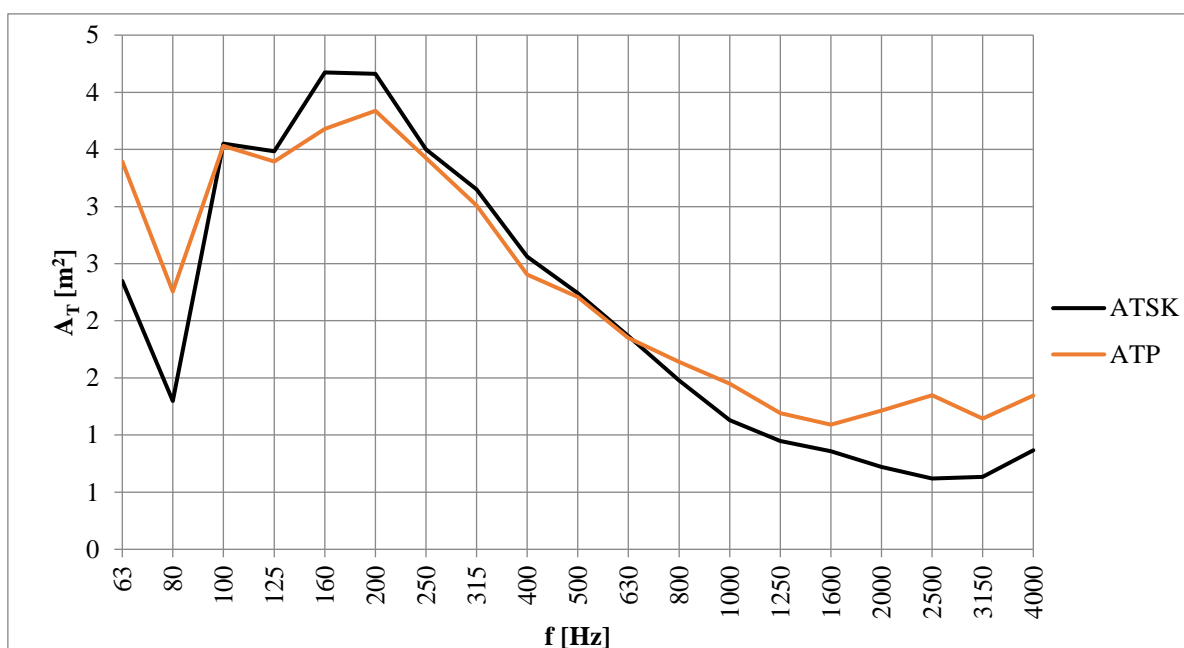
Obr.17 Grafické znázornění ekvivalentních pohltivých ploch zkušební vzorku z podhledových desek, pro měření ve svislé konfiguraci a na podlaze, se zdrojem zvuku na pozici Z1, vytvořeno v MS Excel

V grafu je vyznačeno ATSK, což je výsledná ekvivalentní plocha zkušební vzorku z podhledových desek při měření ve svislé konfiguraci. Naproti tomu ATP je výsledná ekvivalentní pohltivá plocha zkušební vzorku z podhledových desek při měření na podlaze. Z grafu je vidět, že ATP je na vyšších frekvencích vyšší, což vyplývá z měřených dob dozvuku.

Prvním diskutovaným zkušebním vzorkem byl tedy přípravek s obkladem z podhledových desek. Pro potvrzení výše uvedených tvrzení byl proveden ten samý postup

výpočtu ekvivalentních pohltivých ploch pro měření s laťovým rezonátorem. Vypočtené průměrné doby dozvuku v daných situacích a 1/3 oktávových frekvenčních pásmech pro laťový rezonátor při měření se zdrojem umístěným na pozici Z1 jsou uvedeny v tabulce 10.

Tato naměřená data byla opět využita pro výpočet jednotlivých ekvivalentních ploch. Každá z těchto ploch nese to samé označení jako v případě podhledových desek, ale jedná se o hodnoty pro měření s laťovým rezonátorem. Grafické znázornění na obrázku 18 zobrazuje rozdíl ekvivalentní pohltivé plochy zkušební vzorku, pro měření na podlaze a ve svislé konfiguraci, se zdrojem umístěným na pozici Z1, pro laťový rezonátor.



Obr.18 Grafické znázornění ekvivalentních pohltivých ploch laťového rezonátoru, pro měření ve svislé konfiguraci i na podlaze, se zdrojem zvuku v pozici Z1, vytvořeno v MS Excel

I v tomto případě můžeme vidět, že se jednotlivé ekvivalentní plochy liší, což opět vyplývá z naměřených dob dozvuku.

