

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Řešení prostorové akustiky poslechové místnosti

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

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš NOLČ**
Osobní číslo: **E22N0011P**
Studijní program: **N0713A060011 Materiály a technologie pro elektrotechniku**
Téma práce: **Řešení prostorové akustiky poslechové místnosti**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

- Změřte stávající akustické parametry učebny EK708 (doba dozvuku, rozložení akustického pole, srozumitelnost řeči).
- Na základě výsledků měření rozhodněte, zda prostor splňuje požadavky na poslechové místnosti pro vícekanálové audio systémy. Pokud současné akustické úpravy nedostačují, navrhňte a realizujte další potřebné úpravy.
- Vytvořte simulační model řešeného prostoru v programu EASE. Model optimalizujte na základě výsledků měření.


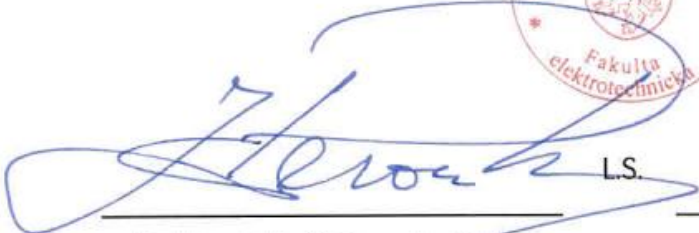
Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. M. Krňák. Akustické obklady
2. F. Kolmer, J. Kyncl. Prostorová akustika
3. T.J. Cox, P. D'Antonio. Acoustic Absorbers and Diffusers
4. L. L. Beranek – Acoustics

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Bouzek**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



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


Prof. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku řešení prostorové akustiky poslechových místností s cílem zajistit optimální kvalitu poslechu hudby a mluveného slova. Teoretická část definuje klíčové akustické parametry související s návrhem těchto místností a zkoumá principy akustického pole uzavřených prostorů. Praktická část se zabývá měřením parametrů prostorové akustiky a modelováním akustického pole místnosti EK708. Následně ověřuje účinnost navržených akustických úprav pomocí simulací v programu EASE 4.4. Výsledkem práce je finální návrh akustických úprav, po jejichž realizaci bude řešený prostor splňovat požadavky na poslechové místnost.

Klíčová slova

akustika poslechových místností, akustické úpravy, simulace prostorové akustiky, realizace akustických prvků, optimalizace doby dozvuku

Abstract

This thesis focuses on the problem of room acoustics of listening rooms to ensure optimal quality of listening to music and spoken word. The theoretical part defines the key acoustic parameters related to the design of these rooms and explores the principles of the acoustic field of enclosed spaces. The practical part deals with the measurement of spatial acoustics parameters and modelling of the acoustic field of room EK708. It then verifies the effectiveness of the acoustic treatments by means of simulations in EASE 4.4. The result of the work is the final design of acoustic modifications, after which the designed space will meet the requirements for a listening room.

Key Words

listening room acoustics, acoustic treatment, spatial acoustics simulation, implementation of acoustic elements, reverberation time optimization

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího závěrečné práce, za použití odborné literatury a jiných zdrojů, které jsou v práci odcitovány a uvedeny v seznamu literatury. Dále prohlašuji, že práce byla vyhotovena v souladu s autorským zákonem č. 121/2000 Sb. a jsem si plně vědom následků jeho porušení.

V Plzni dne 23.5.2024

Podpis: Bc. Lukáš Nolč

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Základní parametry poslechových místností	- 2 -
1.1 Doba dozvuku	- 2 -
1.2 Činitel zvukové pohltivosti	- 5 -
1.3 Srozumitelnost	- 7 -
1.4 Kritická vzdálenost	- 10 -
2 Akustické pole uzavřených prostorů	- 11 -
2.1 Vlastní kmity prostoru	- 11 -
2.2 Frekvenční amplitudová charakteristika audiosystému	- 14 -
3 Akustické obklady poslechových místností	- 17 -
3.1 Pohltivé prvky pro střední a vysoké kmitočty	- 17 -
3.2 Pohltivé prvky pro nízké kmitočty	- 20 -
3.2.1 Kmitající panely a membrány	- 20 -
3.2.2 Helmholtzovy rezonátory	- 22 -
3.3 Rozptylové prvky	- 25 -
3.4 Umístění akustických obkladů	- 28 -
4 Požadavky na akustiku poslechových místností	- 29 -
4.1 Limity hluku pozadí	- 29 -
4.2 Rozměry poslechových místností	- 30 -
4.3 Požadavky na dobu dozvuku	- 31 -
4.4 Dodatečné akustické úpravy	- 33 -
4.5 Poslechové místo	- 33 -
5 Modelování akustických polí uzavřených prostorů	- 36 -
5.1 Modelování v programu EASE 4.4	- 37 -
6 Výchozí stav poslechové místnosti EK708	- 40 -
6.1 Měření doby dozvuku	- 41 -
6.2 Měření srozumitelnosti	- 44 -
6.3 Analýza rozložení akustického pole v místnosti	- 45 -
7 Modelování a akustické simulace	- 47 -

7.1	Příprava modelu místnosti EK708.....	- 47 -
7.2	Simulace místnosti EK708 – výchozí stav	- 49 -
7.3	Simulace místnosti EK 708 – stropní obklad	- 53 -
7.4	Simulace místnosti EK708 – boční stěny	- 56 -
8	Dodatečné akustické úpravy v místnosti EK708.....	- 62 -
8.1	Realizace stropního akustického obkladu	- 62 -
	Závěr.....	- 66 -
	Seznam obrázku.....	- 68 -
	Seznam tabulek.....	- 71 -
	Literatura	- 72 -
	Seznam Příloh.....	I
	Přílohy - tabulky	I
	Přílohy - obrázky	III
	Přílohy – program pro výpočet vlastních frekvencí	VII

Seznam symbolů a zkratek

Obecné zkratky

<i>BEM</i>	metoda hraničních prvků
<i>C</i>	centrální reproduktor
<i>CAD</i>	computer aided design
<i>FEM</i>	metoda konečných prvků
<i>L</i>	levý reproduktor
<i>LS</i>	levý zadní reproduktor
<i>P</i>	pravý reproduktor
<i>RS</i>	pravý zadní reproduktor
<i>SEM</i>	skenovací elektronová mikroskopie

Technické zkratky

Značka	Popisek	Jednotka
$2Al$	koncová korekce, počítá s kmity v těsné blízkosti za a před hrdlem	(m)
<i>A</i>	ekvivalentní pohltivá plocha	(m ²)
<i>a</i>	rozměr dutého kvádrového prostoru ve směru osy x	(m)
<i>b</i>	rozměr dutého kvádrového prostoru ve směru osy y	(m)
<i>b</i>	tloušťka jedné šachty odrazové fázové mřížky (RPG)	(m)
<i>b</i>	vzdálenost mezi čely L a P reproduktoru audiosystému	(m)
<i>c</i>	rozměr dutého kvádrového prostoru ve směru osy z	(m)
c_0	rychlost šíření zvuku v daném médiu	(m/s)
C_{50}	míra zřetelnosti	(dB)
C_{80}	míra jasnosti	(dB)
C_{te}	index počáteční zvukové energie vzhledem k pozdní	(dB)
<i>d</i>	tloušťka vzduchové kapsy	(m)
<i>D</i>	vzdálenost mezi zdrojem a místem příjmu	(m)
d_n	hloubka šachty odrazové fázové mřížky	(m)
<i>f</i>	frekvence	(Hz)
f_k	kritický kmitočet	(Hz)
f_m	mezní frekvence pohltivosti porézních materiálů	(Hz)
f_r	rezonanční kmitočet	(Hz)
<i>h</i>	kolmá vzdálenost L a P reproduktoru od poslechového místa	(m)
<i>h</i>	tloušťka vrstvy porézního materiálu	(m)
<i>h</i>	výška místnosti	(m)
I_a	intenzita pohlceného zvuku	(W/m ²)
I_i	intenzita dopadajícího zvuku	(W/m ²)
<i>l</i>	délka hrdla rezonátoru	(m)
<i>l</i>	délka místnosti	(m)
<i>L</i>	šířka jedné periody uspořádání difuzoru	(m)
L_{Aeq}	hladiny akustického tlaku zaznamenané při měření STIPA	(dB)
$L_{p\ max}$	limitní hodnoty akustického tlaku hlukového pozadí	(dB)

m	činitel útlumu zvuku ve vzduchu	(dB/m)
N	počet zdrojů	(-)
$N(f)$	celkový počet vlastních kmitů	(-)
$N \cdot b$	celková šířka odrazové fázové mřížky	(m)
n_x	mód vlastních kmitů ve směru osy x	(-)
n_y	mód vlastních kmitů ve směru osy y	(-)
n_z	mód vlastních kmitů ve směru osy z	(-)
$p(t)$	okamžitý akustický tlak impulsové odezvy v měřicím bodě	(Pa)
Q	činitel směrovosti zdroje zvuku	(-)
r_k	kritická vzdálenost	(m)
r_L	povolený radius okolo poslechového místa audiosystému	(m)
RT_{60}	doba dozvuku	(s)
RT_{60E}	doba dozvuku dle Eyringa	(s)
RT_{60s}	doba dozvuku dle Sabina	(s)
S	plocha	(m ²)
S_0	plocha jednoho otvoru rezonátoru	(m ²)
S_i	dílčí pohltivé plochy	(m ²)
SPL	hladina akustického tlaku (sound pressure level)	(dB)
STI	speech transmission index	(-)
$STIPA$	speech transmission Index Public Address	(-)
T	doba dozvuku	(s)
T_0	optimální doba dozvuku prostoru	(s)
T_{20}	pokles hladiny akustického tlaku po vypnutí zdroje o 20 dB	(s)
ta	tloušťka porézního materiálu	(m)
t_e	časová hranice 50 nebo 80 ms	(ms)
T_m	nominální doba dozvuku	(s)
V	objem	(m ³)
v	výška difuzoru	(m)
V_0	objem referenční místnosti	(m ³)
V_o	optimální objem prostoru	(m ³)
w	šířka místnosti	(m)
ZSS	ztráta srozumitelnosti souhlásek	(%)
α	činitel zvukové pohltivosti	(-)
α_i	dílčí činitelé zvukové pohltivosti příslušných pohltivých materiálů	(-)
α_s	střední činitel zvukové pohltivosti vnitřního povrchu prostoru	(-)
θ	úhel svírající L a P reproduktor audiosystému	(°)
λ	vlnová délka	(m)
ρ	hustota	(kg/m ³)
φ	úhel mezi předními a zadními reproduktory audiosystému	(°)

Úvod

Řešení akustiky poslechových prostorů je nezbytné pro zajištění dobré kvality poslechu hudby nebo mluveného slova. Správné řešení prostorové akustiky zajistí, že zvuk v poslechovém prostoru je čistý, vyvážený a přirozený. To je zásadní zejména v případě koncertních sálů, divadel, kin nebo právě poslechových místností, kde kvalita zvuku přímo ovlivňuje zážitek posluchačů.

Tato diplomová práce se zaměřuje na praktické řešení prostorové akustiky budoucí poslechové místnosti. V teoretické části jsou popsány základní parametry související s návrhem poslechových místností, jako je doba dozvuku, srozumitelnost nebo činitel zvukové pohltivosti. Na základě těchto parametrů lze předpokládat, jakou kvalitu poslechu hudby nebo mluveného slova lze v daném prostoru očekávat. Poskytují však i potřebné informace vedoucí k úspěšnému návrhu a realizaci akustických úprav. Při řešení prostorové akustiky poslechových místností je nutné se zabývat i jejich akustickým polem, což souvisí například s rozložením akustického tlaku v místnosti. Pro porozumění akustického pole uzavřených prostorů je však nutné znát základy vlnové akustiky, která hraje klíčovou roli při řešení problémů spojených například s nerovnoměrným rozložením akustického tlaku na frekvencích nižších než je kritický kmitočet. Dále se práce zabývá akustickými obklady a doporučeními norem a specifikací týkajících se akustiky uzavřených místností. Před samotnou praktickou částí se práce teoreticky věnuje i modelování akustických polí, což je moderní přístup k návrhu akustických prvků v simulovaných prostorech.

Praktická část této práce se v úvodu věnuje měření parametrů místnosti ve výchozím stavu, jako je doba dozvuku a index srozumitelnosti STIPA. Tato měření jsou dostatečným výchozím bodem pro následující naladění modelu poslechové místnosti v programu EASE 4.4. Model místnosti ve výchozím stavu je dále rozšířen o plánované akustické úpravy, které povedou ke zlepšení celkové kvality poslechu ať už z hlediska doby dozvuku, nebo srozumitelnosti. Na základě provedených simulací s různými fázemi modelu poslechové místnosti, je ověřena nejen správná funkce stropního obkladu, jehož fyzickou realizací se zabývá poslední kapitola této diplomové práce. Realizace prototypu sestavy stropního obkladu s univerzálním způsobem uchycení ke stropu a návrh rozmístění těchto akustických prvků na stropě místnosti uzavírá problematiku řešenou v této diplomové práci.

1 Základní parametry poslechových místností

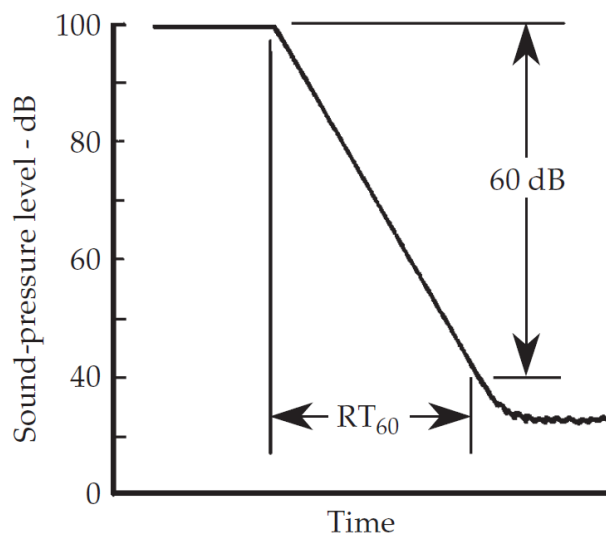
Poslechové místnosti svými akustickými parametry zásadně ovlivňují reprodukci a poslech zvuku ať už ve formě hudby různých žánrů nebo mluveného slova. Zajištění optimální akustické kvality prostoru je nezbytné pro správné vnímání a hodnocení zvukových záznamů, zásadní pak pro práci s nimi (úpravy nahrávek, mix, mastering apod.). Vhodně stanovené požadavky na akustické parametry těchto místností hrají klíčovou roli při jejich návrhu, ale i během řešení akustických úprav stávajících prostorů. V této části jsou popsány základní parametry poslechových místností, dle kterých následně hodnotíme akustickou kvalitu.

1.1 Doba dozvuku

Když dochází ke generování zvuku reproduktorem (nebo jiným zdrojem zvuku), hladina akustického tlaku v uzavřeném prostoru rychle roste na určitou hodnotu, na které se ustálí, v případě, že zdroj zvuk stále generuje. V tomto stavu je zvuková energie vysílaná z reproduktoru dostatečná k překonání ztrát ve vzduchu a na pohltivých prvcích místnosti (stěny, nábytek, akustické elementy). Když je zvukový signál přerušen, trvá určitou dobu, než hladina akustického tlaku v místnosti poklesne na původní hodnotu (hluk pozadí). Doba dozvuku bývá označovaná jako RT_{60} . Je to klíčový parametr poslechových místností, který z velké části určuje optimálnost akustické kvality a má významný vliv na vnímání zvuku v daném prostoru. Doba dozvuku tedy představuje časový interval, během kterého akustický tlak v místnosti poklesne o 60 dB poté, co je zdroj zvuku přerušen [5][7][9]. Při reálných měřeních nemusí být vždy možné dosáhnout poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB (vysoké nároky na výkon reproduktorové soustavy a nízké hlukové pozadí). Často se využívá měření poklesu hladiny akustického tlaku o 20 nebo 30 dB. Poté je však nutné křivky extrapolovat až na dobu poklesu o 60 dB [17]. Teoretická závislost hladiny akustického tlaku na čase po vypnutí zdroje zvuku s vyobrazenou dobou dozvuku je vyobrazena na Obr. 1.

Pro různé účely mohou být požadovány různé hodnoty RT_{60} . Například režijní místnost nahrávacího studia často vyžaduje kratší dobu dozvuku než například posluchárna nebo v krajním případě např. kostel, aby se zachovala čistota nahrávek a minimalizovalo zkreslení nežádoucími odrazy přicházejícími s určitým zpožděním za přímým zvukem. Optimální doba dozvuku je velmi důležitá při návrhu poslechových místností, a to jak pro profesionální, tak pro domácí použití. Docílení optimální doby dozvuku je základem ke zlepšení celkové

kvality vnímaného zvuku a poskytnutí příjemného prostředí pro poslech hudby, sledování filmů nebo pořizování nahrávek [7][14].



Obr. 1: Závislost hladiny akustického tlaku na čase (vyobrazení RT_{60}), převzato z [7]

Výpočet doby dozvuku se zabývá statistická teorie akustiky, přičemž uvažujeme 3 zjednodušení, která definují difuzní akustické pole:

- Ve všech bodech uzavřeného prostoru je konstantní objemová hustota zvukové energie.
- V každém bodě tohoto prostoru lze spočítat celkovou hodnotu součtem středních hodnot všech zvukových energií, které měřicího místa dosáhly díky odrazům.
- Veškeré úhly, pod kterými zvuk dopadá do jakéhokoliv bodu uzavřeného prostoru, jsou stejně pravděpodobné.

Všechny uvedené vztahy zabývající se výpočtem doby dozvuku uvažují útlum zvuku ve vzduchu (znatelný až na frekvencích vyšších jak 1 kHz za normálních klimatických podmínek). První možností je výpočet dle Sabina, kdy tento přístup lze využít v málo tlumených prostorech s předpokládanou vyšší dobou dozvuku [5][9][12].

$$RT_{60s} = \frac{0,164 \cdot V}{A + 4 \cdot m \cdot V} \quad (1)$$

0,164 (-) – experimentálně získaná konstanta;

V (m^3) – objem uzavřeného prostoru;

A (m^2) – ekvivalentní pohltivá plocha;

RT_{60s} (s) – doba dozvuku dle Sabina;

m (dB/m) – činitel útlumu zvuku ve vzduchu (dán normou [12]);

Výpočet ekvivalentní pohltivé plochy lze poté realizovat následovně:

$$\alpha_s = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i \quad (2)$$

$$A = \alpha \cdot S \quad (3)$$

α_s (-) – střední činitel zvukové pohltivosti vnitřního povrchu prostoru;

α_i (-) – dílčí činitelé zvukové pohltivosti příslušných pohltivých materiálů;

S (m²) – celková plocha prostoru;

S_i (m²) – dílčí pohltivé plochy;

A (m²) – ekvivalentní pohltivá plocha;

Sabinův přístup není optimální pro výpočet doby dozvuku v uzavřených prostorech s vyšší hodnotou činitele zvukové pohltivosti. Praktická část této práce je věnována poslechové místnosti, což je prostor, kde lze očekávat naopak vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti, proto je nutné definovat druhý přístup k výpočtu. Dle Eyringova přístupu totiž není pohlcování na plochách kontinuální (což dle Sabina je), ale skokové. Tento fakt znamená, že při interakci zvukové vlny s pohltivou plochou dojde ke skokovému snížení intenzity zvuku. Pro tuto úvahu platí Eyringův vztah pro výpočet doby dozvuku[1].

$$RT_{60E} = \frac{0,164 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_s) + 4 \cdot m \cdot V} \quad (4)$$

0,164 (-) – experimentálně získaná konstanta;

V (m³) – objem uzavřeného prostoru;

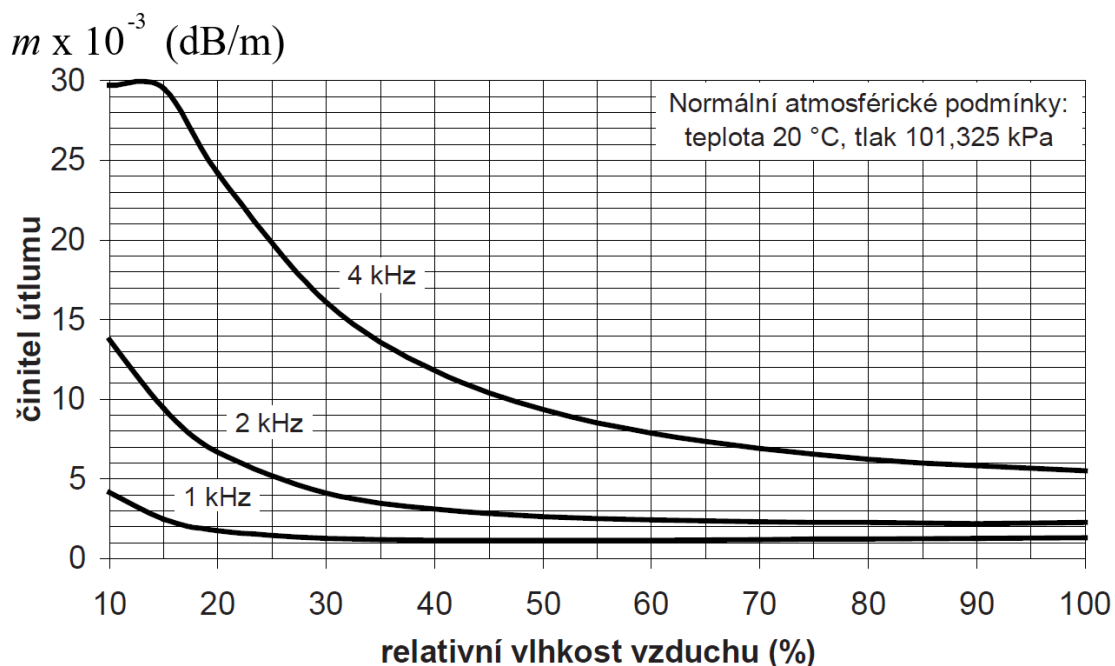
S (m²) – celková plocha prostoru;

α_s (-) – střední činitel zvukové pohltivosti vnitřního povrchu prostoru;

RT_{60E} (s) – doba dozvuku dle Eyringa;

m (dB/m) – činitel útlumu zvuku ve vzduchu (dán normou [12]);

Jak již bylo zmíněno, při výpočtu doby dozvuku dle uvedených vztahů je nutné uvažovat i útlum zvuku ve vzduchu. Tento útlum je ale výrazněji znatelný až na vyšších frekvencích a u místností s větším objemem. Činitel útlumu ve vzduchu m je ovlivňován relativní vlhkostí a jeho hodnoty jsou dány normou ČSN 73 0525 [1][12].



Obr. 2: Závislost činitele útlumu ve vzduchu m na relativní vlhkosti, převzato z [12]

1.2 Činitel zvukové pohltivosti

Mezi další základní parametry patří činitel zvukové pohltivosti. Tento parametr byl již uveden výše v souvislosti s výpočtem doby dozvuku. Primárně je uváděn v souvislosti s pohltivostí daného materiálu a popisuje pak pohltivost hraničních ploch uzavřeného prostoru. Prakticky dosahuje hodnot v rozsahu (0,1), je frekvenčně závislý a lze jej vyjádřit pomocí vztahu (5) [2][9].