7.2 Výpočet činitele zvukové pohltivosti

Činitele zvukové pohltivosti lze opět počítat v jednotlivých zkoumaných třetinooktávových frekvenčních pásmech. Pro jeho výpočet budou použity výsledné ekvivalentní pohltivé plochy zkušebních vzorků. Činitel zvukové pohltivosti lze vypočítat ze vztahu:

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S} = \frac{A1_{TSK}}{S} = \frac{1,52}{10,08} = 0,15 \quad (7.3)$$

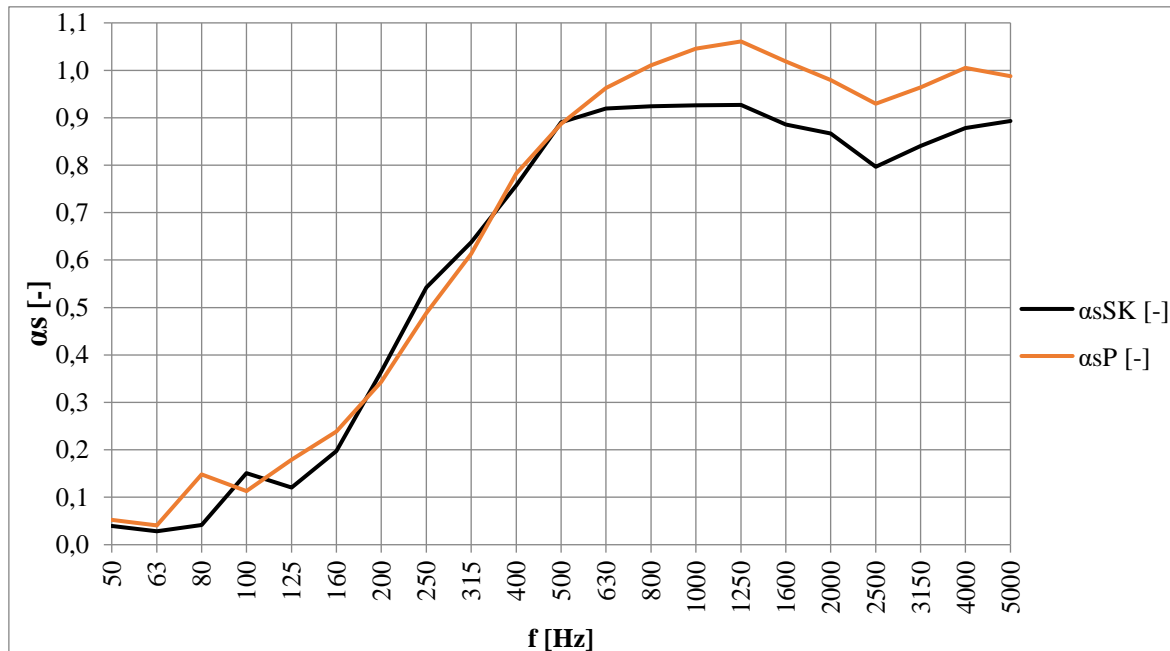
kde

α_S je výsledný činitel zvukové pohltivosti, bezrozměrné číslo;

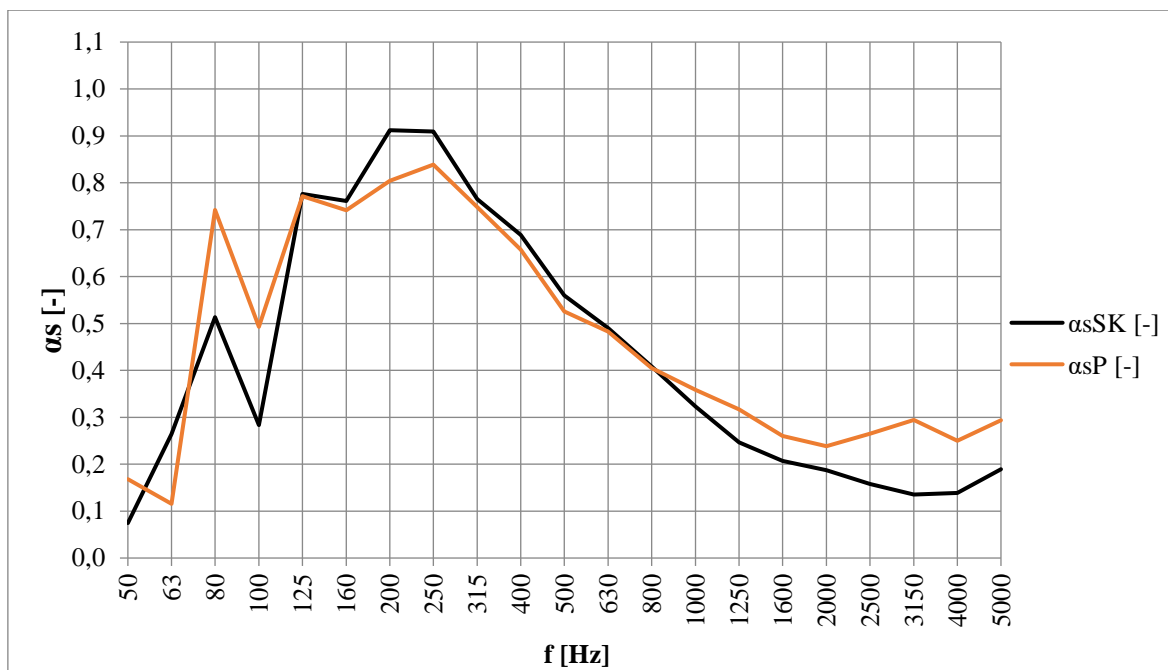
A_T je ekvivalentní pohltivá plocha zkušebního vzorku v m²;

S je celková plocha dozvukové komory v m²;

Příklad výpočtu je uveden pro třetinooktávové pásmo 100 Hz při měření se zdrojem v pozici Z1 a akustickým obkladem z podhledových desek. Pro porovnání výsledných činitelů zvukové pohltivosti je zde graf na obrázku 19 pro akustický obklad z podhledových desek a na obrázku 20 pro laťový rezonátor. Grafické závislosti jsou vyobrazeny pro měření se zdrojem zvuku na pozici Z1.



Obr.19 Grafické znázornění činitele zvukové pohltivosti obkladu z podhledových desek, v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech, pro měření ve svislé konfiguraci i na podlaze, se zdrojem zvuku v pozici Z1, vytvořeno v MS Excel



Obr.20 Grafické znázornění činitele zvukové pohltivosti laťového rezonátoru, v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech, pro měření ve svislé konfiguraci i na podlaze, se zdrojem zvuku v pozici Z1, vytvořeno v MS Excel

Z obou grafů je vidět rozdílnost křivek, což znamená, že i výslední činitelé zvukové pohltivosti α_s závisí na konfiguraci akustického materiálu v dozvukové komoře.

8 Závěr

Tato bakalářská práce, byla zaměřena na určování pohltivosti akustických prvků v dozvukové komoře. V teoretické části byly nadefinovány termíny, definice a veličiny, které jsou používány v prostorové akustice a lze jimi popsat chování zvuku v uzavřeném prostoru. Následně zde bylo uvedeno, za jakých podmínek lze měřit dobu dozvuku v dozvukové komoře. Protože je v komoře možné montovat různé akustické prvky, byla část teorie vyhrazena právě typům montáží akustických prvků do dozvukové komory. Byly zde také uvedeny metody, pomocí kterých lze měřit dobu dozvuku, kdy větší část je věnována metodě přerušeno šumu, která byla použita při měřeních v této práci.

Na začátku praktické části je uveden popis konstrukce, která byla v rámci této bakalářské práce vyhotovena a následně pevně přichycena na stěnu dozvukové komory v akustických laboratořích FEL ZČU. Tato konstrukce byla vyhotovena v návaznosti na teoretický návrh uvedený v bakalářské práci Josefa Holáta [12], kdy bylo nutné návrh upravit a vyřešit způsob připevnění přípravku do dozvukové komory a napojování dalších dřevěných trámů na základní konstrukci.

Na již připevněný přípravek v dozvukové komoře byly připevněny dva různé plošné akustické obklady. Obklad ze speciálních podhledových desek a laťový rezonátor. Pro každý obklad zvlášť byla provedena měření doby dozvuku v konfiguraci ve svislé poloze a na podlaze. Doba dozvuku byla také změřena pro prázdnou dozvukovou komoru, kdy byly přítomny pouze základové trámy přípravku a potřebná měřicí technika.

Následně byla ověřena ekvivalentní pohltivá plocha prázdné dozvukové komory, kdy její výsledky vyšly v souladu s normou [1], což lze vidět v tabulce 11 v kapitole 6. V poslední části práce jsou uvedeny výsledky činitele zvukové pohltivosti obou obkladů.