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} \quad (5)$$

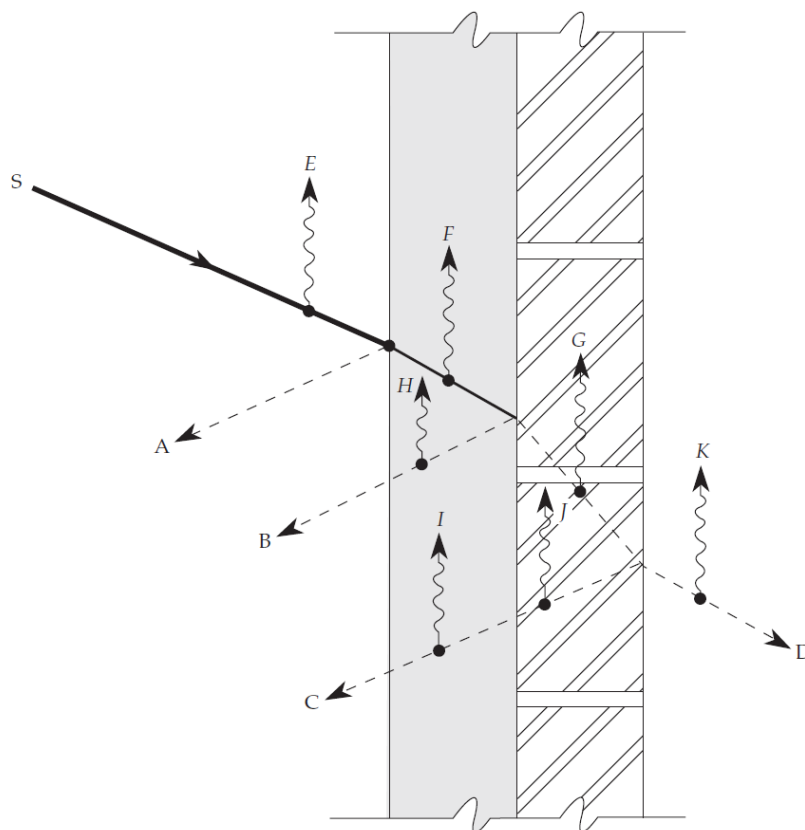
α (-) – činitel zvukové pohltivosti;

I_a (W/m^2) – intenzita pohlceného zvuku;

I_i (W/m^2) – intenzita dopadajícího zvuku;

Situace na Obr. 3 vysvětluje k čemu dochází při interakce zvukové vlny s pohltivým materiálem (šedé vyobrazení) připevněném na pevné, tuhé betonové stěně (čerchované vyobrazení). Zvuková vlna (S) se šíří od zdroje zvuku vzduchem, kde dochází k jeho útlumu, tedy přeměně části zvukové energie na teplo (E). Při interakci s pohltivým materiálem dochází z části k odrazu zvukové vlny (A), jejímu pohlcení s následnou přeměnou na teplo (F) a průchodu na rozhraní pohltivý materiál/betonový podklad. Na rozhraní těchto materiálů dojde opět k vytvoření odražené vlny (B), která prochází zpět do místnosti skrze pohltivý

materiál a část její energie je pohlcena. Jelikož má betonová stěna nízký činitel zvukové pohltivosti a poměrně slušnou zvukovou neprůzvučnost, odražená vlna (B) bude nést větší část zvukové energie, než vlna procházející (D). Slabší procházející vlna (D) bude i tak ztrácet část své energie, která bude v betonu pohlcena a přeměněna na teplo (G).

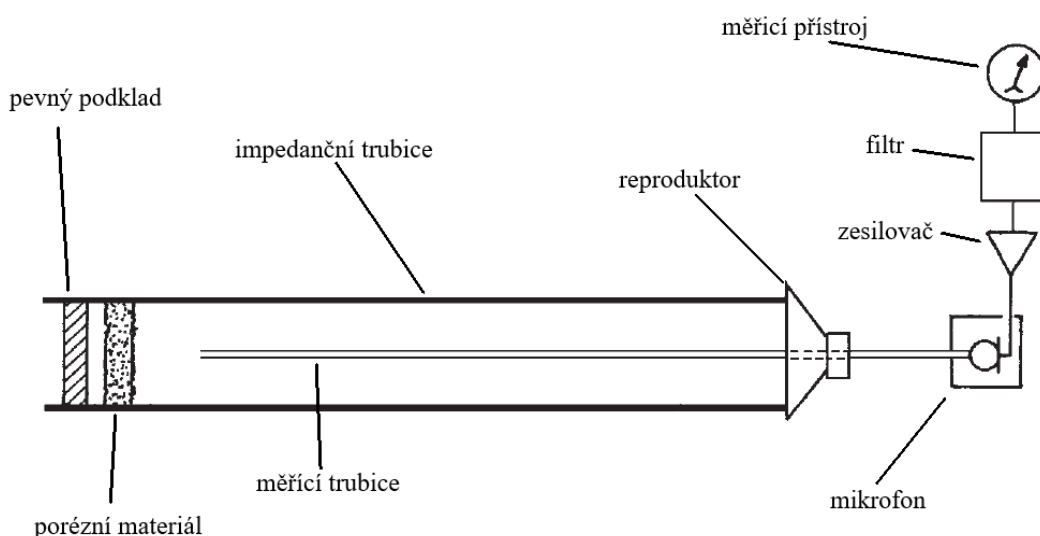


Obr. 3: Ilustrační obrázek vysvětlující absorpci zvukové energie, převzato z [7]

Na rozhraní betonové stěny a vnějšího prostředí dochází opět ke stejným dějům, jako na rozhraní pohltivého materiálu a betonu. Každý materiál má různou hodnotu činitele zvukové pohltivosti. Tato hodnota poté rozhoduje o tom jaké množství zvukové energie bude materiálem absorbováno. Díky tomu definuje dobu dozvuku uzavřeného prostoru, v kterém se materiál nachází. Tento parametr α hraje tedy opět klíčovou roli při řešení akustických úprav v poslechových místnostech [7].

Získávání hodnot činitele zvukové pohltivosti lze provádět například měřením doby dozvuku v dozvukové komoře s následným výpočtem α . Dozvuková komora je uzavřenou místností s definovanými rozměry a vlastnostmi, které je nutné při měřeních dodržovat. Nevýhodou této metody je, že pro určení činitele zvukové pohltivosti je potřeba poměrně velká plocha zkoumaného vzorku (10 - 12 m² v závislosti na velikosti dozvukové komory). Metodou pro měření doby dozvuku je například metoda přerušovaného šumu, která byla použita i v praktické části této práce pro změření doby dozvuku řešené místnosti anebo

metoda impulsové odezvy. Určování α poté vyplývá z normy ČSN EN ISO 354 [15][17]. Dalším způsobem jak lze získat činitele zvukové pohltivosti určitého vzorku nebo materiálu je pomocí měření v impedanční trubici.



Obr. 4: Schéma měřicího systému impedanční trubice, převzato z [7]

Výhodou tohoto měřicího systému je, že lze použít poměrně malé vzorky materiálu (průměr cca 100 mm) a není potřeba dozvukové komory. Tato metoda je vhodná však jen pro porézní materiály. Není vhodná pro některé akustické prvky založené na rezonančním principu. Další nevýhodou tohoto způsobu získávání činitele zvukové pohltivosti je, že se získává jen ze znalosti zvukové vlny, která dopadá kolmo na měřený vzorek a kolmo se také odrazí zpět k mikrofonu. Ve skutečnosti však na akustický prvek dopadají zvukové vlny z mnoha směrů.

1.3 Srozumitelnost

Dalším řešeným parametrem v případě poslechových místností je srozumitelnost řeči. Srozumitelnost je ovlivňována celou řadou faktorů, jako je například doba dozvuku, objem prostoru, vzdálenost od zdroje, nebo například úroveň hluku pozadí. Tento parametr je definován jako procento porozuměných slov vzhledem k celkovému počtu reálně vygenerovaných slov zdrojem zvuku. Vyrůstá s rostoucí intenzitou řeči a na hladině 50-60 dB (práh srozumitelnosti), dosahuje 100% u nepoškozených sluchových orgánů.

Jedním ze způsobů jak lze srozumitelnost hodnotit je například dle ztráty srozumitelnosti souhlásek ZSS (%). Tento parametr lze hodnotit, v případě, že je vyšší odstup signálu od hluku pozadí jak 25 dB.

$$ZSS = \frac{200 \cdot RT_{60} \cdot D \cdot N}{V \cdot Q} \quad (6)$$

ZSS (%) – ztráta srozumitelnosti souhlásek;

RT_{60} (s) – doba dozvuku;

D (m) – vzdálenost mezi zdrojem a místem příjmu;

V (m³) – objem uzavřeného prostoru;

Q (-) – činitel směrovosti zdroje;

N (-) – počet zdrojů;

Čím nižší je hodnota ZSS , tím lepší srozumitelnosti v místnosti dosahujeme. Přibližné hodnoty, pro hodnocení kvality srozumitelnosti jsou uvedeny v Tabulka 1 [1][5].

Tabulka 1: Hodnocení srozumitelnosti dle hodnot ZSS , převzato z [5]

ZSS (%)	Srozumitelnost
0-2	výborná
3-5	dobrá
6-12	vyhovující
12-25	nepříliš dobrá

Dalším způsobem hodnocení srozumitelnosti je pomocí indexu C_{te} (C_{50} – míra zřetelnosti, C_{80} – míra jasnosti). Tento index porovnává energie prvních odrazů s energií odrazů pozdějších. Tato hodnota je vyjádřena v decibelech (dB), přičemž vyšší hodnoty C_{te} signalizují větší srozumitelnost řeči a je tedy ukazatelem toho, jak rychle a čitelně se zvuk šíří v místnosti a jak snadno je posluchači rozumět. Tento parametr lze počítat pro časovou hranici $t_e = 50$ nebo 80 ms v závislosti na charakteru poslouchaného zvuku (řeč nebo hudba).

$$C_{t_e} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (7)$$

C_{te} (dB) – index počáteční zvukové energie vzhledem k pozdní;

t_e (ms) – časová hranice 50 nebo 80 ms;

$p(t)$ (Pa) – okamžitý akustický tlak impulsové odezvy v měřicím bodě;

Zvuk, který jako první dorazí k posluchači, se nazývá přímý zvuk. Tento zvuk je následován prvními odrazy, což jsou zvuky, jež dorazí k posluchači právě do časové hranice 50 (80) ms od okamžiku, kdy byl vyslán přímý zvuk. Tyto první odrazy jsou integrovány do přímého zvuku a pomáhají posluchači lépe porozumět mluvenému slovu. Naopak odrazy,

kteřé dorazí k posluchači později než 50 (80) ms od vyslání přímého zvuku, mohou být vnímány jako rušivé. Tyto pozdější odrazy mohou způsobit zkreslení a zhoršení srozumitelnosti řeči (nebo hudby pro C_{80}). Vzhledem k tomu, že zvuk za normálních podmínek urazí 1 metr za cca 3 ms, pro vznik rušivých odrazů by musel zvuk přicházející díky odrazům urazit zhruba 17 a více metrů. Index C_{te} je tedy vhodným způsobem jak lze srozumitelnost hodnotit spíše ve větších prostorech, kde zvuk musí urazit delší vzdálenost, než dopadne k posluchači, nebo v případě málo tlumených místností, kde bude delší doba dozvuku a bude docházet k mnoha odrazům zvukových vln [17][18].

Posledním zde uvedeným způsobem hodnocení srozumitelnosti řeči je dle indexu přenosu řeči STI . Při ideálním přenosu řeči je hodnota STI rovna 1, což značí stoprocentní porozumění. Klesající hodnoty STI směrem k 0 naznačují zhoršenou srozumitelnost řeči, což může způsobit problémy při vnímání přednesu posluchačem. Faktory, které negativně ovlivňují přenos řeči a snižují hodnotu STI , zahrnují například hluk pozadí, dlouhá doba dozvuku, ozvěna v místnosti anebo hlasitost zdroje zvuku [18][19]. Samotný postup pro získávání indexu STI je popsán v normě ČSN EN IEC 60268-16 ed.3.

Tabulka 2: Hodnocení srozumitelnosti dle indexu STI , převzato z [19]

STI (-)	Srozumitelnost
0 - 0,3	špatná
0,3 - 0,45	vyhovující
0,45 - 0,6	průměrná
0,6 - 0,75	dobrá
0,75+	excelentní

V dnešní době se lze nejčastěji setkat s časově méně náročnou náhradou STI , tedy indexem $STIPA$. Jeho měření spočívá v záznamu modulovaného růžového šumu, který má podobný charakter jako lidská řeč. V poslechových místech je zaznamenán jednočíselný ukazatel srozumitelnosti, pro který platí stejná stupnice hodnocení jako pro STI . Důležité je mít však na paměti, že srozumitelnost je často ovlivňována jak samotným projevem přednášejícího, aktuálním zdravotním a psychickým stavem posluchače a znalostí přednášeného tématu [17][19][35].

1.4 Kritická vzdálenost

Charakter akustického pole v okolí zdroje zvuku se mění se vzdáleností od něj. V blízkosti zdroje se formuje pole přímých vln, které má charakter vyzařování zdroje do volného pole, i když je zdroj umístěn v uzavřeném prostoru. Tato blízká oblast je charakterizována převážně přímým zvukovým signálem, který se šíří od zdroje k posluchači bez významného ovlivnění odraženými vlnami od okolních překážek.

Od určité vzdálenosti od zdroje však začíná převládat pole odražených vln. V této oblasti je průměrná hladina akustického tlaku téměř nezávislá na vzdálenosti od zdroje. To znamená, že při dalším odstupu od generujícího zdroje zůstává hladina akustického tlaku téměř konstantní.

Hranice mezi oběma těmito poli se nazývá kritická vzdálenost r_k (m). Tato vzdálenost je specifickým bodem, kde přecházíme od oblasti s charakterem přímých vln k oblasti kde dominují vlny odražené. Po překročení této kritické vzdálenosti se zvyšuje vliv odražených zvukových signálů na celkový charakter akustického pole v okolí zdroje zvuku [1][5].

$$r_k = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{RT_{60}}} \quad (8)$$

r_k (m) – kritická vzdálenost;

Q (-) – činitel směrovosti zdroje zvuku;

V (m³) – objem prostoru;

RT_{60} (s) – doba dozvuku;

Směrové vlastnosti zdroje zvuku mohou ovlivnit charakter akustického pole v okolí zdroje. Proto se ve vztahu (8) vyskytuje činitel směrovosti zdroje zvuku Q , který slouží k popisu těchto vlastností jednoduše jedním číslem. Vyjadřuje poměr mezi intenzitou zvuku, kterou daný zdroj vyvolává v určité vzdálenosti, a intenzitou, kterou by stejný zdroj s kulovou (všesměrovou) charakteristikou vyvolal v téže vzdálenosti. Hodnota Q závisí na frekvenci vyzařovaného zvuku, rozměrech zdroje a jeho umístění v prostoru. Proto například mluvící osoba uprostřed místnosti bude mít $Q=2,5$ a reproduktory hrající nízké kmitočty $Q=3,5$ [5].

2 Akustické pole uzavřených prostorů

Kvalita poslechu hudby nebo jiných rozložených akustických signálů, bude v uzavřených prostorech velmi záviset na samotném prostoru, jeho úpravách, tvaru a dalších ovlivňujících činitelích. Z hlediska místností určených pro kvalitní poslech hudby je situace výrazně složitější než je tomu v prostorech, kde nám hlavně záleží na srozumitelnosti mluveného slova. Subjektivní vnímání poslouchané hudby v daném místě určuje celá řada faktorů, které lze rozdělit na fyzikální a subjektivně percepční [1][4]. Jelikož se jedná o uzavřené prostory, nelze šíření zvuku popsat tak jednoduše, jako tomu je v případě volného akustického pole. Musíme brát v úvahu trojrozměrný prostor, kde se zvukové vlny o určitých frekvencích odráží, jiné absorbují stěnami a jinými pohltivými materiály a vzájemně interagují [11].

2.1 Vlastní kmitý prostoru

Jedním z problémů, které mohou ovlivňovat kvalitu poslechu je vznik stojatého vlnění. Tento problém totiž zapříčiní narušení difuzity a rovnoměrnosti akustického pole. Typickým uzavřeným prostorem, kde je poslech často realizován, je dutý kvádrový prostor. Právě v těchto typech místností vzniká stojaté vlnění téměř vždy, nicméně může vzniknout i v uzavřeném prostoru složitějších tvarů. Při nižších frekvencích je počet vlastních kmitů malého prostoru poměrně malý. Od kritického kmitočtu f_k výše je spektrum již vlastními kmity hojně zastoupené a akustické pole lze považovat za difuzní.

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} \quad (9)$$

f_k (Hz) – kritický kmitočet;

V (m³) – objem prostoru;

RT_{60} (s) – doba dozvuku;

Z toho plyne, že problém stojatého vlnění (vlastních kmitů prostoru) nastává jen v oblasti nízkých frekvencí, kde je difuzita opravdu narušena. Cílem při akustických úpravách prostoru je tedy zajistit co nejrovnoměrnější rozložení akustického pole od co nejnižších frekvencí [5]. V oblasti nízkých frekvencí nelze použít geometrickou a statistickou akustiku. Akustické pole je poté nutné popsat metodami vlnové akustiky. Popis vlnění v uzavřeném prostoru s ideálně odrazivými stěnami lze realizovat pomocí vlnové rovnice (10) [1].

$$f = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{c}\right)^2} \quad (10)$$

c_0 (m/s) - rychlost šíření zvuku v daném médiu

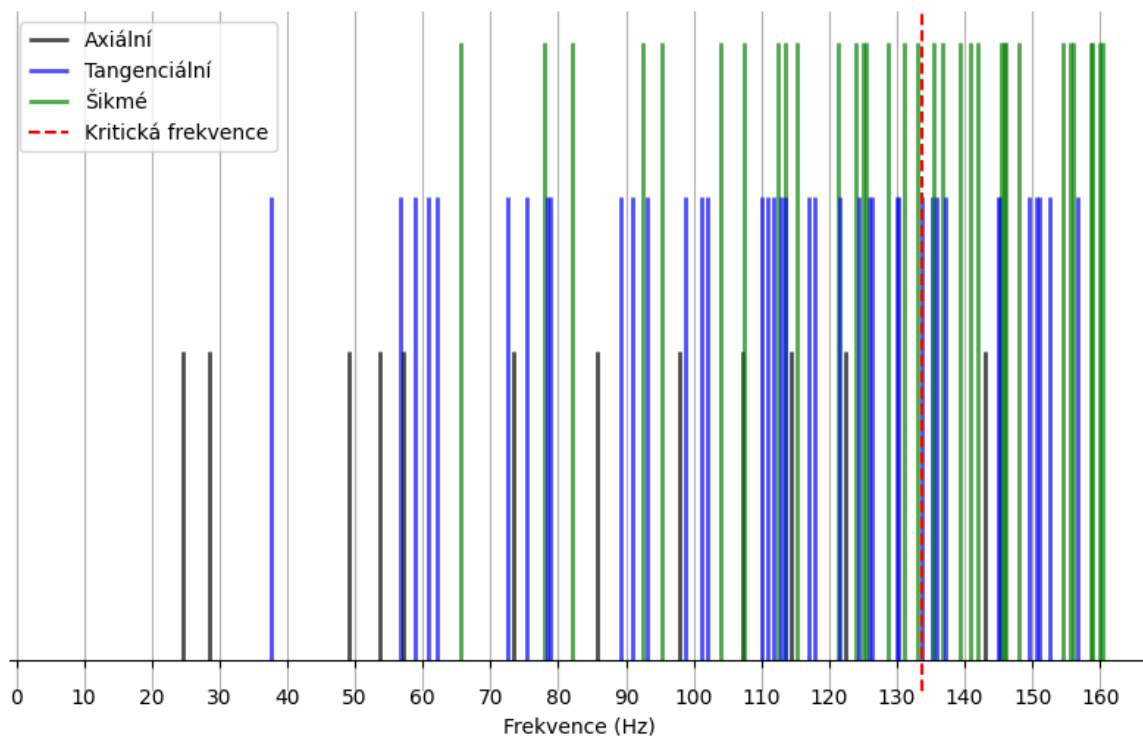
n_x, n_y, n_z (-) - módy vlastních kmitů v daném směru

a, b, c (m) – rozměry dutého kvádrového prostoru

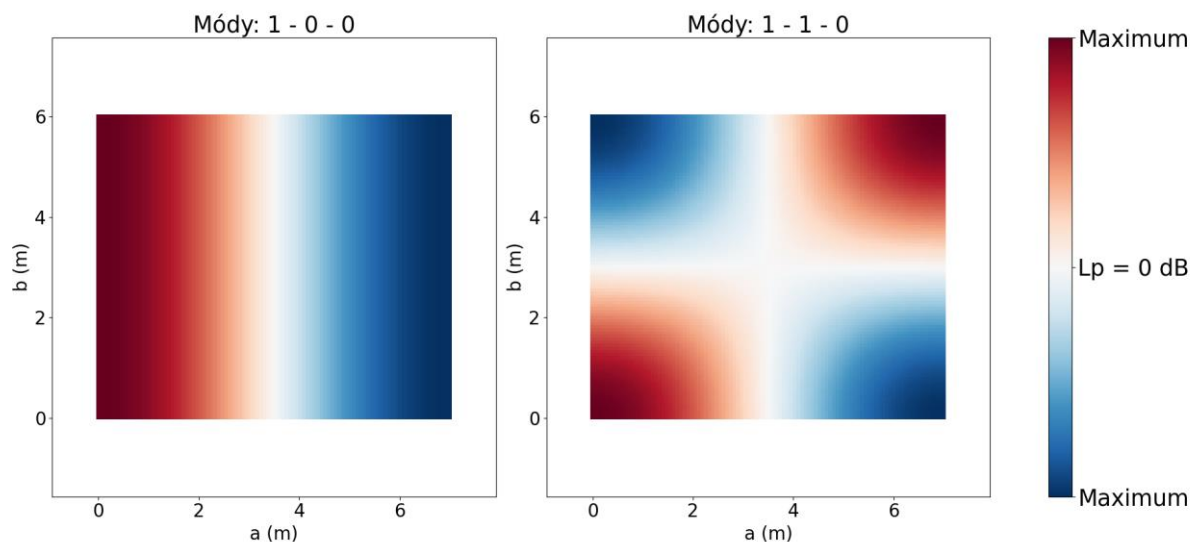
Vlnová rovnice je jeden ze základních vztahů vlnové teorie akustického pole v uzavřených prostorech, ze kterého plyne, že frekvenční spektrum vlastních kmitů uzavřených pravoúhlých prostorů je diskrétní [1]. Vlnová akustika tedy vychází z řešení vlnové rovnice (10) a příslušných okrajových podmínek. Okrajové podmínky jsou zaváděny pro jednotlivé hraniční plochy prostoru a charakterizují jejich vlastnosti. Okrajové podmínky jsou dány nulovou normálovou složkou rychlosti šíření zvuku. Řešení vlnové rovnice v daném prostoru si lze ulehčit využitím numerických postupů, jako je metoda konečných prvků (FEM) nebo metoda hraničních prvků (BEM). Touto problematikou se práce dále zabývá v kapitole 5 [9].

Při výpočtu vlnové rovnice mohou jednotlivé módy vlastních kmitů nabývat hodnot celých čísel počínaje 0. V případě, že jsou hodnoty $n_x, n_y, n_z \geq 1$, pak je směr šíření vln vzhledem k souřadnému systému a stěnám obecný a vlny tedy nazýváme **šikmé**. Je-li jedna z hodnot $n_x, n_y, n_z = 0$, vlny jsou tzv. **tangenciální** a jejich šíření je možné jen v rovinách zbývajících "nenulového" souřadného systému. V případě že jsou dvě hodnoty indexů $n_x, n_y, n_z = 0$, šíření vlny je možné jen ve zbývajícím nenulovém směru. Takový mód se poté nazývá **axiální**.

Teoretické vyobrazení spektra vlastních kmitů prostoru, kde rozměry místnosti jsou $a=6$ (m), $b=7$ (m) a $c=3,2$ (m) lze vidět na Obr. 5. Rozložení akustického tlaku v této místnosti poté zjednodušeně vyobrazuje graf na Obr. 6, kde lze v levé části pozorovat situaci, kdy je mód $n_x=1$ a další složky jsou nulové a v pravé části, když je n_x a $n_y=1$ a $n_z=0$. Z tohoto vyobrazení je patrný rozdíl mezi axiálním a tangenciálním vlněním.



Obr. 5: Teoretické spektrum vlastních kmitů v uzavřeném kvádrovém prostoru



Obr. 6: Zobrazení rozložení akustického tlaku v místnosti

Z vyobrazení na Obr. 5 je vidět, že s rostoucí frekvencí roste i hustota vlastních kmitů. Akustické pole je v oblasti frekvencí pod kritickým kmitočtem značně nerovnoměrně rozložené a pro dobrý přenos zvuku od zdroje k posluchači je potřeba dostatečný počet vlastních frekvencí [1][9].

$$N(f) = \frac{4\pi V f^4}{3c_0^3} + \frac{\pi S f^2}{4c_0^2} + \frac{L f}{8c_0} \quad (11)$$

c_0 (m/s) - rychlost šíření zvuku v daném médiu;

V (m³) – objem místnosti;

S (m²) – plocha stěn místnosti;

f (Hz) – frekvence do které počet módů počítáme;

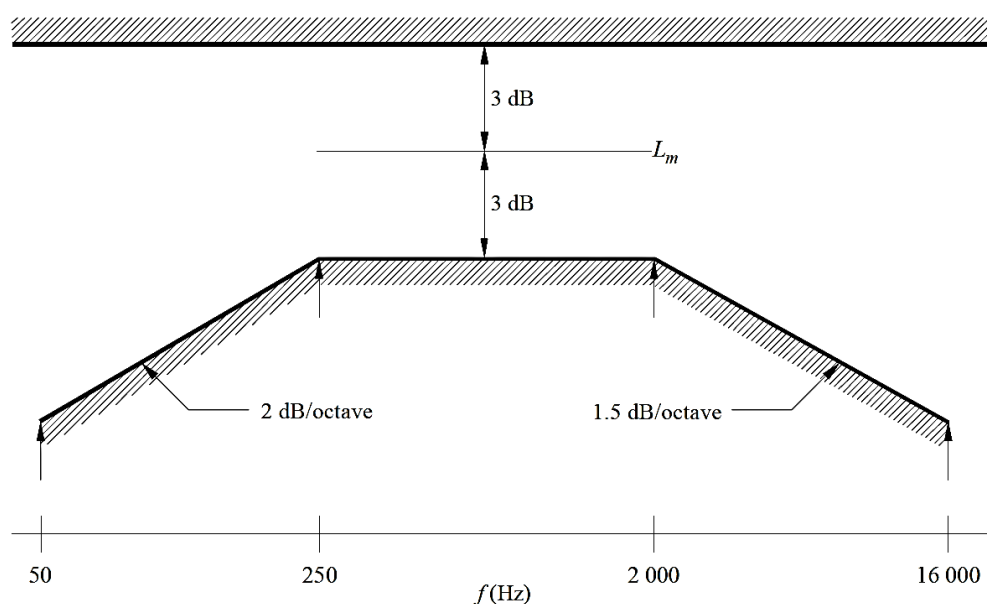
$L = 4(a + b + c)$ (m) – součet všech délek hran pravoúhlého prostoru;

Z výpočtu (11) lze poté zjistit celkový počet vlastních kmitů $N(f)$ ve zvoleném kmitočtovém intervalu $(0, f)$. První člen rovnice určuje počet šikmých módů, druhý člen poté celkový počet tangenciálních módů a poslední člen počet axiálních módů ve zvoleném kmitočtovém intervalu [1][9]. Získání dobré modální odezvy prostoru úzce souvisí s vhodnou volbou jeho rozměrů. Oscar Bonello stanovil metodu pro určení vhodných rozměrů místnosti. Rozdělil dolní konec slyšitelného spektra do třetinooktávních pásem a řešil kolik vlastních módů každé toto pásmo pod 200 Hz má správně mít. Bonellovo kritérium říká, že by každé třetinooktávné pásmo mělo mít více vlastních kmitů než předchozí (nebo alespoň stejný počet). I když je tato podmínka splněna, nelze zaručit ideální poslechové podmínky a je nutné ke každé místnosti přistupovat individuálně [7].