Výsledkem práce je také porovnání jednotlivých veličin charakterizujících zvukovou pohltivost měřených vzorků, získaných při měření s akustickými prvky ve svislé konfiguraci a na podlaze. Z výsledků je jasné, že se změřené doby dozvuku pro různá umístění vzorku liší, a proto jsou odlišné také další parametry, které jsou z doby dozvuku dopočítávány. Důvodem je, že při měření obkladu ve svislé konfiguraci, na něj nedopadalo stejné množství energie, jako v případě měření na podlaze. To může být způsobeno nedostatečně difúzním akustickým polem v dozvukové komoře v blízkém okolí svislých stěn, které je dané z tohoto pohledu nevhodným rozmístěním difuzorů. Z toho plyne, že výsledné křivky činitele zvukové pohltivosti jsou také rozdílné. Nicméně tvarově jsou téměř totožné, z čehož lze poté odhadnout reálný činitel zvukové pohltivosti. Problém s nedostatečně difúzním zvukovým

polem v dozvukové komoře, může být řešen zvolením vhodného počtu difuzorů a jejich rozmístěním vůči umístění měřeného vzorku na stěnu místnosti. Tím bychom dosáhli situace, kdy by nezáleželo, v jaké části komory se měřený vzorek materiálu nachází, protože by na něj dopadala přibližně stejná energie, jako v každém jiném bodě dozvukové komory.

Literatura

- [1] ČSN EN ISO 354. *Česká technická norma: Akustika-měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. 2. vydání. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [2] PAVELKA, Roman. *Prostorová akustika v aule Vědeckovýzkumného areálu PdF UP v Olomouci*. *Atelier-dek.cz* [online]. Praha: DEK, c2022, 2015 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/prostorov%C3%A1-akustika-v-aule-v%C4%9Bdeckov%C3%BDzkumn%C3%A9ho-are%C3%A1lu-pdf-v-olomouci-650>
- [3] Hladina akustického tlaku. *Ecophon.com* [online]. Praha: Saint-Gobain Ecophon AB [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.ecophon.com/cz/about-ecophon/acoustic-knowledge/basic-acoustics/sound-pressure-level/>
- [4] MINÁŘ, Jakub. *Reprodukce zvuku aneb základy teorie*. *AVmania.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, c2022, 7.7.2014 [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://avmania.zive.cz/reprodukce-zvuku-aneb-zaklady-teorie>
- [5] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL, 1980.
- [6] VEVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1283-6.
- [7] COX, Trevor J. a Peter D'ANTONIO. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 3rd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 9781498740999.
- [8] *Akustika místnosti nejen pro audiofilly*. *RDacoustic* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: <https://www.kapsia.com/>, c2021, 30.3.2019 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://rdacoustic.cz/cs/blog/2019/03/30/akustika-mistnosti/>
- [9] IZUU JOSEPH, Bright. *ARCHITECTURAL ACOUSTICS: INVESTIGATING THE EFFECTS OF BUILDING FORMS ON ACOUSTICS*. *Global scientific journals* [online]. 2021, February 2021, 499 [cit. 2022-03-31]. ISSN 2320-9186. Dostupné z: www.globalscientificjournal.com
- [10] LUX Narážecí matice M10 x 13 mm pozinkovaná, 8 ks. OBI [online]. Praha: OBI Česká republika, c2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.obicz.cz/narazeci-matice/lux-narazeci-matice-m10-x-13-mm-pozinkovana-8-ks/p/3623055>
- [11] ČSN 73 0527. *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. 2. vydání. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005.

- [12]HOLÁT, Josef. *Konstrukce nízkofrekvenčních tlumicích akustických prvků na principu Helmholtzových rezonátorů*. Plzeň, 2020. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Stanislav Bouzek.