2.2 Frekvenční amplitudová charakteristika audiosystému

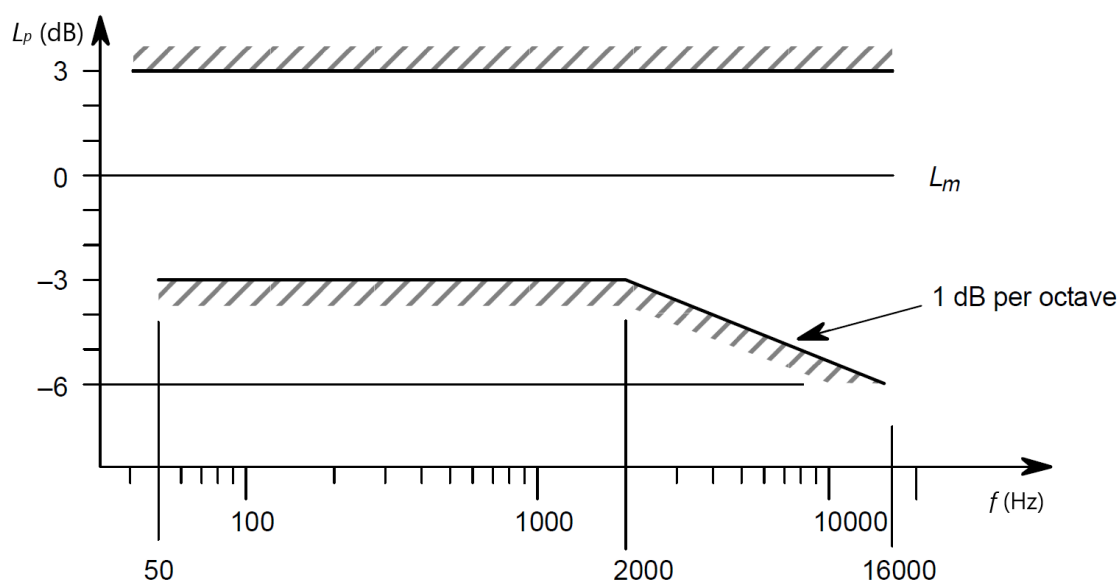
Frekvenční amplitudová charakteristika audiosystému měřená v místě poslechu by měla být vždy co nejvyrovnanější, pokud možno v celém frekvenčním rozsahu. Tím se zajistí, že audiosystém v poslechové místnosti bude věrohodně reprodukovat nahrávky. V praxi je však získání dokonale ploché charakteristiky téměř nereálné (kromě laboratorních podmínek). I v případě ploché frekvenční charakteristiky je důležité, aby obsluha studia měla požadované zkušenosti, aby při produkci hudby, nebo různých úpravách bylo dosaženo co nejlepších výsledků. Plochá frekvenční charakteristika je však dobrý výchozí bod, který lze svou důležitostí přirovnat k dobře naladěnému nástroji hudebníka. Nerovnosti na charakteristice vzniknou téměř vždy a například pouhé vložení studiového stolu s potřebnou elektronikou může způsobit velké změny rozložení akustického tlaku v místnosti a tím i nerovnosti frekvenční amplitudové charakteristiky audiosystému. Z toho plyne, že nejen daný prostor, ale i další nutné vybavení má vliv na vnímaný projev reproduktorů. Nelze tedy očekávat stejnou charakteristiku, jakou audiosystém měl při měření v laboratorních podmínkách (charakteristika v datasheetu udávaná výrobcem je nejčastěji měřena ve volném

akustickém poli) [32]. Dle doporučení ITU-R BS.1116-3 by se výsledná frekvenční amplitudová charakteristika audiosystému měla pohybovat ve stanovených mezích vůči definované referenční hladině akustického tlaku L_m viz Obr. 7.



Obr. 7: Meze pro frekv. amplitudovou charakteristiku audiosystému, převzato z [33]

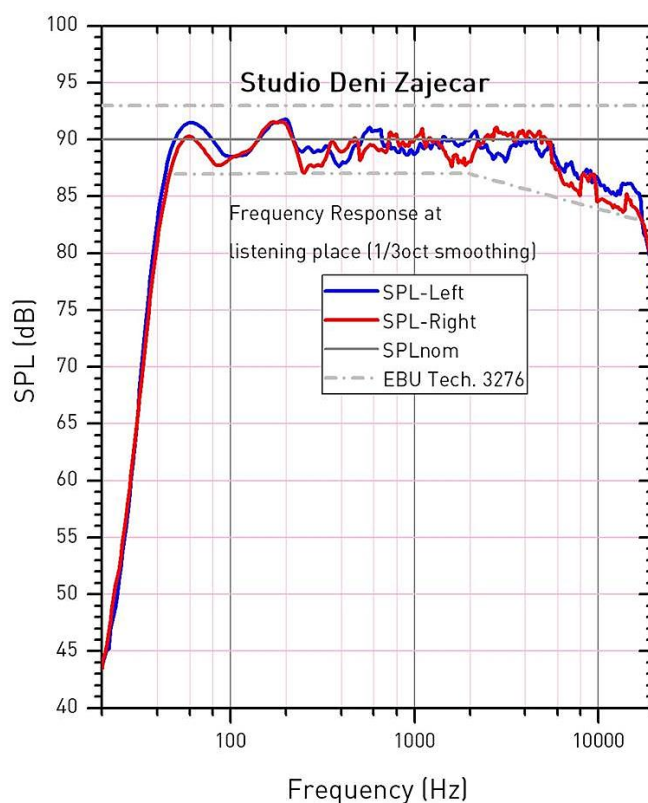
Toto toleranční pásmo by frekvenční amplitudová charakteristika měla splňovat hlavně v poslechovém místě. Dosáhnout toho lze v laboratorních podmínkách nebo v referenčních poslechových místnostech. Ještě přísnější toleranční meze udává specifikace EBU Tech. 3276 – 2nd edition [25][33].



Obr. 8: Meze pro frekv. amplitudovou charakteristiku audiosystému, převzato z [25]

Příkladem poslechové místnosti s vysokou kvalitou poslechu je studio Deni Zajecar, na kterém pracoval akustik Bogić Petrović. Díky jeho designu MyRoom dosáhl poměrně hladké frekvenční amplitudové charakteristiky, která podléhá i specifikaci [25] viz Obr. 9. Je zde však vidět, že i když se tomuto tématu věnují skuteční odborníci, nedostanou dokonale hladkou charakteristiku. Je zde například vidět poměrně velký pokles a následný nárůst hladiny akustického tlaku v oblasti 100 až 180 Hz, což je zapříčiněno vzniklým stojatým vlněním mezi podlahou a stropem v poslechovém místě.

Důležité je v první řadě veškeré odchylky od vyrovnané frekvenční charakteristiky řešit pomocí umístění reprosoustavy, poslechového místa a akustických úprav. Elektrickou korekci (ekvalizaci) lze použít, pokud linearity frekvenční amplitudové charakteristiky audiosystému nelze dosáhnout výše zmíněnými možnostmi. Korekci lze provést pomocí filtrů často integrovaných přímo reproduktorů nebo pomocí externích ekvalizérů. Aby nedošlo ke zhoršení kvality reprodukce, měla by se ekvalizace používat velmi citlivě. Korekce pomocí ekvalizéru je doporučeno provádět pouze v oblasti nízkých frekvencí, tedy $f < 300$ Hz. Při nevhodném použití filtrů může dojít k vyrovnaní frekvenční charakteristiky, ale současně k značnému porušení linearity ve fázové oblasti [25][32].



Obr. 9: Frekvenční amplitudová charakteristika audiosystému Deni Zajecar (závislost hladiny akustického tlaku SPL (dB) na frekvenci f (Hz), převzato z [32])

3 Akustické obklady poslechových místností

Hlavním cílem prostorové akustiky je zajištění optimálních akustických vlastností daného prostoru. Určení zda je akustická kvalita prostoru dobrá nebo naopak, je velmi subjektivní. Závisí na účelu, pro který je prostor určen, a také na osobách, které se v něm pohybují. Jelikož je akustická kvalita subjektivním pojmem, je nejlepší ji posuzovat prostřednictvím subjektivního testování. Z technického hlediska je snaha nalézt objektivní míry, které korespondují s jednotlivými subjektivními parametry, a následně dosáhnout doporučených nebo požadovaných hodnot pomocí vhodných akustických úprav. U běžných uzavřených prostorů se požaduje minimálně dosažení odpovídající doby dozvuku a dostatečná zvukové izolace od okolních prostor. V případě poslechových místností je důležité sledovat i další parametry. Z hlediska akustických úprav prostoru lze tedy ovlivňovat dobu dozvuku (RT_{60}) a související parametry, jako je například jasnost (míra jasnosti - C_{80}). Dále pak prostorovost (souvisí s difuzitou prostoru), vnímanou hlasitost poslouchané hudby, nebo srozumitelnost či hluk pozadí [9].

Pro akustické úpravy se používá celá řada materiálů a konstrukcí. Využívány jsou k absorpci a rozptylu zvuku, což pomáhá upravit dobu dozvuku, zlepšit srozumitelnost nebo snížit hluk v uzavřených prostorech. Volba správného materiálu se řídí nejen akustickými potřebami, ale také designem, hygienickými a požárními hledisky. Vlastnosti absorpčních materiálů jsou vyjádřeny pomocí již zmíněného činitele zvukové pohltivosti α . Pro kolmý dopad se označuje jako α a pohybuje se v rozmezí od 0 do 1. Pro všesměrový dopad se používá označení α_s a měří se v dozvukové komoře. Vliv okrajových jevů na vzorku materiálu může vést k tomu, že ekvivalentní plocha absorpce zvuku je větší než fyzická plocha vzorku a absorpční koeficient α může překročit hodnotu 1. U rozptylových prvků poté řešíme namísto činitele zvukové pohltivosti primárně rozptyl nebo-li difuzitu [5].

3.1 Pohltivé prvky pro střední a vysoké kmitočty

Pohltivé prvky pro střední a vyšší kmitočty jsou primárně ty s porézní strukturou. Jsou to tedy materiály, jejichž pevná část (skelet) tvoří jen 1-20% celkového objemu materiálu, zbytek je tvořen vzduchovými dutinkami [2]. Při nárazu zvukové vlny na porézní materiál, část zvuk proniká do mezer porézního materiálu a ztrácí energii. Absorbování zvukové energie porézními materiály spočívá v její přeměně obvykle na tepelnou energii, kdy tato přeměna není reverzibilní.

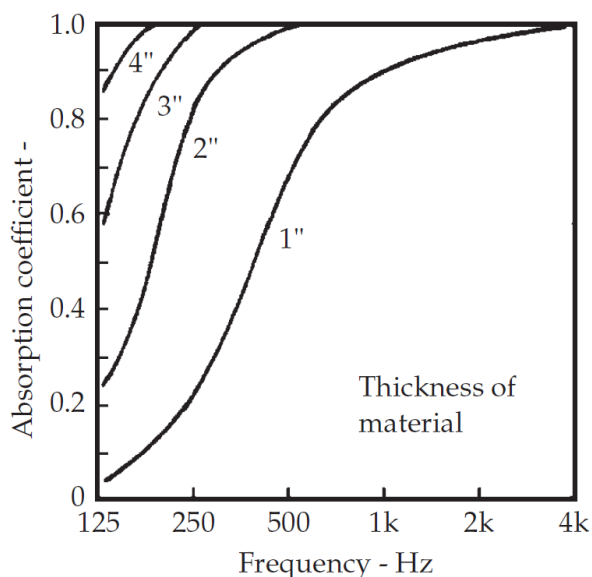
Dobrou účinnost pohlcení zvuku ($\alpha_s > 0,6$) lze však očekávat až od určité frekvence f_m . Již ze vzorce (12) je patrné, že pro účinné pohlcení zvuku o velkých vlnových délkách (nízkých frekvencích), by bylo potřeba velmi tlustého porézního materiálu [5].

$$f_m = \frac{c_0}{10 \cdot h} \quad (12)$$

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

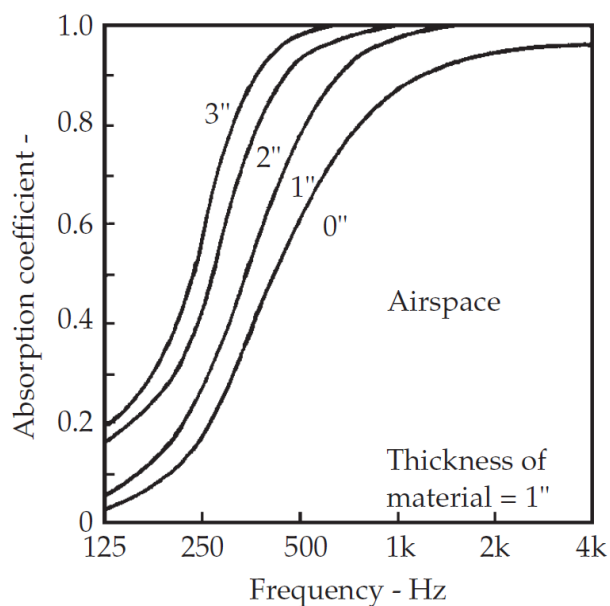
h (m) – tloušťka vrstvy porézního materiálu;

Čím tlustší vrstva porézního pohltivého materiálu, tím více materiál bude pohlcovat i nižší frekvence. Absorpce je největší, když je porézní materiál umístěn ve vzdálenosti $\lambda/4$ (nebo sudých celočíselných násobcích) od odrazivé podkladové stěny (na stěně je uzel - 0 amplitudy akustické rychlosti). Ve vzdálenosti $\lambda/4$ je totiž amplituda akustické rychlosti největší [7][9].



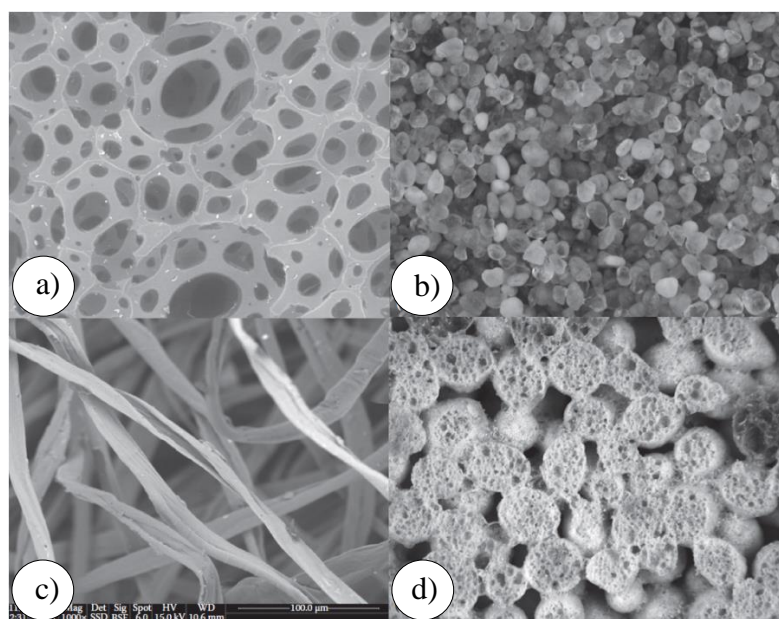
Obr. 10: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci s měnící se tloušťkou porézního pohltivého materiálu ze skelných vláken (1"= 2,54 cm, 4"= 10,16 cm), převzato z [7]

Dalším ovlivňujícím faktorem je odsazení akustického panelu od stěny místnosti, čímž lze ušetřit potřebný materiál. Navíc i účinnost na nízkých frekvencích je vyšší. Z vyobrazení na Obr. 11 je patrné, že při použití 2,54 cm tlustého panelu ze skelných vláken můžeme pomocí 7,62 cm odsazení od podkladové stěny dosáhnout téměř stejných výsledků, jako kdybychom použili tentýž panel o tloušťce 5,08 cm připevněný přímo na stěnu [7].



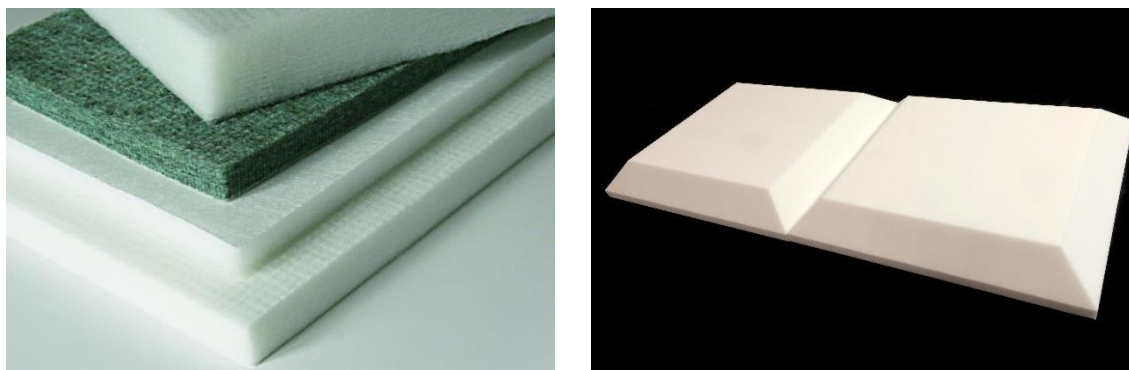
Obr. 11: Vliv odsazení akustického panelu ze skelných vláken (tloušťka 1"=2,54 cm) od podkladové stěny na činitele zvukové pohltivosti (0"=žádné odsazení, 3"= odsazení 7,62 cm od stěny), převzato z [7]

Porézními pohltivými prvky jsou nejčastěji panely z vláknitých materiálů, jako jsou skelná či minerální vlákna, ale i recyklovaná PET vlákna nebo různé textilie (viz Obr. 12 - c). Dále pak pěnové materiály jako je polyuretanová, polyesterová či melaminová pěna (viz Obr. 12 - a). Zrnité absorbéry poté mohou být tvořeny například spěkanými zrnky písku (viz Obr. 12 - b). V neposlední řadě lze použít i materiály s dvojitou pórovitostí, jako je například aktivní uhlí (viz Obr. 12 - d) [5][3].



Obr. 12: Obrázek porézních materiálů pořízený pomocí SEM, převzato z [3]

V dnešní době se lze na trhu setkat s celou řadou akustických prvků o různých rozměrech a tvarech. To, jaké porézní pohltivé materiály budou pro akustické úpravy použity, je často otázka designu prostoru, finančních prostředků, ale také hygienických a bezpečnostních požadavků (např. nehořlavost). Reálnou ukázkou běžně používaných porézních akustických obkladů jsou například netkané materiály Fibertex na bázi čistých vláken nebo recyklovaných materiálů (na Obr. 13 vlevo) anebo akustické panely z melaminové pěny (na Obr. 13 vpravo).



Obr. 13: Ukázka porézních akustických pohltivých materiálů, převzato z [20][21]

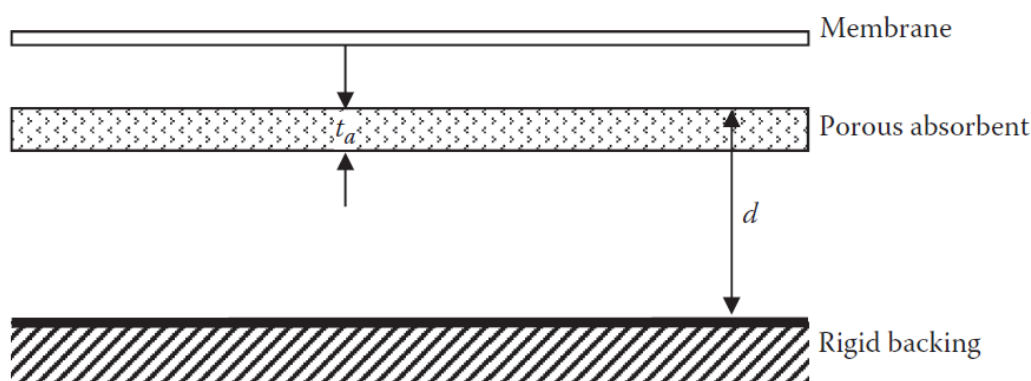
3.2 Pohltivé prvky pro nízké kmitočty

V případě pohltivých prvků pro nízké kmitočty se lze nejčastěji setkat s akustickými obklady na rezonančním principu. Když dopadají zvukové vlny na tento typ obkladu, dochází ke kmitání některé z jeho částí. Zvuková pohltivost je nejvyšší právě při kmitání systému na rezonanční frekvenci, kdy je amplituda kmitů maximální. Na rezonančním kmitočtu může dosahovat čísel zvukové pohltivosti až hodnoty 1, pro okolní frekvence zpravidla strmě klesá. Obecně lze akustické rezonátory popsat ekvivalentním zjednodušeným mechanickým modelem popsaným kmitající hmotností na pružině o dané tuhosti a s příslušným tlumením. V akustice pak hmotnost nahrazujeme akustickou hmotností, tuhost pružiny akustickou poddajností a tlumení akustickým odporem. Když přestanou zvukové vlny dopadat na rezonátor, dochází ještě po nějakou dobu k tzv. doznívání. Doznívání souvisí právě s tlumením rezonátoru, takže s jeho akustickým odporem. Tlumení rezonátoru musí být dostatečné, v opačném případě totiž nebude docházet k efektivnímu pohlcování zvuku [3].

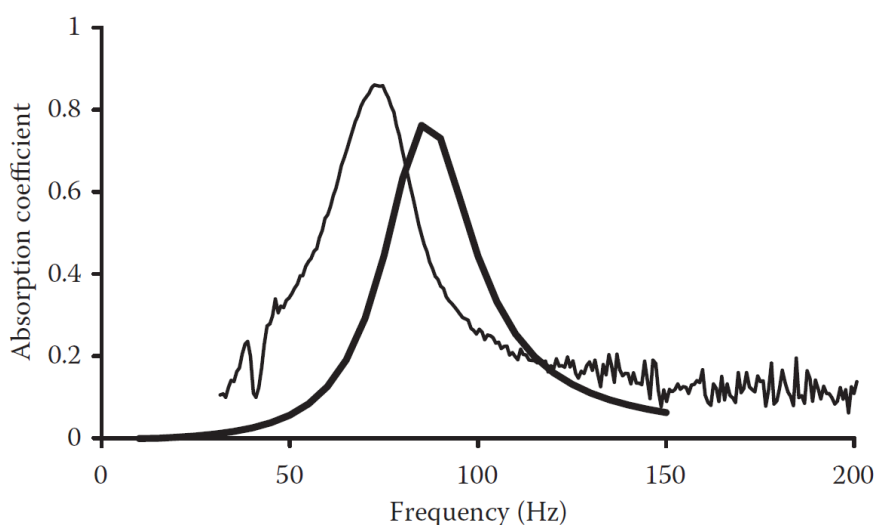
3.2.1 Kmitající panely a membrány

V případě kmitajících membrán je řeč o velmi tenkých fóliích nebo deskách, které jsou připevněné na nosném kazetování a membrána kmitá vlastními ohybovými kmity. Za membránou (0,5-1 cm) je často umístěn ještě porézní pohltivý materiál. Porézní materiál zde

slouží ke zvýšení tlumení kmitání částic vzduchu ve vzduchové dutině mezi membránou a zadní stěnou rámu. Klíčový je výpočet základní rezonanční frekvence f_r , který je dán rychlostí zvuku v daném prostředí, hustotou vzduchu, plochou a hmotností membrány a tloušťkou vzduchové dutiny za membránou. U membrán se při kmitání kromě základní frekvence mohou objevit i vyšší rezonance dané vlastní poddajností a rozměry fólie. Vzhledem k tomu, že nejčastěji akustické úpravy řešíme v prostorech s běžnými podmínkami, kde se je rychlost zvuku zhruba 343 m/s a hustota vzduchu 1,2 kg/m³, lze zjednodušit rovnici pro výpočet rezonančního kmitočtu, jak je uvedeno v rovnici (13) [2][4][5]. Konstrukční uspořádání akustického rezonátoru s kmitající membránou lze vidět na Obr. 14. Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro rohový akustický rezonátor s kmitající membránou ModexTM lze vidět na Obr. 15.