Seznam obrázků

Obr.1 Teoretický příklad dozvukové křivky, zdroj viz [2], upraveno autorem dne 17.2.2022	4
Obr.2 Závislost optimální doby dozvuku T_0 pro zvuk o frekvenci 1000 Hz na objemu uzavřeného prostoru V , zdroj viz [11]	5
Obr.3 Grafické znázornění jednotlivých izofon, zdroj viz [4].....	5
Obr.4 Znázornění montáže typu E, vytvořeno v online aplikaci SmartDraw.....	12
Obr.5 Narážecí matice, zdroj viz [10].....	19
Obr.6 Půdorys dozvukové místnosti (červeně vyznačen přípravek), vytvořeno v Autodesk Fusion 360	20
Obr.7 Model umístěného přípravku v dozvukové komoře (prázdna dozvuková komora), vytvořeno v Autodesk Fusion 360.....	21
Obr.8 Půdorys dozvukové komory s pozicemi mikrofonů a zdrojů (rozměry jsou udávány v mm), vytvořeno v Autodesk Fusion 360	23
Obr.9 Blokové schéma měřicí soustavy, pro získávání doby dozvuku, vytvořeno online v Lucidchart.....	24
Obr.10 Závislosti doby dozvuku na jednotlivých 1/3 oktávových pásmech : měření se zdrojem na pozici Z1 a Z2, pro prázdnou dozvukovou komoru, vytvořeno v MS Excel ...	25
Obr.11 Model přípravku s akustickým obkladem <i>OPTA A</i> , ve svislé konfiguraci na stěně dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360.....	26
Obr.12 Model přípravku s akustickým obkladem <i>OPTA A</i> , na podlaze dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360	27
Obr.13 Zprůměrované doby dozvuku v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech : měření se zdrojem zvuku na pozici Z1, pro plošný obklad z podhledových desek, vytvořeno v MS Excel	27
Obr.14 Model laťového rezonátoru, ve svislé konfiguraci na stěně dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360.....	29
Obr.15 Model laťového rezonátoru, na podlaze dozvukové komory, vytvořeno v Autodesk Fusion 360.....	29
Obr.16 Zprůměrované doby dozvuku v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech : měření se zdrojem zvuku na pozici Z1, pro laťový rezonátor, vytvořeno v MS Excel.....	30

Obr.17 Grafické znázornění ekvivalentních pohltivých ploch zkušební vzorku z podhledových desek, pro měření ve svislé konfiguraci a na podlaze, se zdrojem zvuku na pozici Z1, vytvořeno v MS Excel.....	35
Obr.18 Grafické znázornění ekvivalentních pohltivých ploch laťového rezonátoru, pro měření ve svislé konfiguraci i na podlaze, se zdrojem zvuku v pozici Z1, vytvořeno v MS Excel.....	36
Obr.19 Grafické znázornění činitele zvukové pohltivosti obkladu z podhledových desek, v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech, pro měření ve svislé konfiguraci i na podlaze, se zdrojem zvuku v pozici Z1, vytvořeno v MS Excel.....	37
Obr.20 Grafické znázornění činitele zvukové pohltivosti laťového rezonátoru, v jednotlivých 1/3 oktávových pásmech, pro měření ve svislé konfiguraci i na podlaze, se zdrojem zvuku v pozici Z1, vytvořeno v MS Excel.....	38

Seznam tabulek

Tabulka 1 Maximální pohltivé plochy dozvukové komory o objemu $V=200 \text{ m}^3$, zdroj viz [1].....	8
Tabulka 2 Hodnoty třetinooktávových frekvenčních pásem, udávané v Hz, data převzána z [1], tabulka vytvořena v MS Excel	16
Tabulka 3 Seznam použitých přístrojů při měřeních v dozvukové komoře, vytvořeno v MS Excel	22
Tabulka 4 Tabulka se souřadnicemi umístění mikrofonů, vytvořeno v MS Excel	22
Tabulka 5 Tabulka se souřadnicemi umístění reproduktorů, vytvořeno v MS Excel ...	23
Tabulka 6 Naměřené doby dozvuku mikrofony na pozicích MX v prázdné dozvukové komoře, pro umístění zdroje Z1, vytvořeno v MS Excel	25
Tabulka 7 Vypočtené průměrné doby dozvuku, v daných situacích a 1/3 oktávových frekvenčních pásmech, pro měření s podhledovými deskami, vytvořeno v MS Excel.....	28
Tabulka 8 Vypočtené průměrné doby dozvuku, v daných situacích a 1/3 oktávových frekvenčních pásmech, pro měření laťovým rezonátorem, vytvořeno v MS Excel	30
Tabulka 9 Ekvivalentní pohltivé plochy prázdné dozvukové komory získané výpočty v porovnání s normativními, vytvořeno v MS Excel.....	33