Obr. 14: Ilustrační obrázek kmitající membrány, převzato z [3]



Obr. 15: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci kmitající membrány ModexTM (tlustou čarou – teoretický průběh, tenkou čarou naměřený průběh), převzato z [3]

Kmitající membrány nelze použít pro potřeby pohlcení zvuku na ještě nižších kmitočtech. Hmotnost membrány je totiž nedostatečná. Z tohoto důvodu se používají kmitající desky nebo panely. Tyto desky mají výrazně vyšší tuhost než je tuhost vzduchové dutiny za deskou a jsou pružně uchyceny po svém obvodu. Pružné uložení kmitajících panelů do kazetování je nejčastěji řešeno uložení do měkké gumy. Nevýhodou je například stárnutí použitých materiálů, čímž se mění parametry rezonátoru, ale i úzký rozsah ladících frekvencí [2][9].

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S \cdot \rho}{m \cdot d}} \approx \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (13)$$

c_0 (m/s) – rychlost šíření zvuku;

S (m²) – plocha membrány;

ρ (kg/m³) – hustota vzduchu;

m (kg) – hmotnost membrány;

d (m) – tloušťka vzduchové kapsy za membránou;

3.2.2 Helmholtzovy rezonátory

Jedná se o další typ akustických pohltivých prvků vhodných pro nízké kmitočty. Helmholtzovy rezonátory lze používat ve formě samostatných rezonátorů nebo děrovaných desek. Jedná se o nejčastěji volenou variantu akustických úprav pro snížení doby dozvuku na nízkých kmitočtech. Jedno z nejčastějších řešení je však použití děrované desky s kruhovými nebo čtvercovými otvory, s uzavřeným rámem. Vzduchová kapsa je opět tlumena porézním pohltivým materiálem, ve kterém dochází k přeměně zvukové energie na teplo [4][5]. Absorpce zvuku je maximální při rezonanční frekvenci a klesá při okolních frekvencích [7]. Pro výpočet základní rezonanční frekvence lze poté použít vztah (14).

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{V \cdot (l + 2\Delta l)}} \quad (14)$$

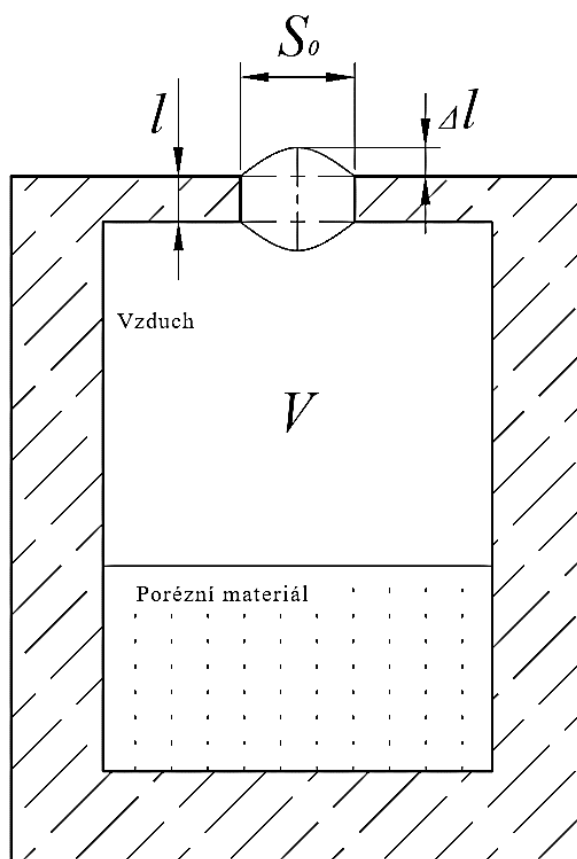
c_0 (m/s) – rychlost šíření zvuku;

S_0 (m²) – plocha jednoho otvoru rezonátoru;

V (m³) – objem dutiny rezonátoru;

l (m) – délka hrdla rezonátoru (tloušťka desky);

$2\Delta l$ (m) – koncová korekce, počítající s kmitáním vzduchu v těsné blízkosti za a před hrdlem;



Obr. 16: Konstrukční uspořádání Helmholtzova rezonátoru s jedním otvorem

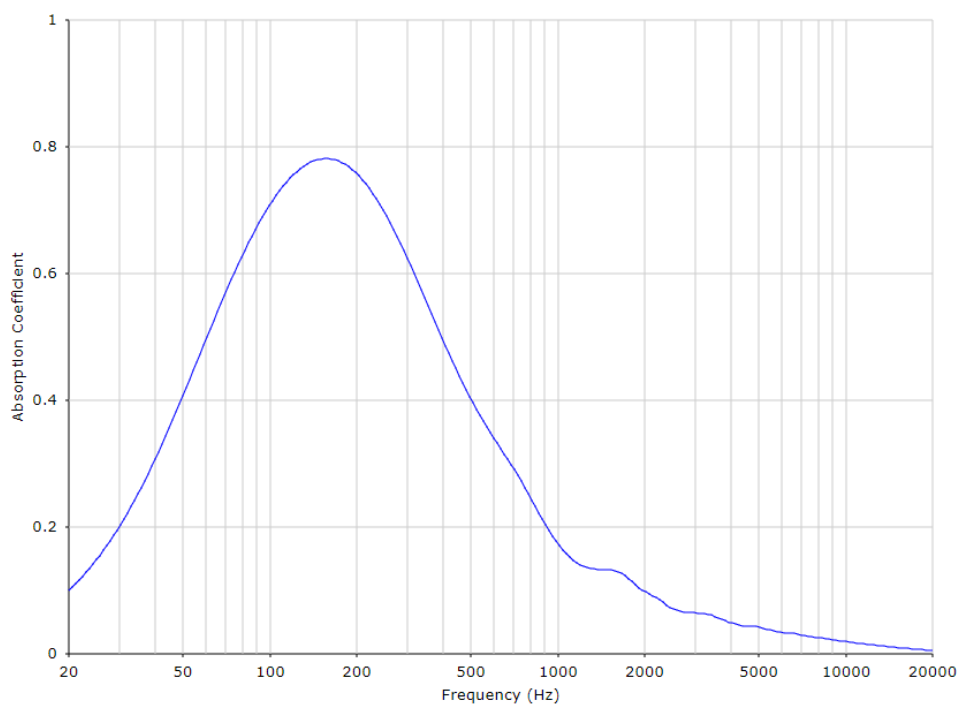


Obr. 17: Helmholtzův rezonátor s děrovanou sádkartonovou deskou, převzato z [38]

Významnou část použitých Helmholtzových rezonátorů tvoří i laťové rezonátory, které jsou často používané v poslechových a nahrávacích studiích (viz Obr. 18) [4]. Typická závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci pro tento typ rezonátoru je uveden na Obr. 19.



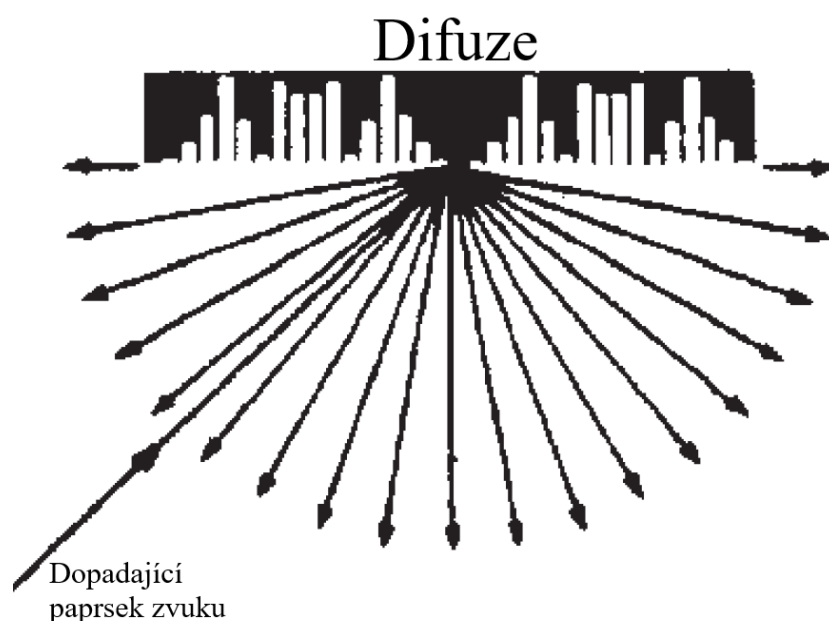
Obr. 18: Poslechové studio se stropním laťovým rezonátorem, převzato z [39]



Obr. 19: Teoretická závislost laťového rezonátoru, vyhotoveno pomocí [36]

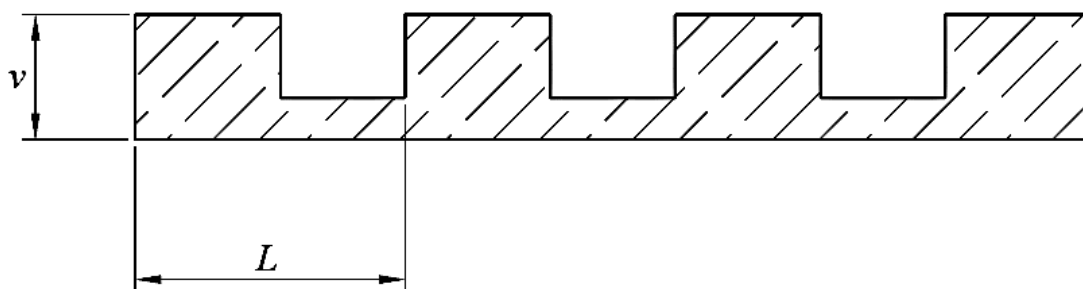
3.3 Rozptylové prvky

Poslední variantou jak řešit akustické úpravy poslechových místností je použití rozptylových akustických prvků tzv. difuzorů. Správné použití difuzorů může mít velmi pozitivní dopad na celkový dojem z poslechu, především však z jeho prostorovosti. U pohltivých akustických prvků docházelo hlavně k pohlcení dopadajícího zvuku. V případě difuzorů se využívá rozprostření zvukové energie přímého dopadajícího paprsku do mnoha odrazů, čímž se celková zvuková energie odražených vln rozptýlí do celého poloprostoru [7].



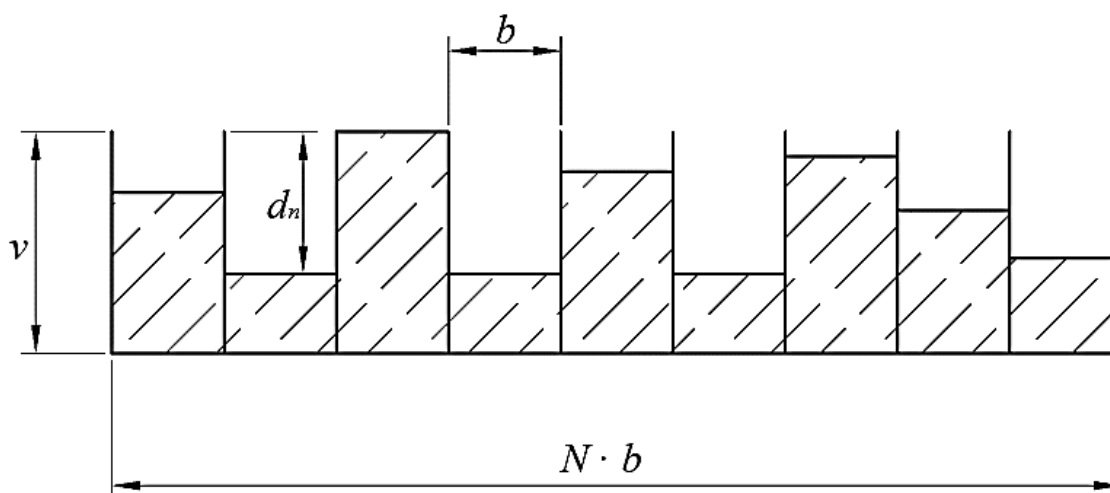
Obr. 20: Rozptyl přímého dopadajícího zvukového paprsku, převzato z [7]

Difuzory jsou akustické panely o různých tvarech. Nejčastěji se jedná o pole jehlanů, kvádrů nebo lomených či vypouklých ploch. Nejdůležitější jsou však dílčí rozměry jednotlivých segmentů ve vztahu k dopadajícím zvukovým vlnám. K rozptylu totiž dochází v případě, že je výška reliéfu odpovídající nebo větší než délka dopadající zvukové vlny. Ideální rozptylový prvek by pak odrazil (rozptyloval) zvuk do všech směrů v celém kmitočtovém rozsahu. U reálných difuzorů lze tyto parametry upravovat pomocí vhodné volby rozměrů prvků tvořících panel, jejich prostřídáním nebo periodickým uspořádáním [5].



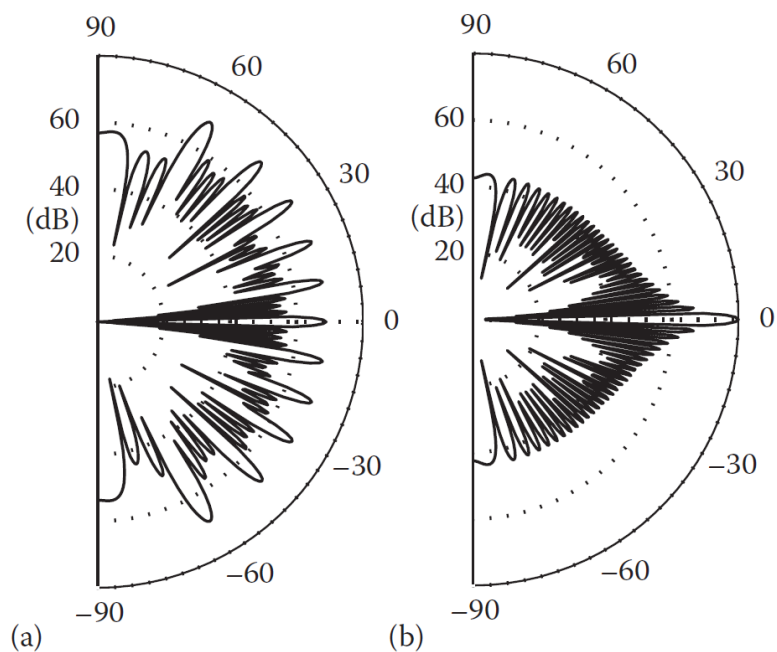
Obr. 21: Difuzor s periodickým uspořádáním, přepracováno z [5]

Když dopadají zvukové vlny na difuzor s periodickým uspořádáním, dochází k rozptylu. Nevýhodou tohoto difuzoru je, že k rozptylu bude docházet jen pro poměrně úzké spektrum kmitočtů. Příkladem difuzoru s periodickým uspořádáním může být konstrukce vyobrazená na Obr. 21. Účinnost takového uspořádání je závislá na rozměrech difuzoru a vlnové délce dopadajících zvukových vln. Přijatelných výsledků dosahuje při vlnových délkách srovnatelných s rozměrem L .



Obr. 22: RPG difuzor (odrazová fázová mřížka), přepracováno z [5]

Další možností konstrukce difuzorů je odrazová fázová mřížka (RPG difuzní panel). Jedná se o pole stejně širokých, ale různě hlubokých šachet, kdy tyto šachty jsou odděleny tenkými přepážkami mezi nimi. Při dopadu zvuku na panel dochází k odražení zvukových vln v každé šachtě zvlášť, protože jsou odděleny tenkými přepážkami. Jelikož mají jednotlivé šachty různě hluboké dno, odražené vlny mají na výstupu z panelu různé fáze. Zde dochází k difrakčním jevům a k následnému rovnoměrnému šíření odražených vln ve zvoleném kmitočtovém pásmu do celého poloprostoru před panelem. Směrové vlastnosti difuzoru RPG v porovnání s hladkou odrazivou plochou o stejných rozměrech lze vidět na vyzářovacích diagramech Obr. 23 [5].



Obr. 23: Vyzařovací diagramy a) RPG, b) hladká odrazivá plocha, převzato z [3]

V praxi se lze opět setkat s celou řadou dalších provedení. Ukázka reálných provedení je vyobrazena na Obr. 24. Vlevo lze vidět Schroederův difuzor s efektivním rozptylem v pásmu 550 - 2143 Hz. Vpravo je vyobrazen difuzor s různou hloubkou odrazivých ploch s efektivním rozptylem v pásmu 750 - 4000 Hz.



Obr. 24: Příklady reálných difuzorů používaných v praxi (vlevo – RPG difuzor, vpravo rozptylový prvek s různou hloubkou odrazivých ploch), převzato z [23]

3.4 Umístění akustických obkladů

Důležitou roli hraje při použití akustických prvků i jejich samotné umístění v dané místnosti. Rozmístění prvků v podobě například panelů na různá místa místnosti může účinně přispívat k absorpci. Pokrytí celých stěn pohltivými plochami nemusí být vždy nejlepší řešení, ba naopak toto řešení je neefektivní, drahé a pro přirozený poslech nemusí být příznivé. Rozmístění pohltivých panelů jen na části stěn může také zlepšit difuzitu akustického pole. Pro ještě lepší difuzitu prostoru je však lepší použití i již zmíněných rozptylových prvků. Pokud se použije několik typů akustických prvků, jako například porézní pohlcující panely a některý z druhů rezonátorů, je žádoucí umístit několik prvků z každého typu na bočních stěnách a na stropě. Tím se zajistí, aby akustické prvky ovlivňovaly zvuk ve všech třech axiálních módech (podélný, příčný a svislý). Příklad upravené poslechové místnosti je uveden na Obr. 25.



Obr. 25: Příklad poslechové místnosti s akustickými úpravami, převzato z [24]

V kvádrových místnostech je nejúčinnější umístit akustické prvky pro pohlcení nízkých frekvencí v blízkosti rohů a podél okrajů povrchů místnosti. V poslechových místnostech pro mluvené slovo by měl být navíc na stěnách ve výšce hlavy použit také nějaký pohltivý materiál, účinný při středních a vyšších kmitočtech. Materiál aplikovaný na spodní části vysokých stěn může být ve skutečnosti až dvakrát účinnější než stejný materiál umístěný jinde. Například, když budou velké odrazivé plochy naproti sobě, může na nižších frekvencích vzniknout nežádoucí jev třepotavé ozvěny, proto je vhodné rozmisťovat akustické prvky tak aby tato situace nenastala. Pro prvotní návrh akustických úprav je dobré aplikovat teoretické poznatky. Nicméně pro dosažení co nejlepších výsledků je vhodné s rozmístěním a množstvím akustických prvků dále experimentovat [7].

4 Požadavky na akustiku poslechových místností

Jelikož se tato práce zabývá právě řešením prostorové akustiky poslechové místnosti, která bude zároveň sloužit i jako učebna pro výuku předmětů souvisejících s audiovizuální technikou, úpravami zvuku či dalšími souvisejícími tématy, budou v této kapitole uvedena doporučení udávaná normami ČSN EN ISO 3382-1, ČSN EN 73 0525, ČSN EN 73 0526, ČSN EN 73 0527 a specifikací ITU-R BS.1116-1. Tyto normy společně s různými standardy a doporučeními, poskytují dobrý podklad pro navrhování a hodnocení akustických vlastností poslechových místností. V první fázi návrhu by se mělo vycházet z normy [12], která definuje všeobecné termíny a postupy pro řešení problémů prostorové akustiky v běžných uzavřených prostorech. Z hlediska návrhu poslechových místností je však nutné věnovat pozornost normám [13] a [14], které pojednávají o projektování v oboru prostorové akustiky, konkrétně ve studiích a místnostech pro snímání, zpracování, kontrolu zvuku, pro kulturní účely, ve školách a v prostorech pro veřejné účely [12][13][14].

4.1 Limity hluku pozadí

Před samotným řešením poslechové místnosti je potřeba zjistit hluk pozadí. Vzhledem k tomu, že se v tomto případě jedná o poslechovou místnost, jsou nároky na hluk pozadí velmi přísné v celém slyšitelném spektru. Zdrojem hluku pozadí mohou být v prostoru využívané technologie - topení, klimatizace, osvětlení, ale i vnější zdroje jako například doprava, průmyslové stroje a další. Normou udávané limity v daných oktávových frekvenčních pásmech lze vidět v Tabulka 3 [13]. Pro kina a další prostory s vícekanálovým zvukovým systémem by hladina hluku pozadí měla být obecně nižší než 30 dB [14]. Zásadní vliv na izolaci vnějších zdrojů hluku má zvuková neprůzvučnost dané místnosti [13].

Tabulka 3: Limity hluku pozadí $L_{p,max}$ (dB) pro příslušný prostor, převzato z [13]

Střední kmitočet okt. pásma (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1 (hlasatelný, činoherní studia)	37	24	16	12	10	10	10	10
2 (hudební a diskusní studia)	41	29	21	16	12	10	10	10
3 (televizní a filmová studia, režie)	45	34	26	20	16	13	12	12
4 (místnosti pro střih, přepis apod.)	48	38	31	24	20	17	15	15

4.2 Rozměry poslechových místností

V již stávajících místnostech, které jsou určeny pro akustické úpravy se nejprve zjišťuje objem dané místnosti, který zpravidla vychází z provozních, hygienických a akustických požadavků. Mělo být dodrženo že na jednu osobu uvnitř běžné místnosti připadají 4 m^3 . V případě malých poslechových místností je nárok na objem výrazně vyšší a měl by být v rozmezí 20 až 25 m^3 na 1 osobu. Uzavřené prostory o objemu menším než 200 m^3 se mají svým tvarem pouze blížit krychli, aby se dosáhlo co nejrovnoměrnějšího rozložení vlastních kmitů. Objem poslechové místnosti však nesmí být příliš malý. V malém prostoru by totiž nebylo možné dosáhnout optimální doby dozvuku. V dalším kroku by měl být analyzován tvar uzavřeného prostoru respektive poměr stran. Tvar se řeší proto, aby v daném prostoru vzniklo rovnoměrné rozložení zvukové energie na ploše poslechu a nedocházelo k rušení ozvěnou. Doporučený poměr stran je poté 1 : 1,05 : 1,2. Optimální objem konkrétních místností je uveden viz Tabulka 4 [12][13].