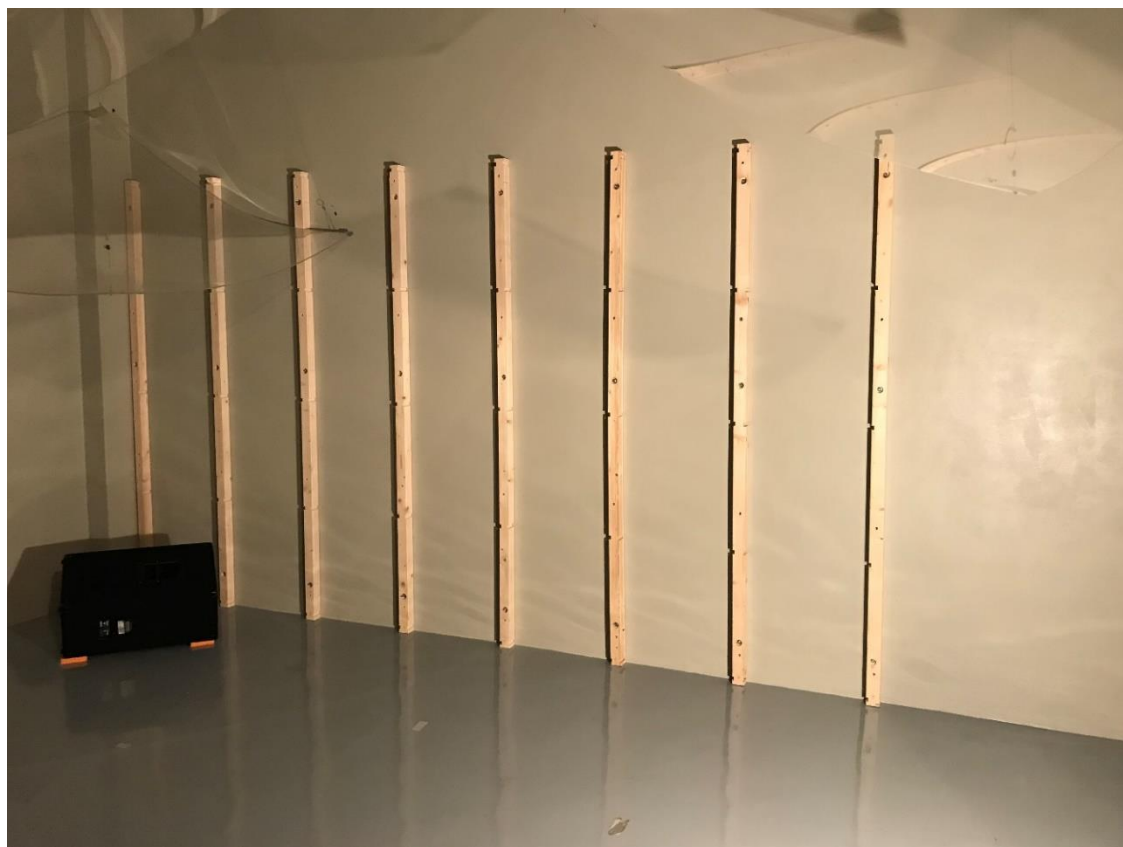
Seznam příloh

Obr. P1 Tabulka hodnot činitelů útlumu, při teplotě vzduchu 20 °C a dané procentuální vlhkosti	I
Obr. P2 Namontovaný vyhotovený přípravek v dozvukové komoře, foceno dne 29. 10. 2021	I
Obr. P3 Laťový rezonátor přimontovaný na stěně dozvukové komory, foceno dne 28. 4. 2022	II
Obr. P4 Obklad z podhledových desek Ecophon OPTA A, na stěně dozvukové komory, foceno 3. 11. 2021	II
Obr. P5 Laťový rezonátor v konfiguraci na podlaze dozvukové komory, foceno dne 28. 4. 2022	III
Obr. P6 Obklad z podhledových desek Ecophon OPTA A, na podlaze dozvukové komory, foceno 12. 11. 2021	IV