Tabulka 4: Optimální objem V_0 (m^3) a optimální doba dozvuku T_0 (s) vybraných prostorů, převzato z [13]

Typ místnosti	V_0 (m^3)	T_0 (s)	Kmitočtová závislost T_0 (vztaženo k 1 kHz)
Hlasatelna kabina	30	0,3	od 160 Hz níže pokles
Hlasatelna, dabingové studio	90	0,3	od 160 Hz níže pokles
Malé hudební studio	1500	1	
Malé televizní/filmové studio	5000	0,8	
Režijní místnost	130	0,3	
Mixážní hala	700	0,5	

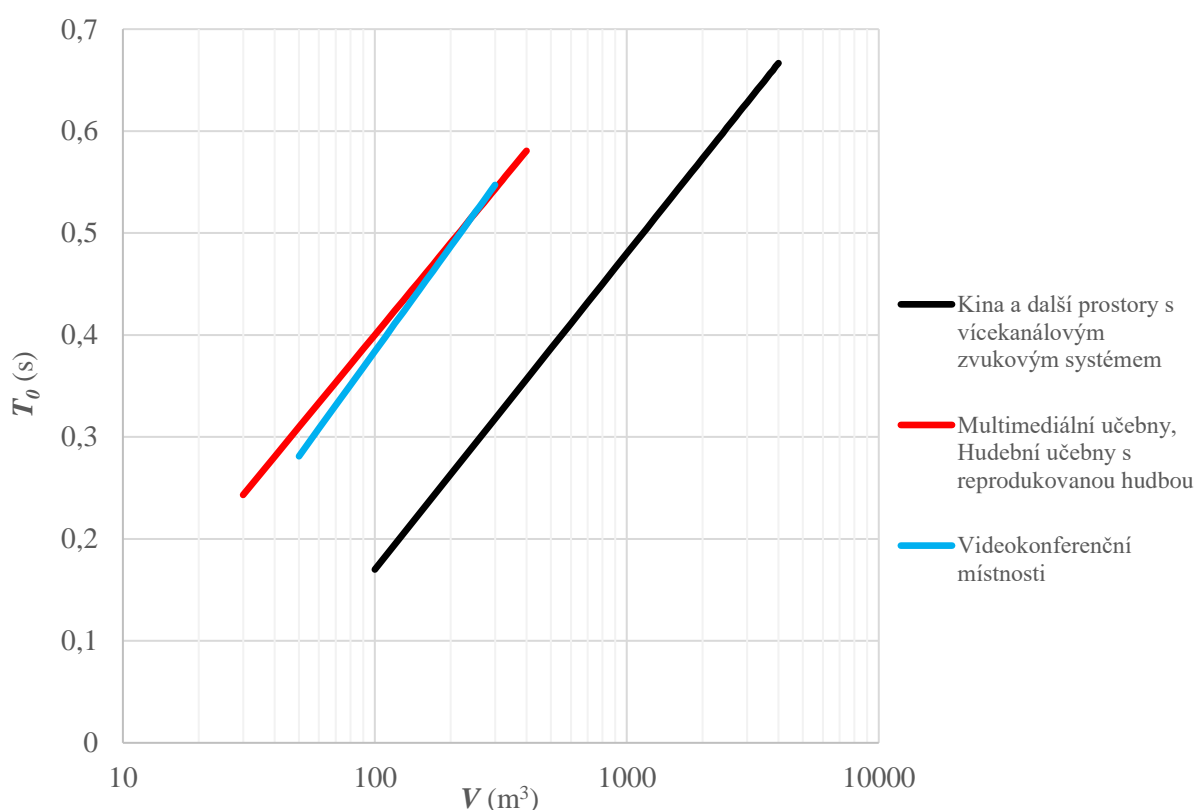
Specifikace EBU Tech. 3276 – 2nd edition, která se zabývá právě poslechovými místnostmi a podmínkami pro stereofonní a monofonní poslech, udává další pohled na to, jaké rozměry by poslechová místnost měla mít. Minimální plocha podlahy by měla být 40 m^2 pro referenční poslechovou místnost a 30 m^2 pro místnost s vysokou kvalitou zvukové kontroly. Velikost poslechové místnosti by měla být určena jak operačními aspekty (instalace technického vybavení apod.), tak akustickými. Ve všech případech by objem místnosti neměl přesáhnout 300 m^3 . Aby byla zajištěna přibližně rovnoměrná distribuce zvuku o nízkých frekvencích, musí být proporce místnosti udržovány ve stanovených mezích. Následující limity by pro poslechové místnosti měly být vždy dodrženy.

- $1,1w/h \leq l/h \leq 4,5w/h - 4$
- $l < 3h$
- $w < 3h$

Kde l (m) je délka místnosti (větší rozměr měřený mezi bočními stěnami, bez ohledu na orientaci), w (m) šířka místnosti (menší rozměr měřený mezi bočními stěnami, bez ohledu na orientaci) a h (m) výška místnosti. Kromě těchto limitů by se rozměry neměly rovnat poměrům l , w a h , celých čísel ($\pm 5\%$) [25].

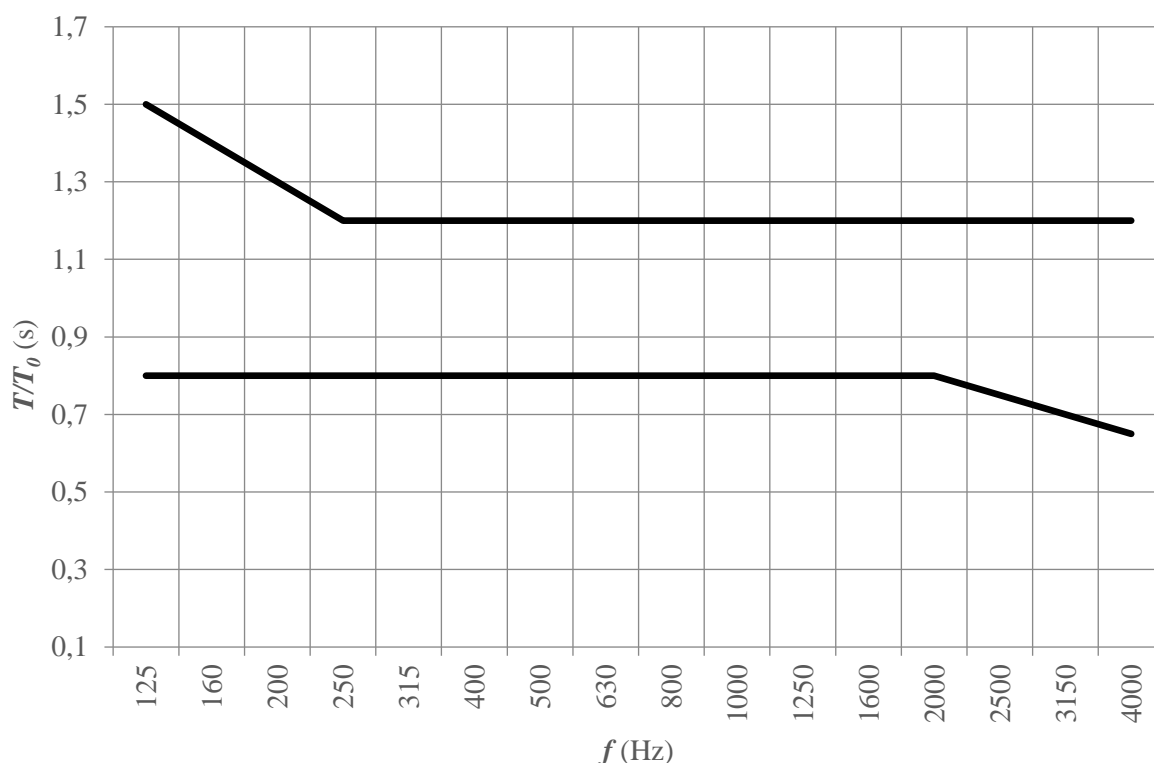
4.3 Požadavky na dobu dozvuku

Normy a specifikace často udávají tzv. optimální dobu dozvuku T_0 (s), což je ideální doba dozvuku, kterou by daný prostor měl mít z hlediska akustických požadavků. Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá poslechovou místností, která bude využívána i jako učebna, budou zde uvedena doporučení právě pro tyto typy prostorů. V grafu na Obr. 26 je vyobrazená závislost optimální doby dozvuku na objemu místností s různým využitím.



Obr. 26: Optimální doby dozvuku T_0 (s) při objemu místností V (m^3), převzato z [14]

K optimální době dozvuku přísluší odpovídající toleranční maska daná také normou [13]. Na Obr. 27 je vyobrazené toleranční pásmo pro prostory určené k poslechu či přednesu hudby a řeči [12][13].



Obr. 27: Toleranční pásmo naměřené doby dozvuku T (s) vzhledem k optimální době dozvuku T_0 (s) v závislosti na frekvenci, převzato z [14]

Přísnějším přístupem k této problematice poslechových místností přistupuje specifikace [25]. Místo optimální doby dozvuku T_0 pracuje s nominální dobou dozvuku T_m . Tento parametr T_m , je průměrem naměřených dob dozvuku v 1/3 oktávových frekvenčních pásmech od 200 Hz do 4 kHz. Tato hodnota by se poté měla držet ve stanovených mezích $0,2 < T_m < 0,4$ s. Ideální hodnotu T_m lze získat pomocí výpočtu (15).

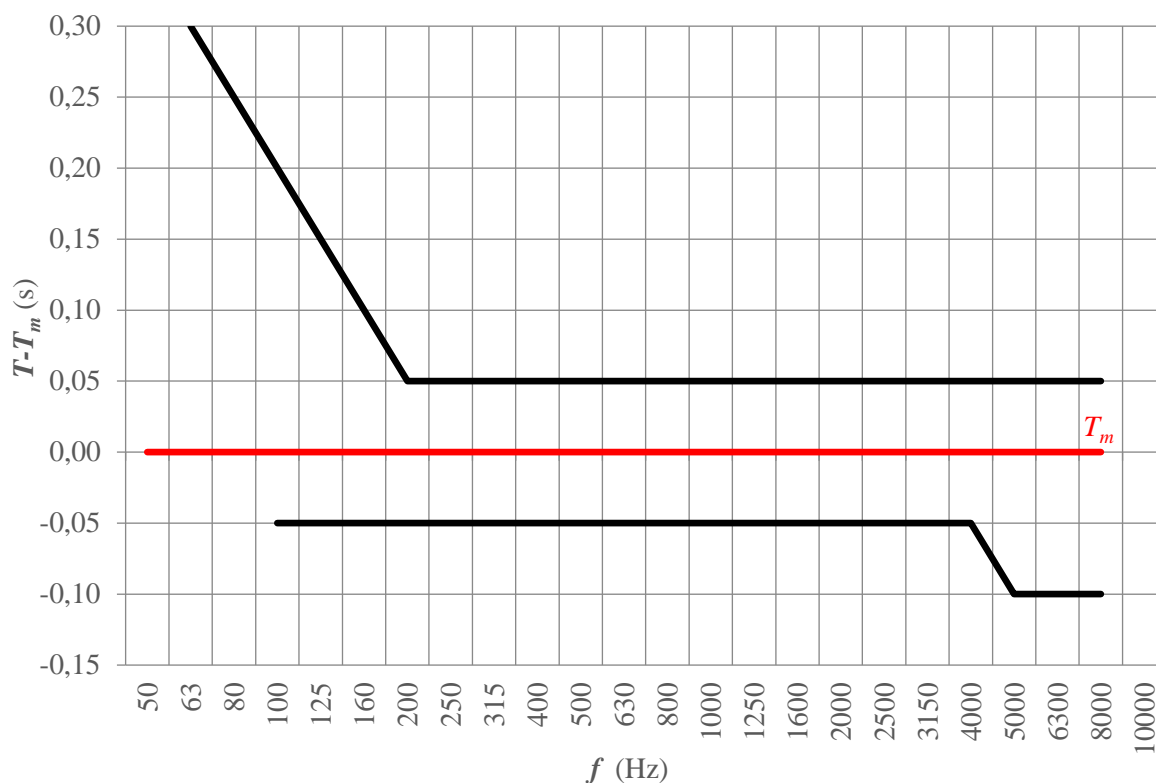
$$T_m = 0,25 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

V (m³) – objem měřené místnosti;

V_0 (m³) – objem referenční místnosti (100 m³);

T_m (s) – nominální doba dozvuku;

Rozdíl naměřené doby dozvuku T a nominální doby dozvuku T_m , by po provedení analýzy měl být opět ve vymezené oblasti viz Obr. 28. Uvedená toleranční maska platí pro $T_m = 0$ s. Při návrhu dané místnosti je nutné tuto hodnotu nahradit vlastní hodnotou T_m [25].



Obr. 28: Toleranční maska pro dobu dozvuku dle specifikace [25], převzato z [25]

4.4 Dodatečné akustické úpravy

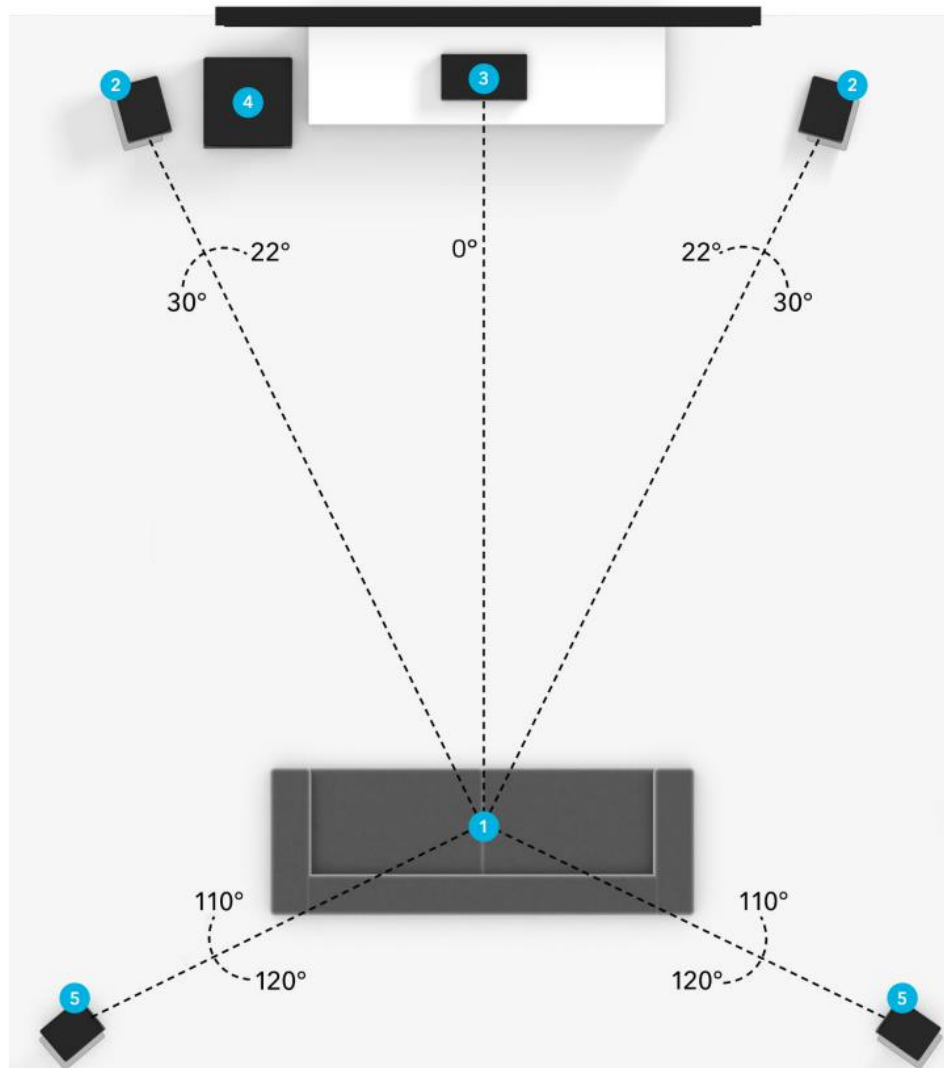
V případě, že se naměřená doba dozvuku nepohybuje v normou (specifikací) stanovených mezích, je nutné pro získání požadované doby dozvuku doplnit prostor o akustické prvky. Pro úpravu doby dozvuku lze použít obklady popsané v kapitole 3. Prvky rozptylující zvuk mají za úkol zvýšit difuzitu zvukového pole v daném prostoru.

Materiály a konstrukce pro pohlcování zvuku by měly dosahovat hodnoty činitele zvukové pohltivosti minimálně 0,6 v požadovaném pásmu kmitočtů. Počet, typ a rozmístění prvků absorbujících zvuk je dán výsledky měření a analýzy doby dozvuku řešeného prostoru nebo počítačovými simulacemi. Při realizaci úprav je vhodné střídat plochy s různými typy materiálů pro pohlcování a rozptyl zvuku, což může vést k efektivnější absorpci a rozptylu zvuku a vytvoření rovnoměrnějšího akustického pole [12].

4.5 Poslechové místo

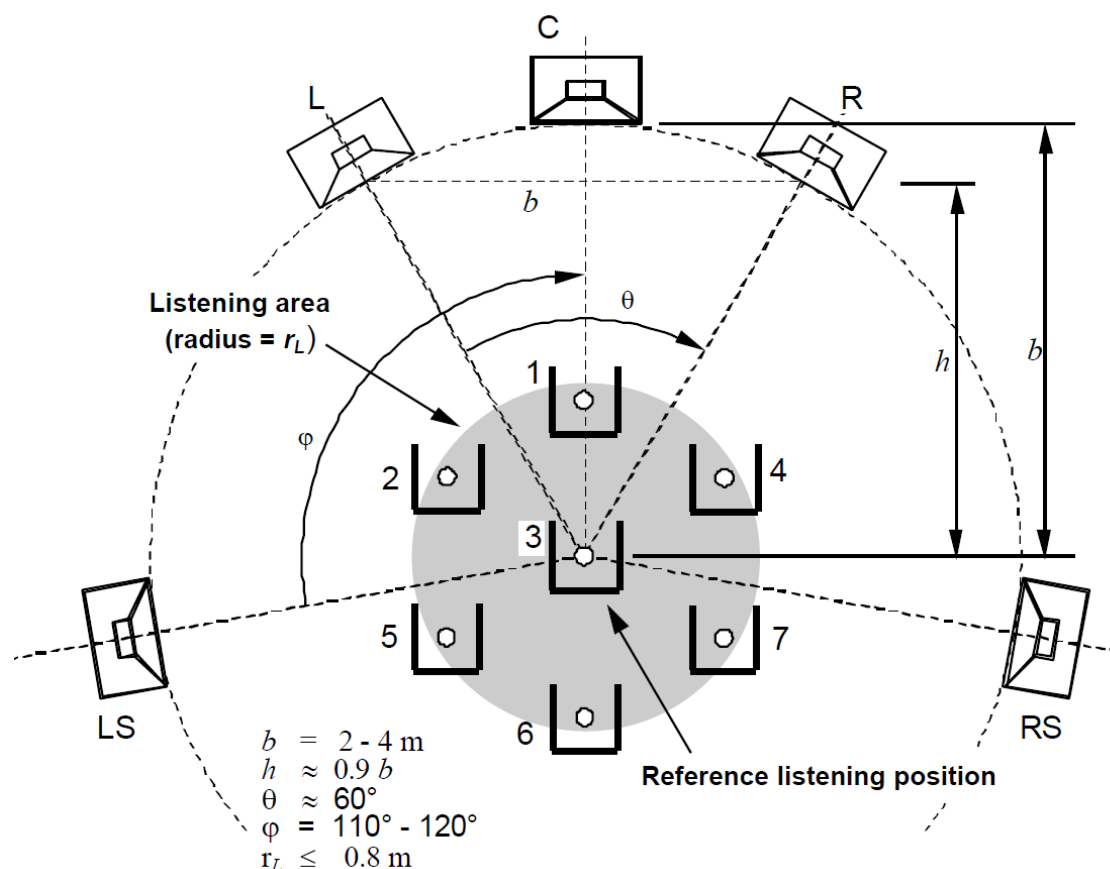
V případě poslechového místa hraje stěžejní roli jeho poloha v místnosti a rozmístění reproduktorové soustavy. Veškeré náležitosti související s poslechovým místem u vícekanálových audiosystémů řeší jak specifikace [25] nebo [27], tak doporučení firmy Dolby, které se zabývá multikanálovými zvukovými systémy hlavně pro kina a domácí kina.

Konfigurace reproduktorů ve formátu 5.1, což bude konfigurace i pro poslechovou místnost řešenou v praktické části, lze vidět na Obr. 29 [25][27][28].



Obr. 29: Multikanálový audiosystém 5.1 dle Dolby Atmos, převzato z [28]

Audiosystém ve formátu 5.1 obsahuje levý přední (L), pravý přední (P) a prostřední (C) reproduktor. Dále pak levý zadní a pravý zadní reproduktor (LS a RS) [25]. V 5.1 audiosystému figuruje i samostatný subwoofer. Vyobrazení na Obr. 30, převzaté ze specifikace [27], upřesňuje rozpoložení audiosystému.



Obr. 30: Rozložení vícekanálového audiosystému dle [27], převzato z [27]

Hlavní reproduktory (L, R, LS, RS) by měly být umístěny symetricky vůči hlavnímu poslechovému místu a centrálnímu přednímu reproduktoru C. Při poslechu vícekanálového zvuku je důležitější rovnováha mezi zvukem předních a zadních reproduktorů. Špatné umístění předních a zadních reproduktorů vůči sobě, může způsobit zhoršení poslechových podmínek. Menší roli poté hraje i rozmístění levých a pravých reproduktorů vůči sobě, nicméně rovnováhu v tomto případě zajišťuje i centrální reproduktor. Subwoofer s více méně všesměrovou vyzářovací charakteristikou bývá umístěn jako je vyobrazeno na Obr. 29.

V případě, že umístění reproduktorů po referenčním kruhu (viz Obr. 30) není možné, například pro centrální reproduktor C kvůli umístění plátna nebo televize, řešením je elektronické zpoždění, které by mělo zajistit vyrovnání různých vzdáleností [27][28].

5 Modelování akustických polí uzavřených prostorů

Již v kapitole 1 se práce zabývala výpočty doby dozvuku, na základě kterých lze poměrně snadno navrhnout vhodnou pohltivost ploch místností. V případě, že se jedná o složitější, členitější prostory, kde se mohou vyskytovat i difuzní akustické prvky, je vhodné využít některý ze simulačních softwarů. Takovým softwarem může být například EASE 4.4, který je vhodný zejména pro modelování v prostorové akustice a byl použit v praktické části této práce.

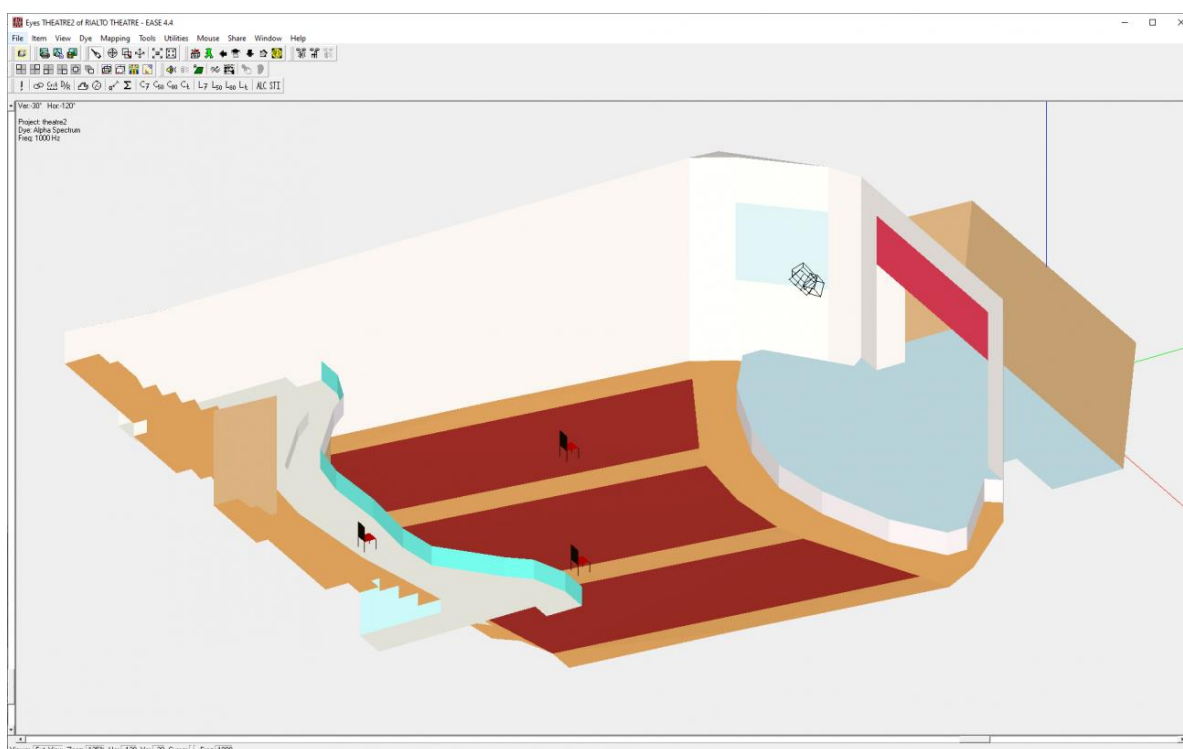
Před samotnými simulacemi například v poslechové místnosti, je nutné vytvořit geometrický model místnosti. Modelování jednoduchého prostoru je často možné provést přímo v programu pro modelování akustických polí. V případě složitějších prostorů, jako jsou například velké sály, kostely, nebo divadla je mnohdy jednodušší geometrický model vyhotovit v nějakém CAD (Computer Aided Design) programu (např. Onshape, SketchUp a další) [30][31].

Pro modelování akustického pole uzavřených prostorů lze využít celou řadu metod. Mezi nejpoužívanější numerické metody patří metoda konečných prvků (FEM) a metoda hraničních prvků (BEM). Tyto numerické metody počítají s faktem, že se zvuk šíří jako vlna, proto lze vzniklé modely a příslušné simulace nazvat vlnovými modely. Ty jsou charakterizovány dosahováním velmi přesných výsledků pro celé zkoumané frekvenční spektrum. Nevýhodou je, že počet přirozených modů v místnosti roste zhruba s třetí mocninou frekvence, což znamená, že pro praktické použití jsou vlnové modely obvykle omezeny na nízké frekvence a malé místnosti [29].

Další možností jak popsat šíření zvuku je pomocí zvukových paprsků. Modelování pomocí tzv. ray tracing metody je vhodné pro frekvenční oblast vyšších kmitočtů a simulace větších prostorů. Tento model vycházející z geometrického přístupu k akustice. Modely vycházející z geometrické akustiky měly být omezeny na relativně nízké řády odrazů. Pro vyšší řády odrazů by měl být zaveden i statistický přístup [30][29].

5.1 Modelování v programu EASE 4.4

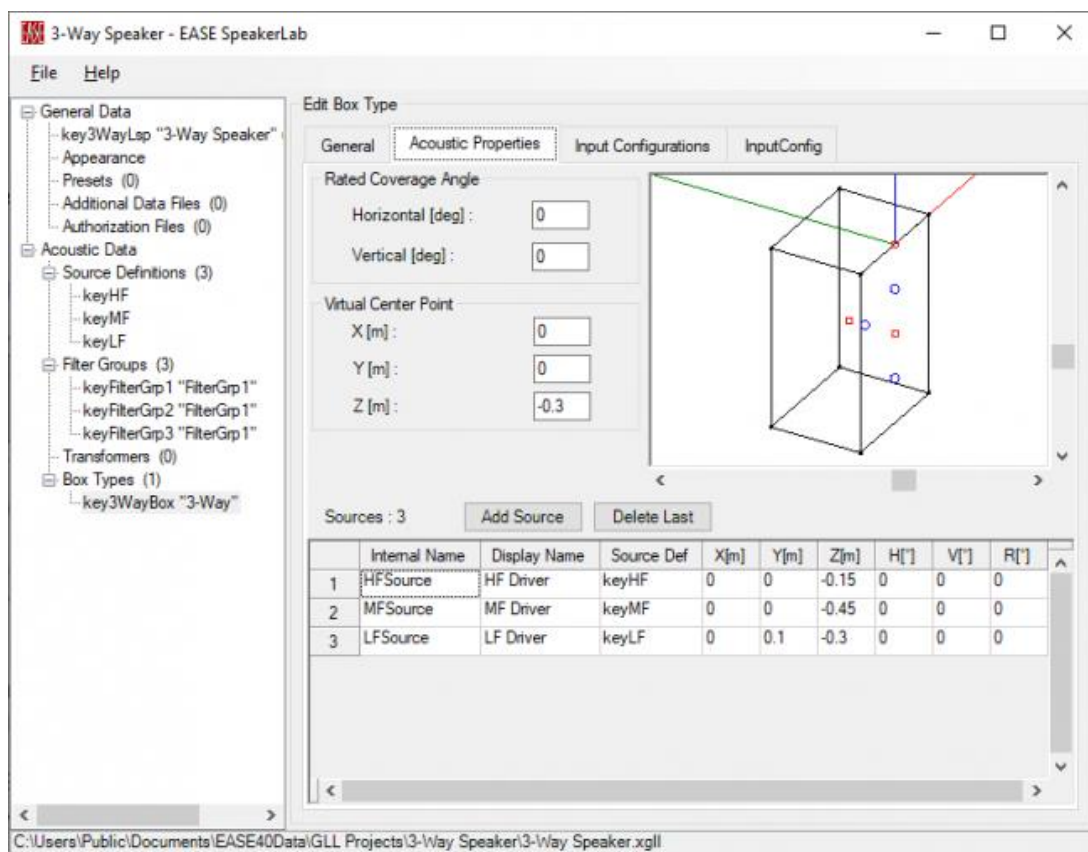
Jedná se o program pro elektroakustická modelování a simulace akustických polí. Model prostoru je možné vytvořit v jedné ze součástí programu nebo naimportovat např. z externího CAD softwaru. Kromě geometrie prostoru je nutné charakterizovat zvukovou pohltivost (případně rozptyl) jednotlivých použitých materiálů. Tento program také obsahuje nástroj pro kontrolu správnosti importovaných modelů (Check Holes). Ihned po vyhotovení nebo naimportování modelu místnosti do programu EASE 4 lze zobrazit celou řadu parametrů, jako například objem místnosti, celkovou plochu, nebo průměrné hodnoty činitele zvukové pohltivosti jednotlivých ploch. Pro přehlednost program umožňuje přiřadit povrchům v místnosti určitou barvu, například podle průměrné velikosti činitele zvukové pohltivosti viz Obr. 31.



Obr. 31: Obarvení ploch dle hodnoty α (nejtmavší=nejvyšší hodnoty), převzato z [31]

Další z výhod programu je možnost nahrát do modelu naměřené doby dozvuku stávajícího prostoru. V simulaci je poté možné zaměňovat různé pohltivé nebo odrazivé materiály akustických prvků a tím efektivně předpovědět vliv materiálu na dobu dozvuku a průměrný koeficient zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci. Lze také nastavit cílovou křivku doby dozvuku a následně měnit typy a umístění jednotlivých akustických prvků (funkce Optimize RT).

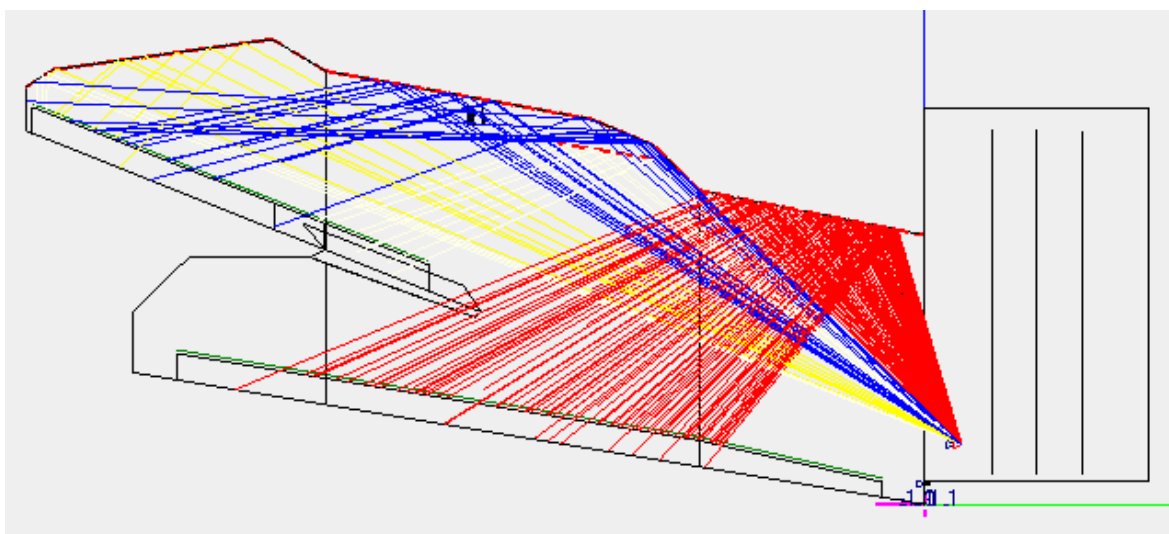
Při řešení akustických úprav poslechové místnosti je nutné věnovat pozornost i audiosystému, který bude v daném prostoru hudbu reprodukovat. Pro tyto účely je v programu knihovna zdrojů, jako jsou reproduktory různých typů a uskupení (např. line array), mluvící lidé, sirény a další. V případě, že se v knihovně potřebný typ reproduktorů nevyskytuje, je možné jej namodelovat manuálně a nastavit příslušné parametry, jako je citlivost, výkon nebo směrové vlastnosti na úrovni jednotlivých měničů. Možné je i definovat mechanické vlastnosti zdroje, definovat úhly vyzařování pro různé konfigurace line array soustav a další [31].



Obr. 32: Modelování vlastního reproduktoru v programu EASE 4, převzato z [31]

Z hlediska řešení akustických úprav poslechové místnosti lze pomocí tohoto programu získat všechny potřebné parametry popsané v kapitole 1 - dobu dozvuku RT_{60} ve zvoleném frekvenčním spektru, míry srozumitelnosti STI (STIPA), C_{50} , C_{80} , nebo kritickou vzdálenost od zdroje zvuku a další. Pro získání těchto parametrů program využívá statistický přístup k výpočtu akustického pole. Pomocí funkce standardního mapování lze také získat rozložení akustického tlaku v celé místnosti. Výsledky výpočtů jsou k dispozici v třetinooktávových pásmech v rozsahu 100 Hz až 10 kHz. Data lze exportovat v textovém i grafickém formátu, nebo v některých případech i jako excelovský soubor.

Mimo standardní mapování lze využít i funkce Ray Tracing nebo kombinaci obou. Ray Tracing lze popsat na příkladu, kdy zdroj zvuku generuje impulz. Do místnosti se poté uvolní řada paprsků, které se šíří rychlostí zvuku. Při své cestě ztrácejí energii v důsledku pohlcování vzduchem, což je patrné zejména při vyšších frekvencích. Nakonec částice narazí na hranici místnosti nebo na překážku, ztratí další energii a opět se odrazí. V závislosti na pohltivosti použitých materiálů a velikosti prostoru se tento proces opakuje. Program sleduje dráhu, energii a čas každého paprsku, dokud není dosaženo předem stanovených limitů (jako je doba šíření, řád odrazu nebo ztráta energie). Pomocí této funkce lze tedy zjistit, zda jsou akustické prvky správně umístěné a natočené. Dále pak zda je vhodně umístěn samotný zdroj zvuku v prostoru nebo jestli nedochází k rušivým odrazům [31].



Obr. 33: Vizualizace odrazů prvního řádu na zvolené plochy, převzato z [31]

Program EASE 4 poskytuje vše potřebné pro elektroakustické modelování. Vhodnou kombinací funkcí ray tracing a standardního mapování lze provádět poměrně komplexní analýzu. Omezující pro použití v malých prostorech a poslechových místnostech, může být začátek frekvenčního rozsahu až na 100 Hz. Pomocí modelování lze ušetřit nejen čas, ale i náklady na potřebné akustické prvky, počet iterací vedoucí k jejich optimálnímu rozmístění nebo na měřicí techniku. Nicméně je nutné mít na paměti, že zásadní pro správnost výpočtu je definování okrajových podmínek a případná zjednodušení modelu. Toto zanáší do simulace určitou chybu. Právě věrohodnost simulace je v praktické části zanalyzována v porovnání s reálnými měřeními řešené místnosti [31].

6 Výchozí stav poslechové místnosti EK708

Předmětem praktické části je řešení prostorové akustiky v rozpracované poslechové místnosti EK708 o délce 7,1 m, šířce 5,6 m a výšce 3,25 m. Tato místnost bude zároveň dále sloužit i jako učebna. Zatím jedinou akustickou úpravou, která byla v místnosti realizována, je pohltivý obklad typu laťového rezonátoru na přední straně místnosti (M. Landgráf, 2023 [34]). Laťový rezonátor upravuje dobu dozvuku, ale jeho hlavním účelem je potlačení efektu SBIR, který negativně ovlivňuje amplitudovou frekvenční charakteristiku audiosystému v poslechovém místě, vlivem odčítání zvukových vln na nízkých frekvencích [41]. Přední reproduktory audiosystému se budou nacházet přímo před rezonátorem a bez jeho realizace by efekt SBIR vznikl. Výchozí stav místnosti EK708 s vyhotoveným laťovým rezonátorem je vyobrazen na fotografii Obr. 34.

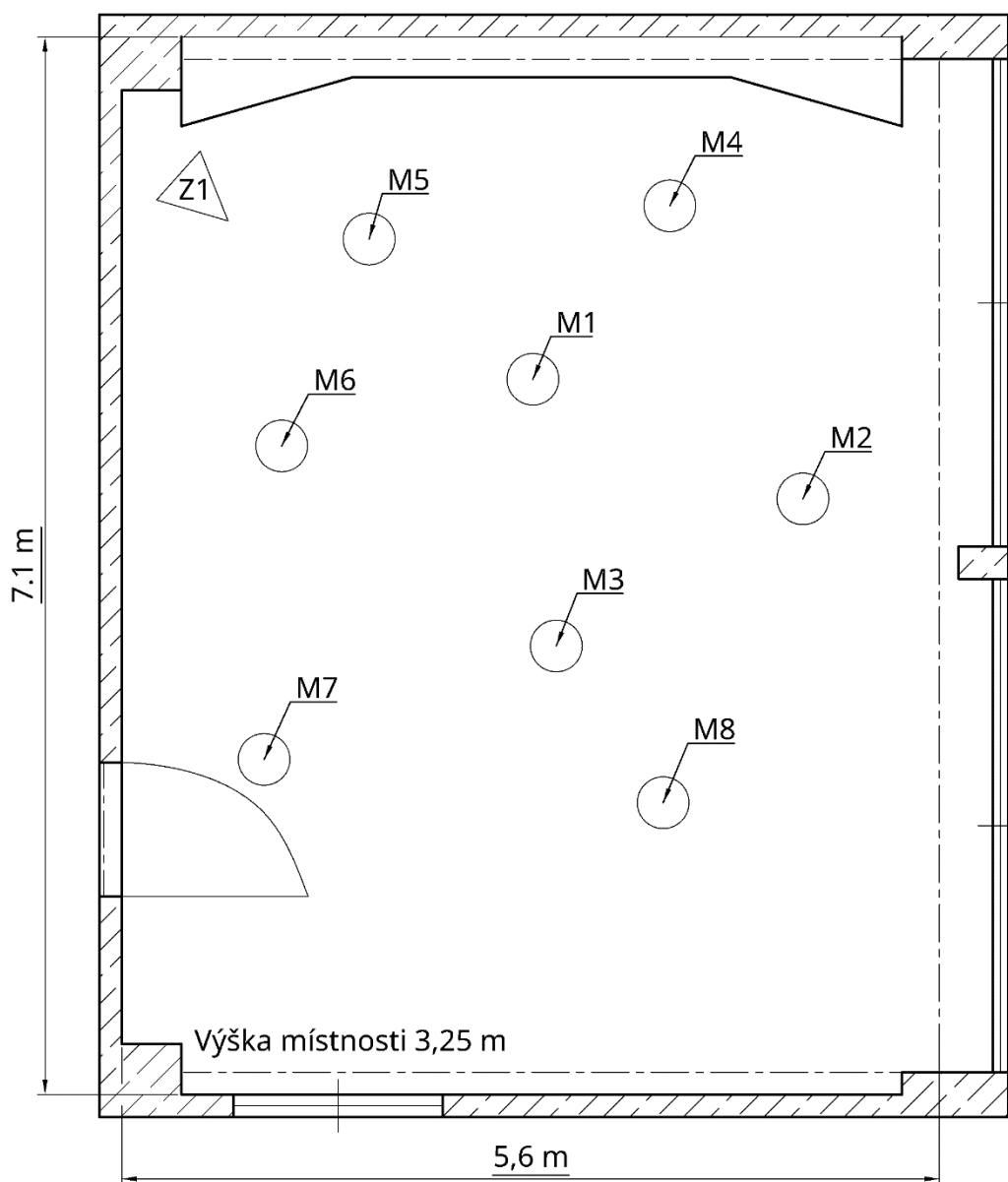


Obr. 34: Fotografie výchozího stavu místnosti

Pro zhodnocení současného stavu bylo provedeno měření doby dozvuku v třetinoctávkových frekvenčních pásmech 50 Hz – 10 kHz a srozumitelnosti řeči v podobě parametru STIPA. Výsledky těchto měření poskytují dobrý vstupní náhled na prostorovou akustiku místnosti a budou základem pro optimalizaci simulačního modelu. Dále je zde provedena také modální analýza tohoto uzavřeného prostoru.

6.1 Měření doby dozvuku

Prvním měřením ve výchozím stavu bylo měření doby dozvuku. Doba dozvuku RT_{60} v místnosti EK708 byla změřena s aktuálním vybavením - židle, stoly, PC, závěsy na oknech a další viz Obr. 34. Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 3382-1 [17]. Pro měření bylo zvoleno 8 měřicích bodů, kdy nejvíce sledovaným měřicím bodem bylo hlavní poslechové místo (M1) uvažované ve středu 5.1 audiosystému. Umístění ostatních měřicích bodů bylo provedeno tak, aby bylo co nejvíce v souladu s [17], tedy cca 1 m od postranních stěn a v dostatečné vzdálenosti od místa zdroje, aby se zabránilo přílišnému vlivu přímého zvuku.

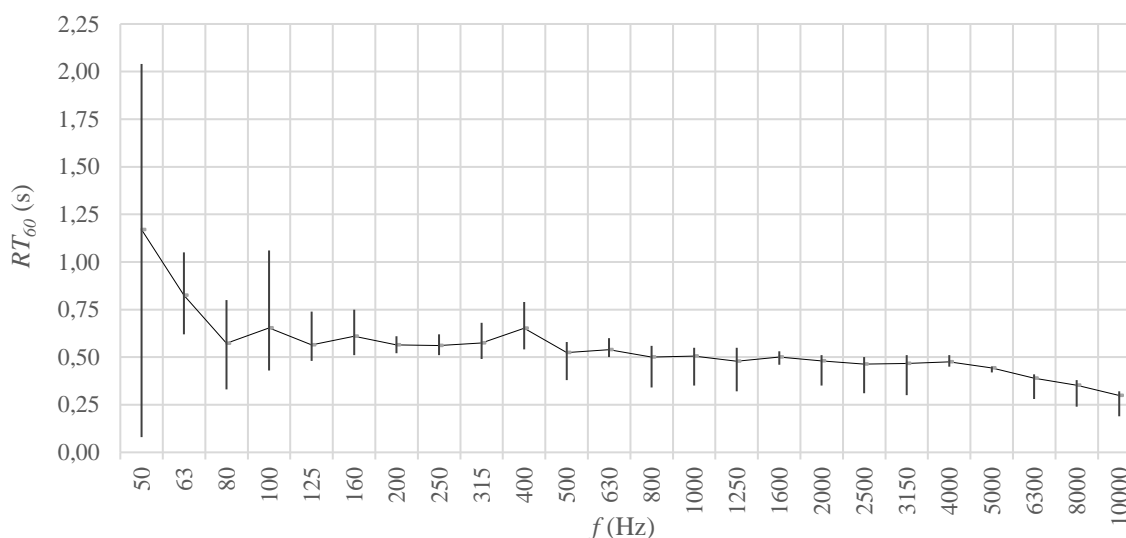


Obr. 35: Vyobrazení pozic měřicích mikrofonů a zdroje zvuku v místnosti EK708

Měření bylo provedeno pomocí zvukoměru XL2 od firmy Nti audio držného v ruce ve výšce 130 cm. Zvukoměr byl vybaven mikrofonom Nti Audio M2210, který svými parametry odpovídá typu 1, což je podmínkou pro měření doby dozvuku dle [17].

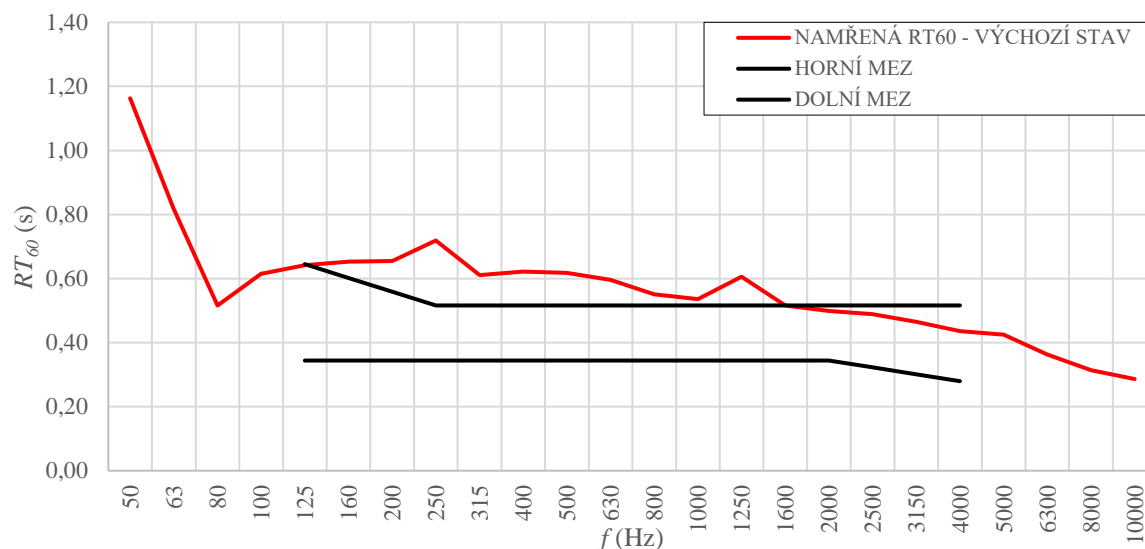
Jako zdroj zvuku byl použit reproduktor NX 10-SMA od výrobce RCF, který je schopný vybudit místnost EK708 růžovým šumem o dostatečné hladině akustického tlaku, tak aby bylo možné měřit s potřebným odstupem od hladiny akustického tlaku hluku pozadí. Důležitou roli hraje taky samotné umístění reproduktoru. Optimálním zdrojem zvuku by byl zdroj s všesměrovým vyzařováním v celém zkoumaném frekvenčním pásmu (tzv. dodekahedron), který by měl být umístěn ve výšce 150 cm nad podlahou. Vzhledem k tomu, že zdroj použitý při měření doby dozvuku v této diplomové práci dokáže na vysokých frekvencích vyzařovat jen pod úhlem 60° (na nízkých kmitočtech má zdroj všesměrový charakter), byl umístěn na podlahu do rohu místnosti tak, aby byl schopen pomocí odrazů od stěn vybudit dostatečně difuzní pole, které je pro měření doby dozvuku potřebné. Pro měření byla použita metoda přerušovaného šumu, kdy byl prostor vybuzen růžovým šumem o hladině cca 90 dB Vzhledem k nepřístupnosti dalších rohů byl zvoleno umístění reproduktoru (Z1 – zdroj zvuku), jako je vyobrazeno na Obr. 35. Dalším důvodem tohoto umístění reproduktoru byl fakt, že v této části místnosti před laťovým rezonátorem se budou nacházet přední reproduktory audiosystému. Pozice měřicích míst jsou vyobrazeny na stejném půdorysu.

Výsledná průměrná doba dozvuku je vyobrazena na grafu (viz Obr. 36), spolu s rozptylem mezi jednotlivými měřicími místy.



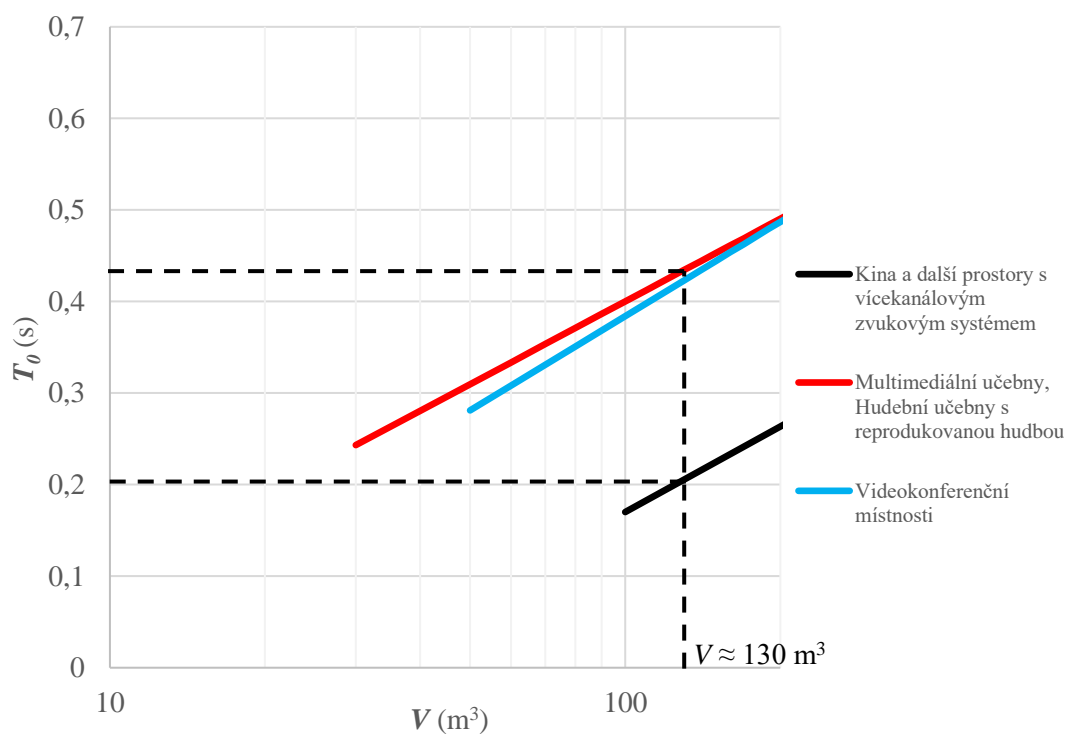
Obr. 36: Graf naměřené doby dozvuku ve výchozím stavu

Rozptyl hodnot doby dozvuku mezi jednotlivými měřicími body naznačuje značné nerovnoměrné rozložení akustického pole v oblasti nižších kmitočtů. Graf na Obr. 37 poté vyobrazuje průměrnou dobu dozvuku spolu s tolerančními mezemi dle [14]. Z vyobrazení vychází, že požadované průměrné doby dozvuku místnost dosahuje jen v pásmu 2 – 10 kHz.