Přílohy

(i) Teplota vzduchu: 20 °C											
Vyvolená frekvence (Hz)	Relativní vlhkost (%)										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
50	$2,70 \times 10^{-1}$	$2,14 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-1}$	$9,85 \times 10^{-2}$	$7,84 \times 10^{-2}$	$6,60 \times 10^{-2}$	$5,70 \times 10^{-2}$	$5,01 \times 10^{-2}$	$4,47 \times 10^{-2}$	$4,03 \times 10^{-2}$
63	$3,70 \times 10^{-1}$	$3,10 \times 10^{-1}$	$2,60 \times 10^{-1}$	$1,92 \times 10^{-1}$	$1,50 \times 10^{-1}$	$1,23 \times 10^{-1}$	$1,04 \times 10^{-1}$	$8,97 \times 10^{-2}$	$7,90 \times 10^{-2}$	$7,05 \times 10^{-2}$	$6,37 \times 10^{-2}$
80	$4,87 \times 10^{-1}$	$4,32 \times 10^{-1}$	$3,77 \times 10^{-1}$	$2,90 \times 10^{-1}$	$2,31 \times 10^{-1}$	$1,91 \times 10^{-1}$	$1,62 \times 10^{-1}$	$1,41 \times 10^{-1}$	$1,24 \times 10^{-1}$	$1,11 \times 10^{-1}$	$1,00 \times 10^{-1}$
100	$6,22 \times 10^{-1}$	$5,79 \times 10^{-1}$	$5,29 \times 10^{-1}$	$4,29 \times 10^{-1}$	$3,51 \times 10^{-1}$	$2,94 \times 10^{-1}$	$2,52 \times 10^{-1}$	$2,20 \times 10^{-1}$	$1,94 \times 10^{-1}$	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,58 \times 10^{-1}$
125	$7,76 \times 10^{-1}$	$7,46 \times 10^{-1}$	$7,12 \times 10^{-1}$	$6,15 \times 10^{-1}$	$5,21 \times 10^{-1}$	$4,45 \times 10^{-1}$	$3,86 \times 10^{-1}$	$3,39 \times 10^{-1}$	$3,02 \times 10^{-1}$	$2,72 \times 10^{-1}$	$2,47 \times 10^{-1}$
160	$9,85 \times 10^{-1}$	$9,31 \times 10^{-1}$	$9,19 \times 10^{-1}$	$8,49 \times 10^{-1}$	$7,52 \times 10^{-1}$	$6,60 \times 10^{-1}$	$5,82 \times 10^{-1}$	$5,18 \times 10^{-1}$	$4,65 \times 10^{-1}$	$4,21 \times 10^{-1}$	$3,84 \times 10^{-1}$
200	1,22	1,14	1,14	1,12	1,05	$9,50 \times 10^{-1}$	$8,58 \times 10^{-1}$	$7,76 \times 10^{-1}$	$7,05 \times 10^{-1}$	$6,44 \times 10^{-1}$	$5,91 \times 10^{-1}$
250	1,58	1,39	1,39	1,42	1,39	1,32	1,23	1,13	1,04	$9,66 \times 10^{-1}$	$8,95 \times 10^{-1}$
315	2,12	1,74	1,69	1,75	1,78	1,75	1,68	1,60	1,50	1,41	1,33
400	2,95	2,23	2,06	2,10	2,19	2,23	2,21	2,16	2,08	2,00	1,90
500	4,25	2,97	2,60	2,52	2,63	2,73	2,79	2,80	2,77	2,71	2,63
630	6,28	4,12	3,39	3,06	3,13	3,27	3,40	3,48	3,52	3,52	3,49
800	9,38	5,92	4,62	3,84	3,77	3,89	4,05	4,19	4,31	4,39	4,43
1 000	$1,41 \times 10$	8,72	6,53	5,01	4,65	4,85	4,80	4,98	5,15	5,30	5,42
1 250	$2,11 \times 10$	$1,31 \times 10$	9,53	6,81	5,97	5,75	5,78	5,92	6,10	6,29	6,48
1 600	$3,13 \times 10$	$1,98 \times 10$	$1,42 \times 10$	9,83	8,00	7,37	7,17	7,18	7,31	7,48	7,68
2 000	$4,53 \times 10$	$2,99 \times 10$	$2,15 \times 10$	$1,41 \times 10$	$1,12 \times 10$	9,88	9,25	9,02	8,98	9,06	9,21
2 500	$6,35 \times 10$	$4,48 \times 10$	$3,26 \times 10$	$2,10 \times 10$	$1,61 \times 10$	$1,37 \times 10$	$1,25 \times 10$	$1,18 \times 10$	$1,15 \times 10$	$1,13 \times 10$	$1,13 \times 10$
3 150	$8,54 \times 10$	$6,62 \times 10$	$4,94 \times 10$	$3,18 \times 10$	$2,39 \times 10$	$1,98 \times 10$	$1,75 \times 10$	$1,61 \times 10$	$1,53 \times 10$	$1,48 \times 10$	$1,45 \times 10$
4 000	$1,09 \times 10^2$	$9,51 \times 10$	$7,41 \times 10$	$4,85 \times 10$	$3,61 \times 10$	$2,94 \times 10$	$2,54 \times 10$	$2,29 \times 10$	$2,13 \times 10$	$2,02 \times 10$	$1,94 \times 10$
5 000	$1,33 \times 10^2$	$1,32 \times 10^2$	$1,09 \times 10^2$	$7,39 \times 10$	$5,51 \times 10$	$4,44 \times 10$	$3,79 \times 10$	$3,38 \times 10$	$3,06 \times 10$	$2,86 \times 10$	$2,71 \times 10$
6 300	$1,58 \times 10^2$	$1,75 \times 10^2$	$1,56 \times 10^2$	$1,12 \times 10^2$	$8,42 \times 10$	$6,78 \times 10$	$5,74 \times 10$	$5,04 \times 10$	$4,54 \times 10$	$4,18 \times 10$	$3,91 \times 10$
8 000	$1,75 \times 10^2$	$2,21 \times 10^2$	$2,15 \times 10^2$	$1,68 \times 10^2$	$1,28 \times 10^2$	$1,04 \times 10^2$	$8,78 \times 10$	$7,68 \times 10$	$6,96 \times 10$	$6,28 \times 10$	$5,81 \times 10$
10 000	$1,93 \times 10^2$	$2,67 \times 10^2$	$2,84 \times 10^2$	$2,42 \times 10^2$	$1,94 \times 10^2$	$1,69 \times 10^2$	$1,35 \times 10^2$	$1,18 \times 10^2$	$1,05 \times 10^2$	$9,53 \times 10$	$8,79 \times 10$