Obr. 37: Naměřená průměrná doba dozvuku (T_0 pro toleranční meze je 0,43 s)

Jelikož je celkový objem prázdné místnosti cca 130 m^3 , dle Obr. 38 by optimální doba dozvuku T_0 poslechové místností EK708 měla být v rozmezí cca 0,2 – 0,43 s.

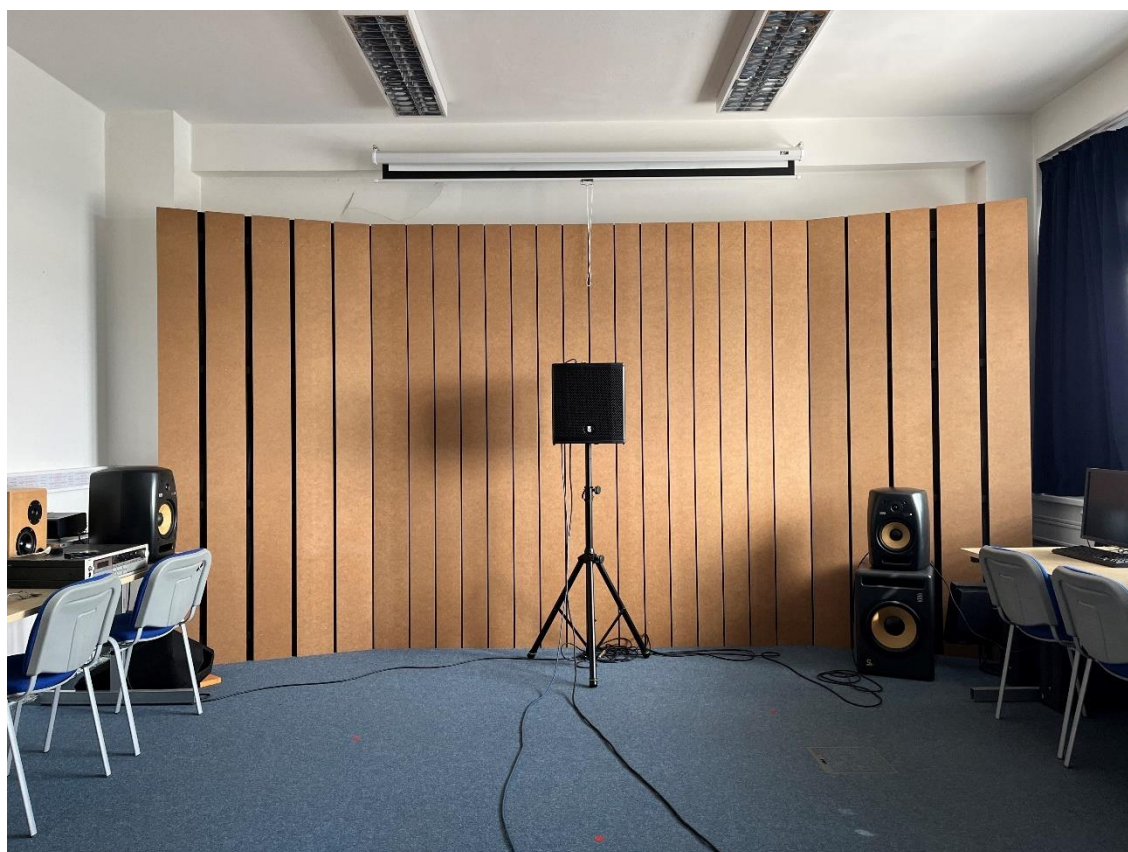


Obr. 38: Optimální doba dozvuku při objemu místností 130 m^3 , převzato z [14]

Doby dozvuku 0,2 s je reálné dosáhnout pomocí vhodně volených akustických úprav. Jelikož bude místnost používána i jako učebna, taková doba dozvuku by způsobila velký útlum mluveného slova a přednes by působil nepřirozeně. Z tohoto důvodu byla jako cílová optimální doba dozvuku zvolena hodnota 0,43 s. Pro dosažení doby dozvuku, která by se nacházela v požadovaných mezích (viz Obr. 37), je tedy potřeba realizovat další dodatečné akustické úpravy. Tomuto tématu se věnuje kapitola 8.

6.2 Měření srozumitelnosti

Dalším měřením ve výchozím stavu bylo ověření srozumitelnosti opět v bodech M1 – M8. V tomto případě byl zdroj zvuku (RCF NX10-SMA) umístěn čelem k hlavnímu poslechovému místu M1, ve výšce 150 cm nad podlahou a ve vzdálenosti zadní části reproduktoru 20 cm od rezonátoru (simulace mluvícího člověka), jako je vyobrazeno na fotografii Obr. 39.



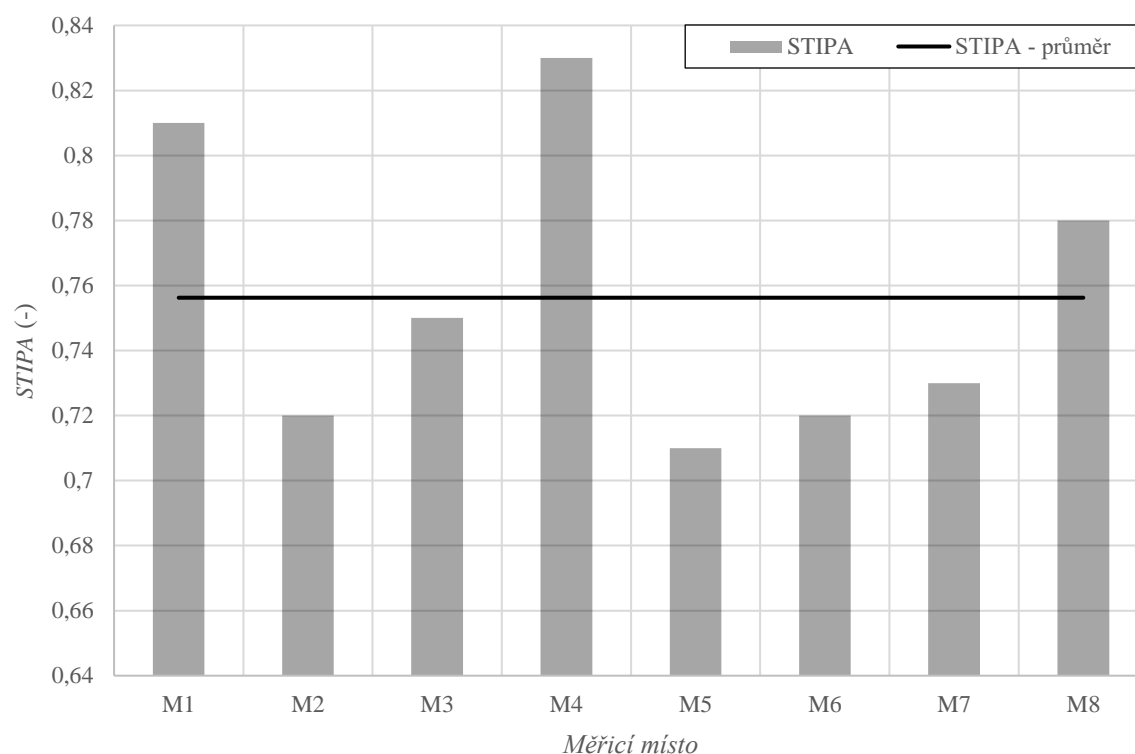
Obr. 39: Fotografie umístění reproduktoru pro měření STIPA

Pro měření indexů STIPA byl opět použit zvukoměr XL2. Testovacím signálem byl modulovaný růžovým šum, který má charakter lidské řeči. Tento signál byl následně zaznamenán zvukoměrem. Naměřené hodnoty STIPA spolu s odpovídající naměřenou hladinou akustického tlaku lze vidět v Tabulka 5.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty *STIPA* a hladiny akustického tlaku L_{Aeq} v měřicích bodech M1 – M8.

Měřicí bod	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	PRŮMĚR
<i>STIPA</i> (-)	0,81	0,72	0,75	0,83	0,71	0,72	0,73	0,78	0,76
L_{Aeq} (dB)	64,8	60,2	63,3	67,6	63,5	63,7	62,3	63,3	64,1

Vzhledem k tomu, že průměrná hodnota *STIPA* dosahuje vyšší hodnoty než je 0,75, lze tento prostor dle ČSN EN IEC 60268-16 ed.3. již nyní hodnotit z hlediska srozumitelnosti jako excelentní.

Obr. 40: Naměřené hodnoty *STIPA* v jednotlivých měřicích bodech spolu s průměrem

6.3 Analýza rozložení akustického pole v místnosti

Již v teoretickém úvodu byla zmíněna důležitost rovnoměrného rozložení akustického pole (hladiny akustického tlaku) v poslechové místnosti. Právě rozložení akustického pole je závislé na počtu a vzdálenosti vlastních kmitů prostoru. Pro tuto analýzu posloužil program (viz Příloha 11), který byl vyhotoven v rámci této diplomové práce v jazyce Python. Při uvážení průměrné doby dozvuku napříč všemi třetinooktávovými frekvenčními pásmy ve výchozím stavu (0,57 s), rychlosti zvuku za běžných klimatických podmínek (343 m/s) a rozměrů místnosti (délka 7,1 m, šířka 5,6 m a výška 3,25 m), lze provést pomocí programu jednoduchou prvotní analýzu, která zobrazí vlastní módy této místnosti (viz Obr. 41)

Měřením samotných vlastních kmitů místnosti se již zabýval Jan Altman ve své diplomové práci [37].

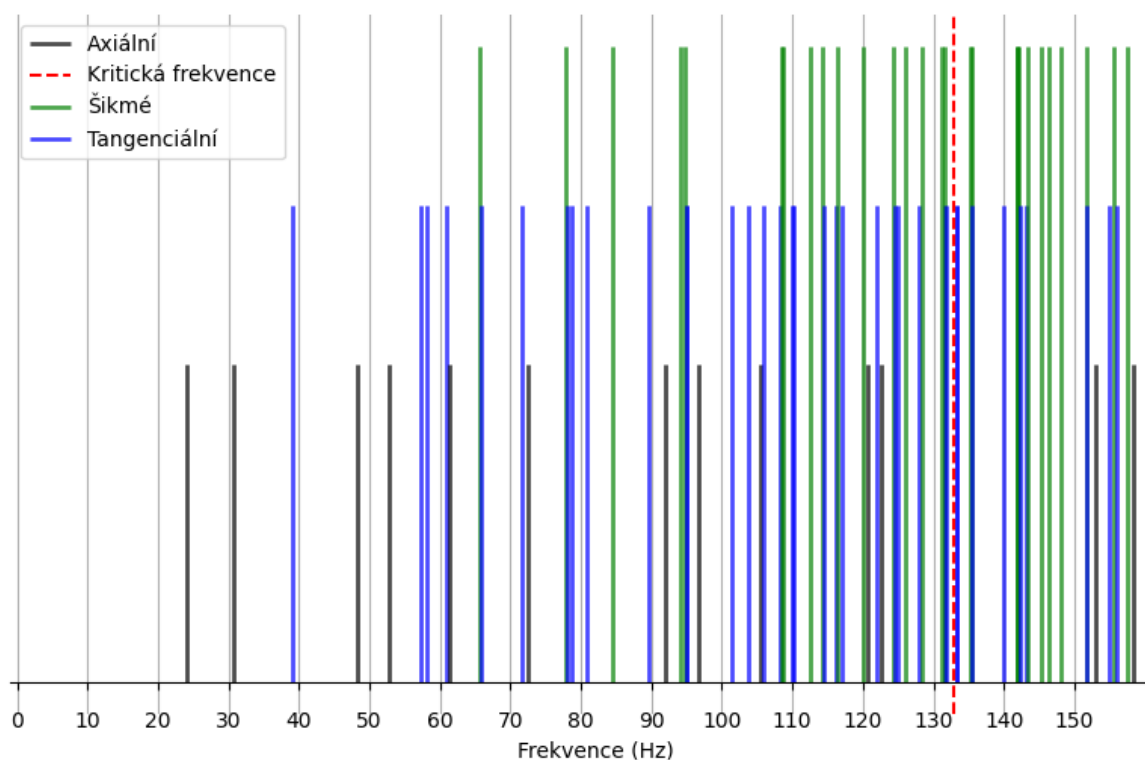
Hranicí, od které lze zvukové pole považovat za poměrně rovnoměrně rozložené, je kritická frekvence. Od této frekvence se vlastní kmitů ve frekvenčním spektru vyskytují v dostatečném počtu a její konkrétní výpočet je proveden v rovnici (16)

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{0,57}{129,22}} = 132,83 \text{ Hz} \quad (16)$$

f_k (Hz) – kritický kmitočet;

V (m³) – objem prostoru;

RT_{60} (s) – průměrná doba dozvuku napříč všemi 1/3 oktávovými pásmy;

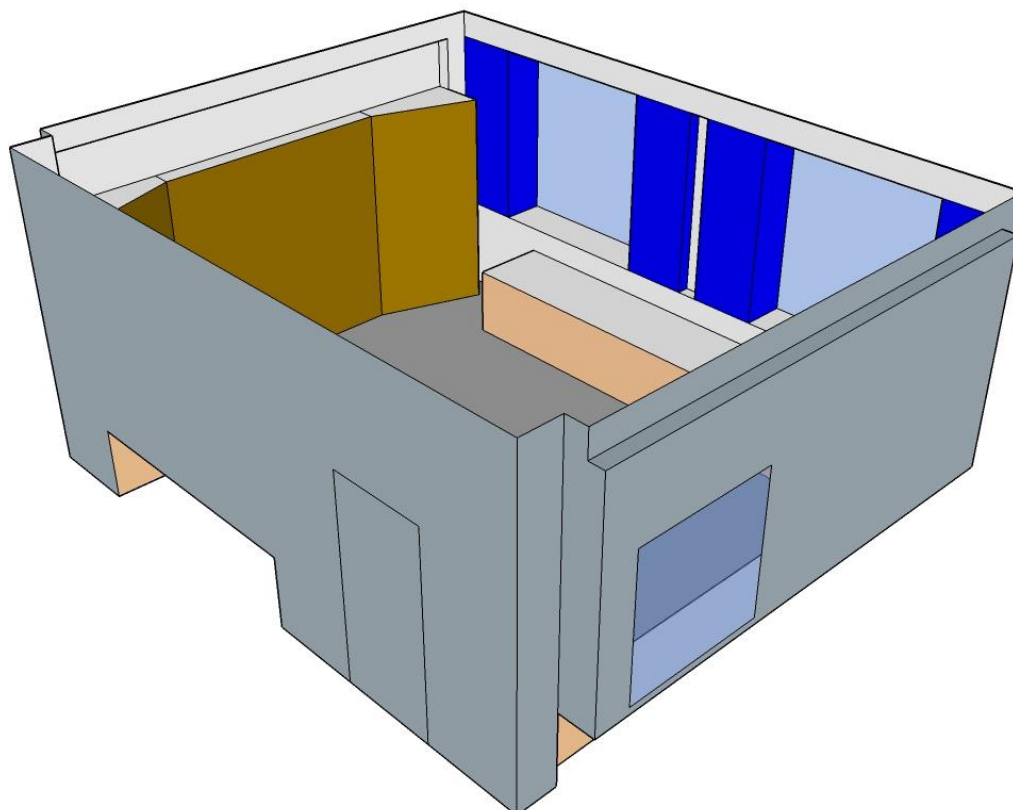


Obr. 41: Spektrum počátečních vlastních frekvencí v místnosti EK708

7 Modelování a akustické simulace

Tato část diplomové práce je věnována vytvoření funkčního simulačního modelu místnosti EK708 v programu EASE 4.4 a samotným simulacím se zamýšlenými akustickými úpravami.

V první fázi byl tedy vyhotoven co nejvíce věrohodný 3D model místnosti EK708 v programu SketchUp 2017, při dodržení všech naměřených rozměrů (viz Obr. 42).

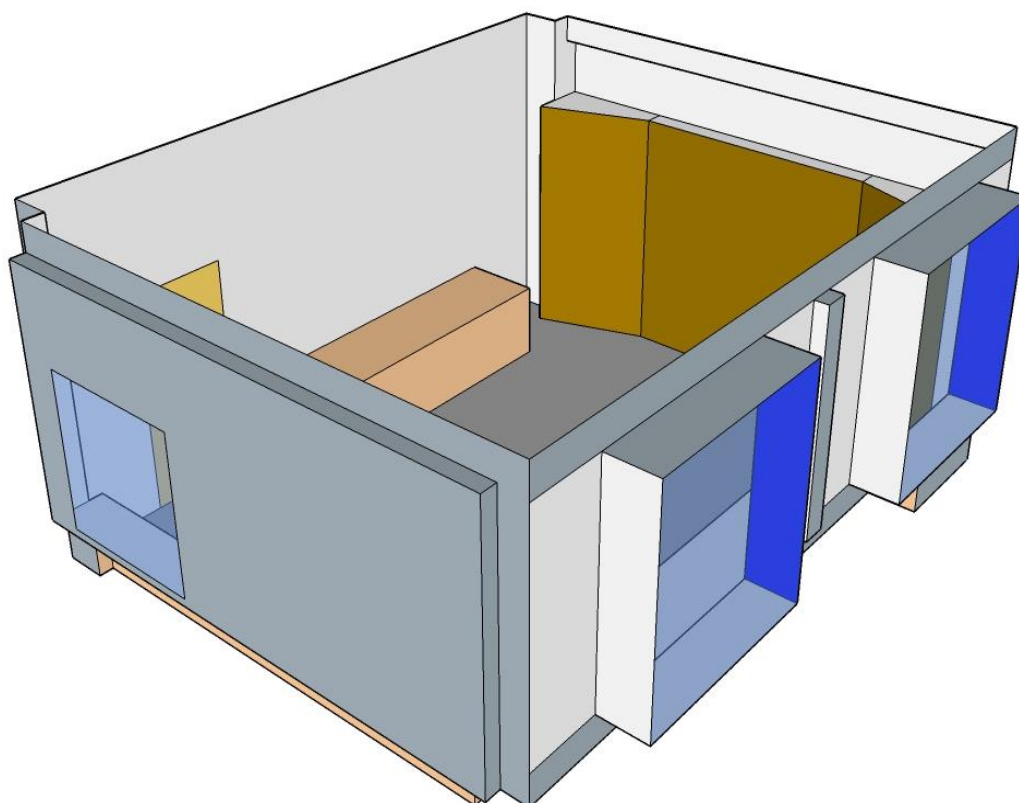


Obr. 42: Model místnosti EK708 v programu SketchUp 2017

7.1 Příprava modelu místnosti EK708

Program EASE bohužel neumí pracovat s 3D uzavřenými objekty uvnitř místnosti, z tohoto důvodu jsou 3D objekty složeny z 2D ploch. Z pohledu vyobrazeného na Obr. 43 je tato skutečnost lépe znatelná.

Jelikož doba dozvuku prostoru byla naměřena v místnosti s běžným vybavením nábytkem, počítači a dalším příslušenstvím, bylo nutné toto také zahrnout do modelu. Tento problém částečně řeší vyhotovení objektů “stolů“ téměř po celém obvodu místnosti. V modelu se tedy musely nacházet veškeré pohltivé objekty a plochy, rozestavené nejlépe tak jako tomu bylo při skutečném měření doby dozvuku.

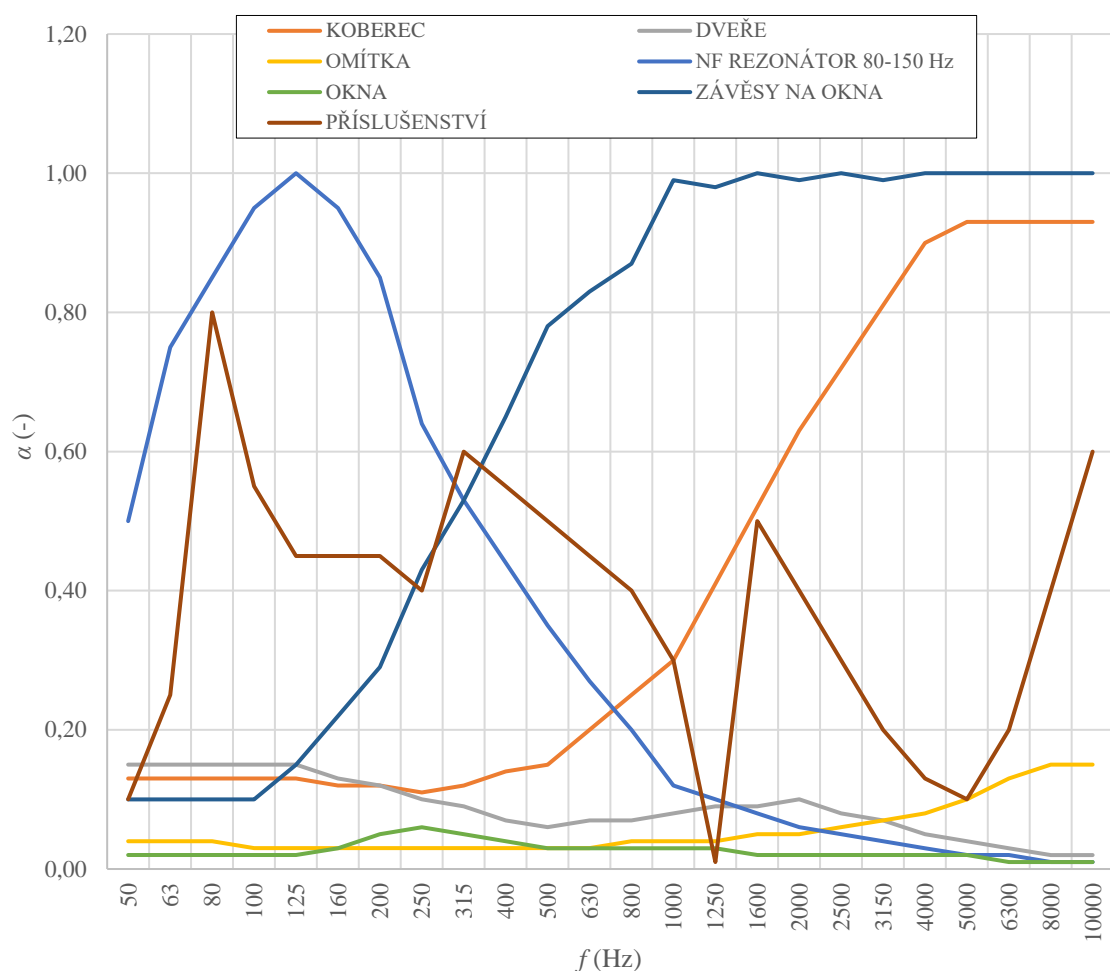


Obr. 43: Jiný pohled na model místnosti, upřesňující nutnost použití 2D ploch

Dále bylo provedeno modelování pohltivosti povrchů místnosti přímo v programu EASE. V případě běžných stěn a oken se vycházelo z dalších měření doby dozvuku provedených v typově stejných ale méně vybavených učebnách na Fakultě elektrotechnické ZČU Pro výpočet činitele zvukové pohltivosti laťového rezonátoru se využilo online aplikace (Acoustic modelling [36]). Prvkům jako jsou koberec a dveře, byly přiřazeny výchozí hodnoty z [5]. Jedinou nedefinovanou plochou tak zůstalo příslušenství s nábytkem. Pohltivost příslušenství s nábytkem bylo nutné dopočítat na základě znalosti rozměrů všech ploch a ostatních pohltivostí (viz Obr. 44).