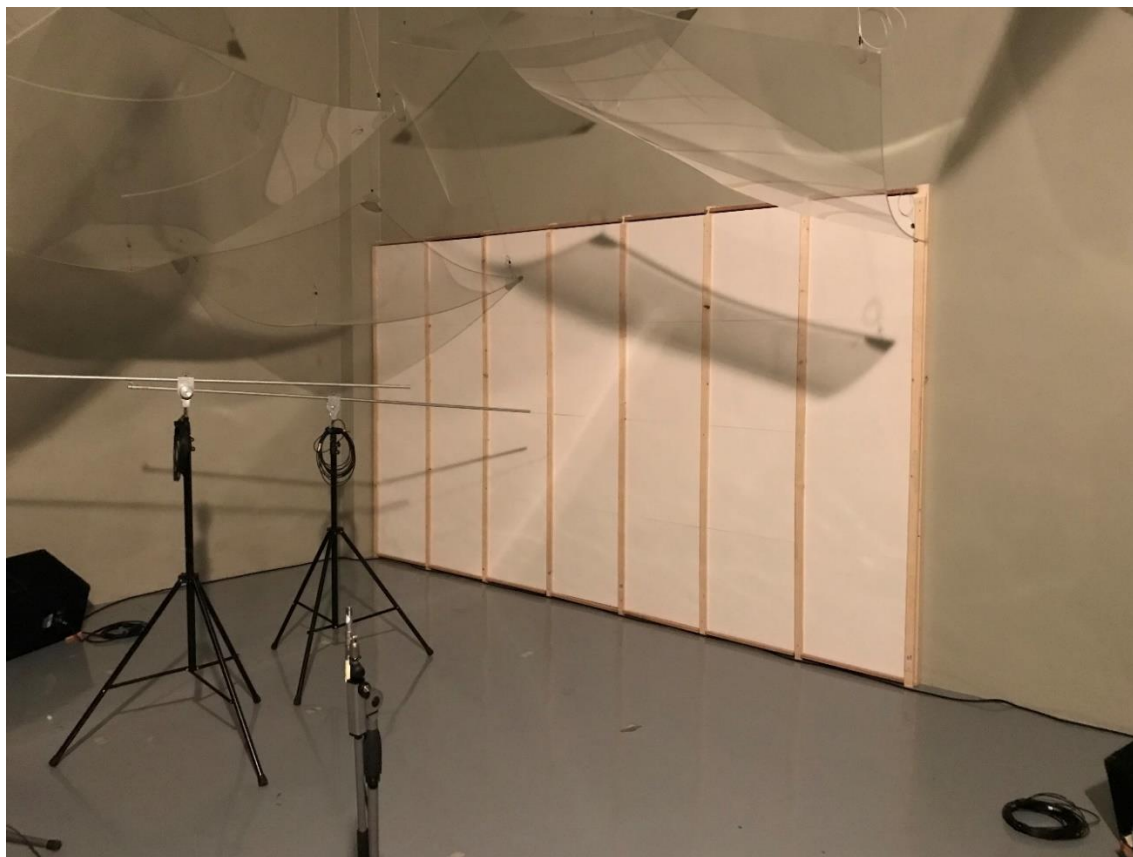
Obr. P1 Tabulka hodnot činitelů útlumu, při teplotě vzduchu 20 °C a dané procentuální vlhkosti



Obr. P2 Namontovaný vyhotovený přípravek v dozvukové komoře, foceno dne 29. 10. 2021



Obr. P3 Laťový rezonátor přimontovaný na stěně dozvukové komory, foceno dne 28. 4. 2022



Obr. P4 Obklad z podhledových desek Ecophon OPTA A, na stěně dozvukové komory, foceno 3. 11. 2021



Obr. P5 Laťový rezonátor v konfiguraci na podlaze dozvukové komory, foceno dne 28. 4. 2022



Obr. P6 Obklad z pohledových desek Ecophon OPTA A, na podlaze dozvukové komory, foceno 12. 11. 2021