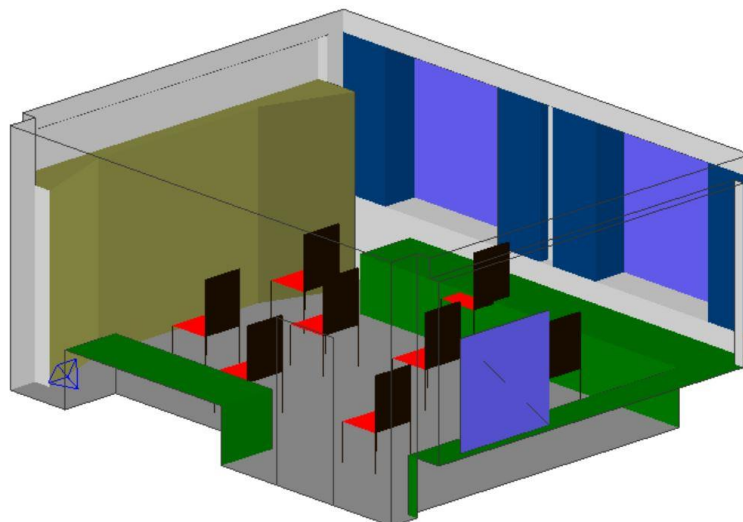
Tabulka 6: Plochy jednotlivých pohltivých povrchů v místnosti EK708

<i>Materiál</i>	<i>S (m³)</i>
NF REZONÁTOR 80 Hz (m ²)	13,4
DVEŘE (m ²)	2,0
ZÁVĚSY (m ²)	5,5
KOBEREC (m ²)	28,1
OKNA (m ²)	9,5
PŘÍSLUŠENSTVÍ (m ²)	19,5
OMÍTKA (m ²)	99,6
CELKOVÁ (m ²)	177,5

Obr. 44: Závislost pohltivosti α (-) všech ploch v místnosti na frekvenci

7.2 Simulace místnosti EK708 – výchozí stav

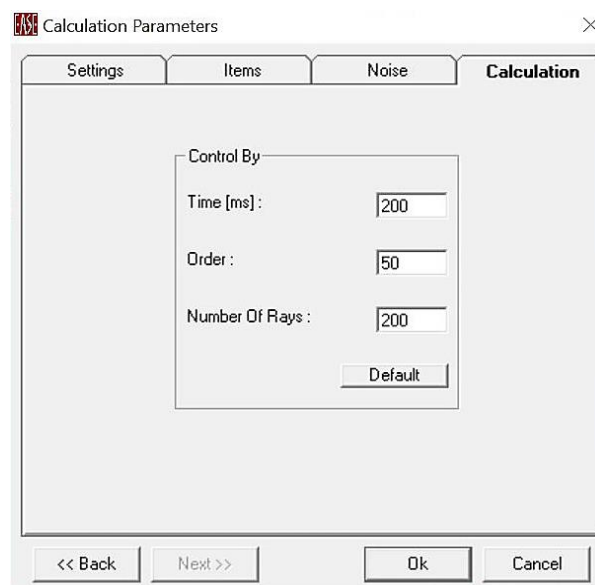
Po přípravě 3D modelu místnosti v programu SketchUp a vložení jednotlivých pohltivostí všech přítomných povrchů do databáze programu, byl model naimportován do prostředí EASE 4.4. Během importu byly jednotlivým povrchům přiřazeny příslušné pohltivosti z vytvořené databáze. Následně byla provedena kontrola, zda jsou jednotlivé pohltivé plochy natočeny směrem do místnosti a zda je prostor místnosti uzavřený (pomocí funkce Check Holes). V samotném prostředí programu EASE 4.4 byly v modelu vytvořeny měřicí body M1 – M8 (sedadla na Obr. 45) a vložen model reproduktoru. Protože v databázi není simulační model pro reproduktor používaný při měřeních RCF NX 10-SMA, byl z dostupných modelů vybrán parametrově nejbližší typ - ElectroVoice ETX-10P.



Obr. 45: Model místnosti EK708 v prostředí programu EASE 4.4

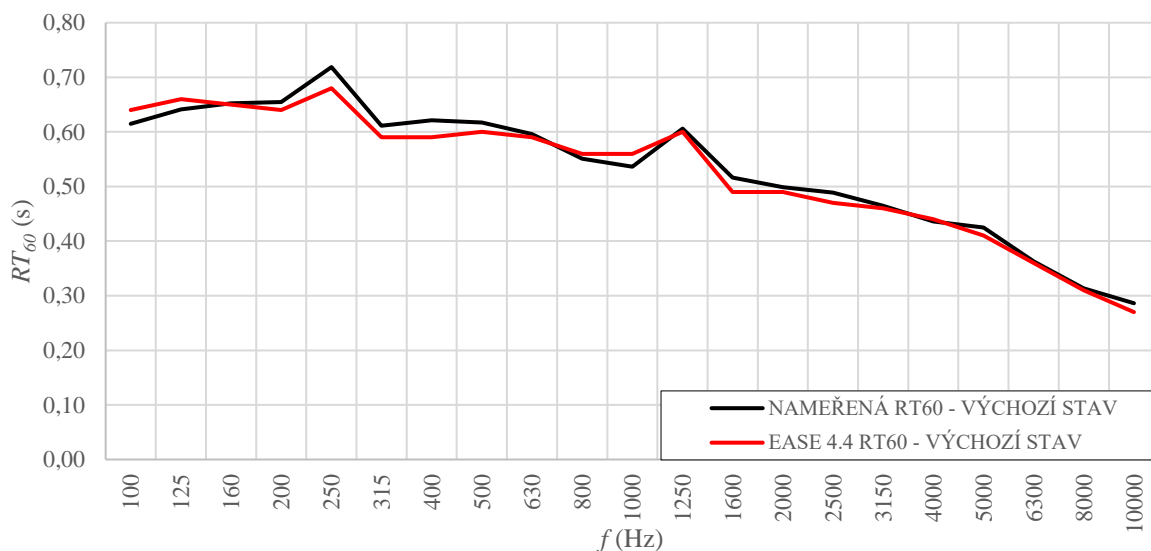
Přípravený model byl nejprve podroben simulaci doby dozvuku pomocí funkce Local Decay Time, která zohledňuje jak pohltivost ploch prostoru, tak odrazy zvukových paprsků od nich. Při generování zvukových paprsků zdrojem zvuku dochází při jejich dopadu na povrchy místnosti částečně k absorpci určité energie paprsku a částečně k odrazu paprsku, který nese zbývající zvukovou energii. Z rychlosti ztráty energie paprsků je na měřicích místech vyhodnocena doba dozvuku získaná simulací.

Při nastavení simulace hrají nejdůležitější roli rozlišení (Resolution), doba generování paprsků (Time), počet odrazů paprsků (Order) a celkový počet vygenerovaných paprsků (Rays). Nastavení klíčových parametrů je vyobrazeno na Obr. 46.



Obr. 46: Nastavení simulace pro výpočet doby dozvuku (funkce Local Decay Time)

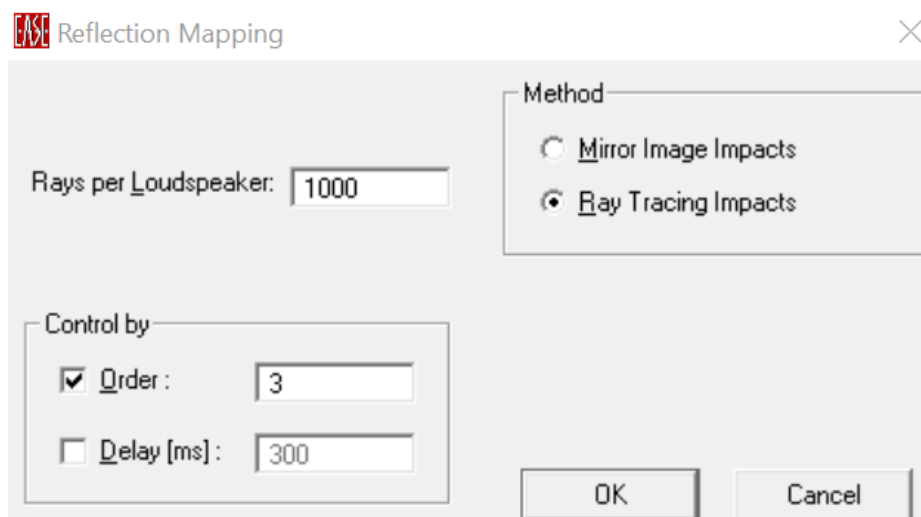
Dále byl nastaven hluk pozadí na 30 dB ve všech třetinooktávových pásmech pro simulaci běžného provozu učebny. Tato hodnota hlukového pozadí byla nastavena ve všech simulacích. Po provedení simulace byla získána doba dozvuku v jednotlivých měřicích bodech M1 – M8. Program spočítal i průměrnou dobu dozvuku ze všech měřicích bodů v jednotlivých třetinooktávových pásmech. Data následně byla vyexportována do excelovského souboru a porovnána s výsledky měření. Výsledek lze vidět na Obr. 47.



Obr. 47: Porovnání průměrné naměřené a simulované doby dozvuku

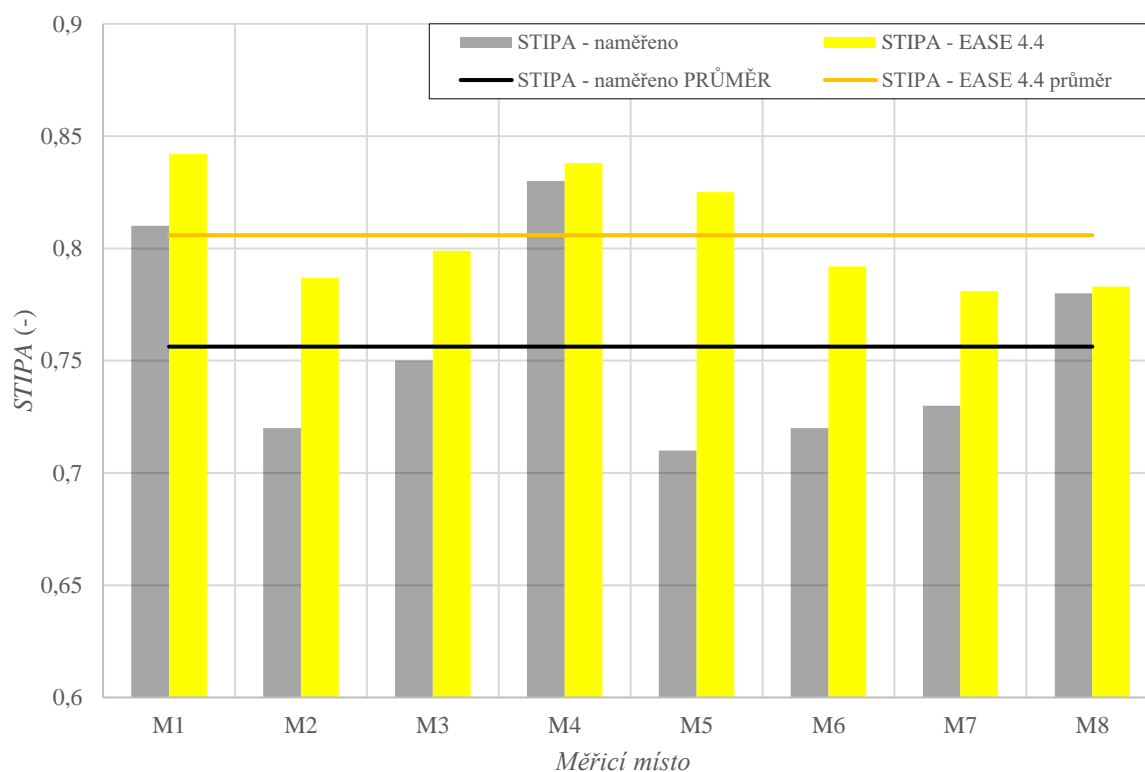
Ze získané závislosti je patrné, že z hlediska průměrné doby dozvuku byl tento model, po několika iteracích volby činitelů zvukové pohltivosti jednotlivých materiálů, nastaven velmi dobře. Největší rozdíl nastal v pásmu 250 Hz, kde se křivky odlišují o hodnotu 0,04 sekundy (tedy méně než 10%), což značí v tomto ohledu opravdu dobrou shodu. Vytvořený model lze tedy dále využít k predikci funkce dalších zamýšlených akustických úprav.

Další simulací, která byla ve výchozím stavu s osazeným stropním obkladem provedena, byla simulace měření indexu srozumitelnosti STIPA. Pro simulaci bylo využito funkce standardního mapování prostoru s odrazy (Standard with Reflections), kde bylo potřeba provést opět nastavení simulace. Parametry simulace byly definovány tak, že má být reproduktorem vygenerováno 1000 paprsků (Rays per Loudspeaker). Během simulace byly uvažovány odrazy nejvýše 3. řádu (Order). Nastavení simulace lze vidět na Obr. 48.



Obr. 48: Nastavení simulace měření STIPA (funkce Standard with Reflections)

Po provedení simulace bylo možné vybrat měřenou veličinu *STI*, kde byla následně zvolena metoda STIPA. Po dokončené simulaci, byl vyobrazen model s jednotlivými náměry v poslechových místech a potřebná data byla vyexportována do programu Excel. V grafu na Obr. 49 jsou vidět naměřené hodnoty STIPA v porovnání s těmi, které byly spočítány při simulaci.

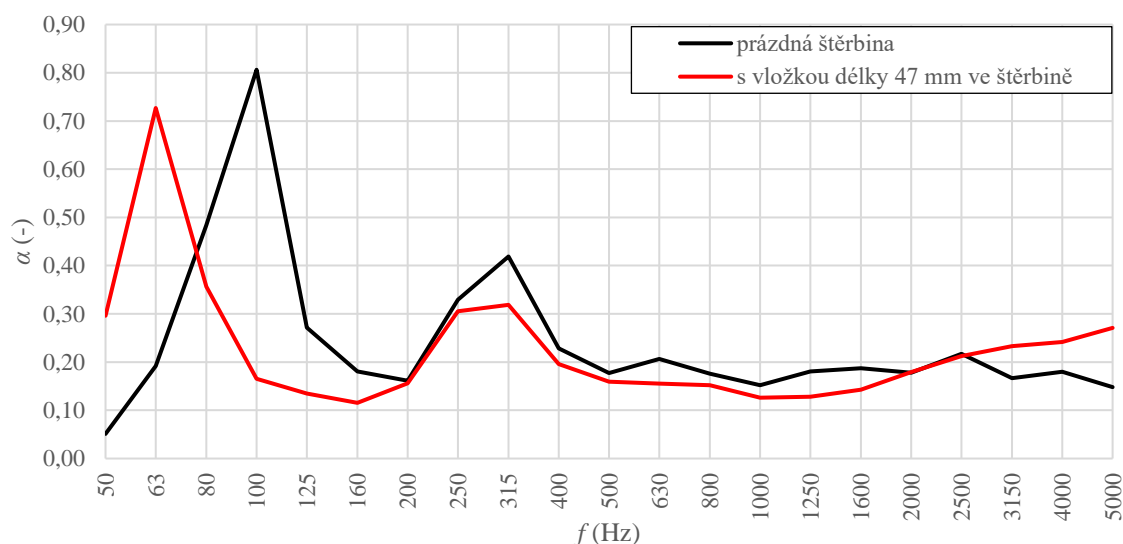


Obr. 49: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot STIPA (výchozí stav)

Nejvyšší hodnoty indexu srozumitelnosti STIPA bylo dosaženo v měřicích bodech M1 a M4. V bodě M1 je toto velmi žádané, jelikož se jedná o hlavní poslechové místo. Srozumitelnost by zde tedy měla být v rámci místnosti co největší. V měřicích bodech M1, M4 a M8 bylo dosaženo téměř stejných hodnot, jak při simulaci, tak při reálném měření. V měřicích bodech M2, M3, M5, M6 a M7 je však rozdíl mezi reálným náměrem a simulací vyšší než 5 %. V případě měřicího bodu M5 je rozdíl dokonce cca 14 %. Jelikož se tyto měřicí body nachází v blízkosti akusticky složitě definovatelného vybavení po obvodu místnosti, chyba je pravděpodobně způsobena zjednodušením právě této části modelu (kvádrové stoly). Zjednodušený tvar tak ovlivňuje odrazy zvukových paprsků dopadajících na měřicí body čímž vznikl rozdíl mezi náměry a hodnotami získanými při simulaci. Celkově však lze říci, že je přesnost simulace přijatelná, jelikož se průměrné hodnoty srozumitelnosti liší o méně než 10 %.

7.3 Simulace místnosti EK 708 – stropní obklad

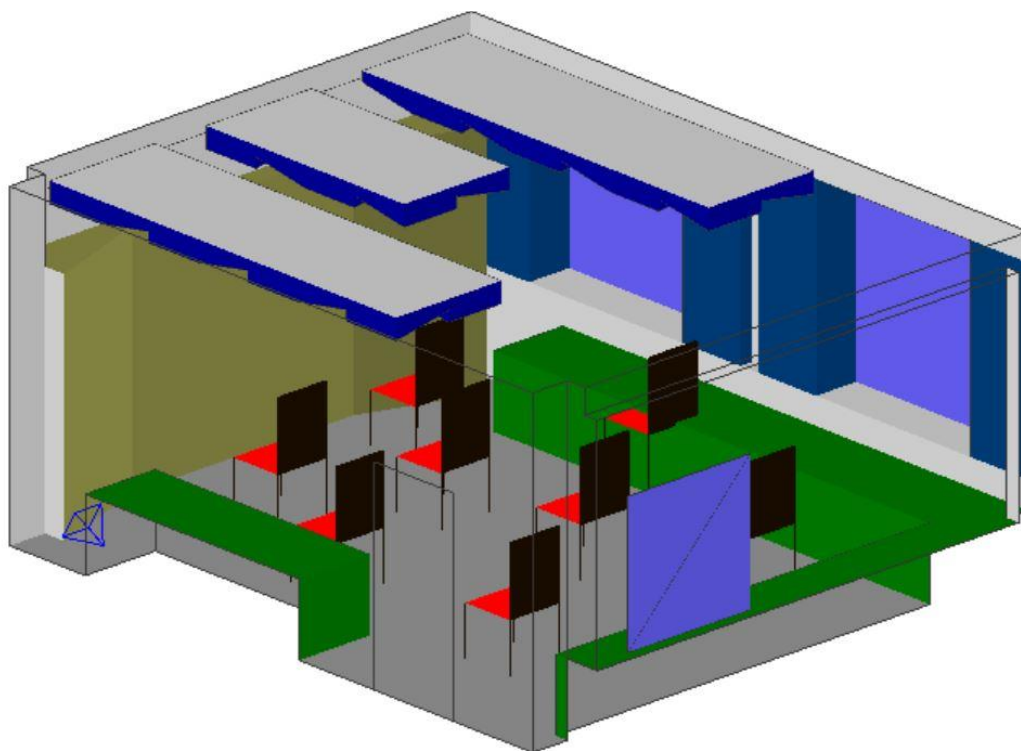
Na strop je plánováno osadit 36 šterbinových rezonátorů s charakteristickým zkosením (viz Obr. 62). Rezonanční kmitočet šterbinového rezonátoru v základním stavu je 100 Hz. Do hrdla rezonátoru může být umístěna dřevěná vložka která posouvá rezonanční kmitočet níže (např. 47 mm vložka na 63 Hz). Pohltivost tohoto stropního obkladu byla naměřena již dříve v dozvukové komoře. Porovnání pohltivostí obou variant je vyobrazeno v grafu na Obr. 50. Tyto hodnoty byly přidány do databáze materiálů a dále použity pro simulace.



Obr. 50: Pohltivost šterbinového rezonátoru v základním stavu (černě) a s osazenou dřevěnou vložkou ve šterbině (červeně) v závislosti frekvenci

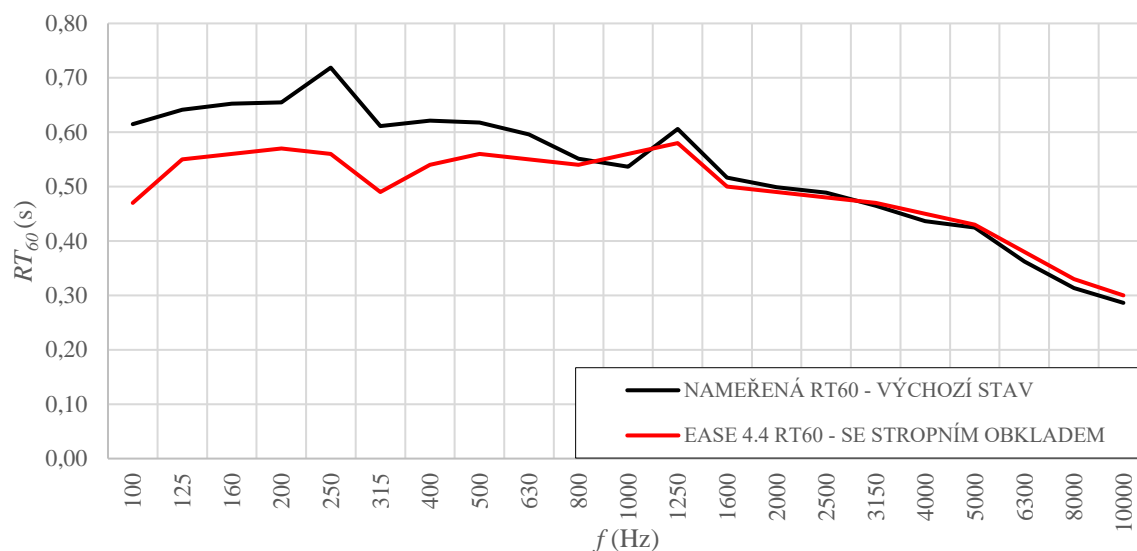
Pro přiblížení se co nejvíce k realitě byly kazety modelovány i s jejich charakteristickým zkosením, které by mělo ve výsledku přispět k rovnoměrnějšímu rozložení akustického pole

v místnosti. Toto zkosení bude mít vliv na odrazy zvukových paprsků i při reálných měřeních. V provedené simulaci zkosení také ovlivňuje odrazy paprsků směrem do místnosti a jelikož byl proveden výpočet v bodech, je nutné aby do měřicích míst dopadaly nejlépe stejné zvukové paprsky, jako ty při reálném měření. Model použitý pro simulaci vlivu stropního obkladu lze vidět na obrázku Obr. 51. Nastavení simulace bylo totožné, jako pro simulaci měření doby dozvuku ve výchozím stavu.



Obr. 51: Model místnosti se stropním obkladem po simulaci měření doby dozvuku

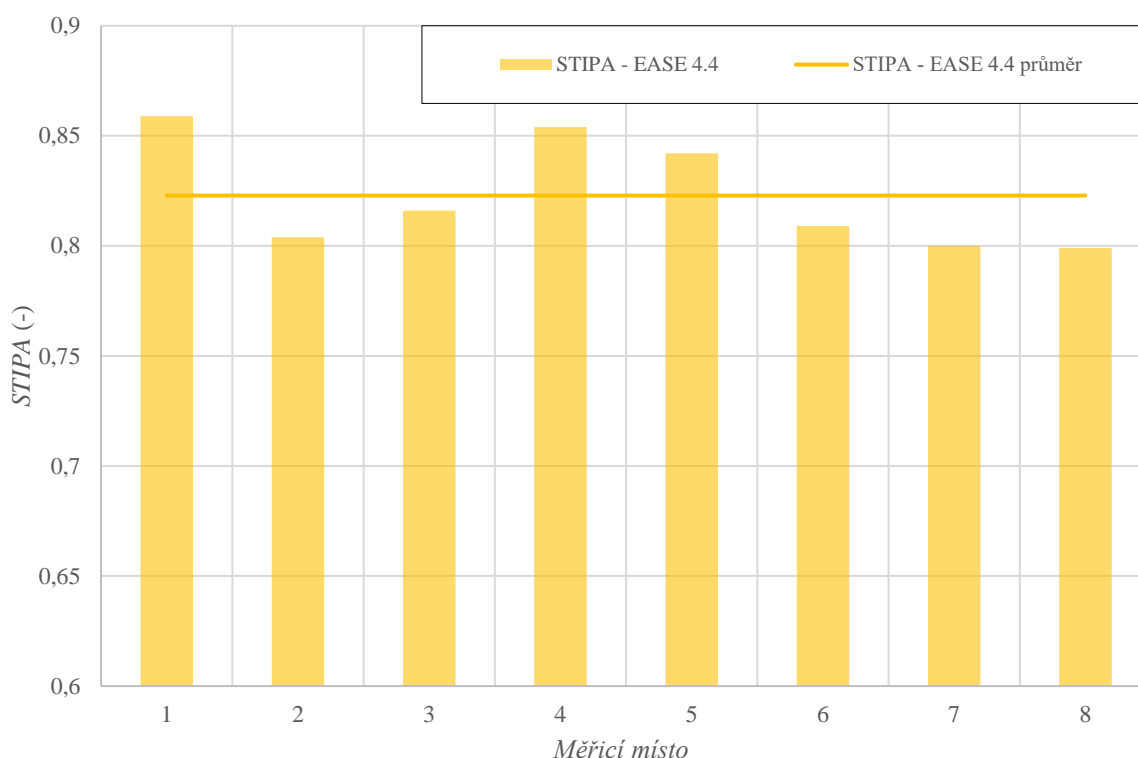
Graf na Obr. 52 porovnává naměřenou průměrnou dobu dozvuku ve výchozím stavu se simulovanými hodnotami po osazení stropu v modelu. Při srovnání s náměrem pořízeným ve výchozím stavu je zkrácení doby dozvuku v pásmech, kde je účinný stropní obklad dobře znatelné. V oblasti 100 Hz až 630 Hz doba dozvuku poklesla až o 0,16 s. To však na dosažení doby dozvuku požadované normou [13] a specifikací [25] stále nestačí.



Obr. 52: Reálná a simulovaná průměrná doba dozvuku v závislosti na frekvenci

Dále byla v tomto stavu modelu provedena simulace měření indexu srozumitelnosti STIPA. Nastavení simulace bylo totožné, jako při simulaci ve výchozím stavu (viz Obr. 48). Po provedené simulaci byla získaná data opět vyexportována do programu Excel.

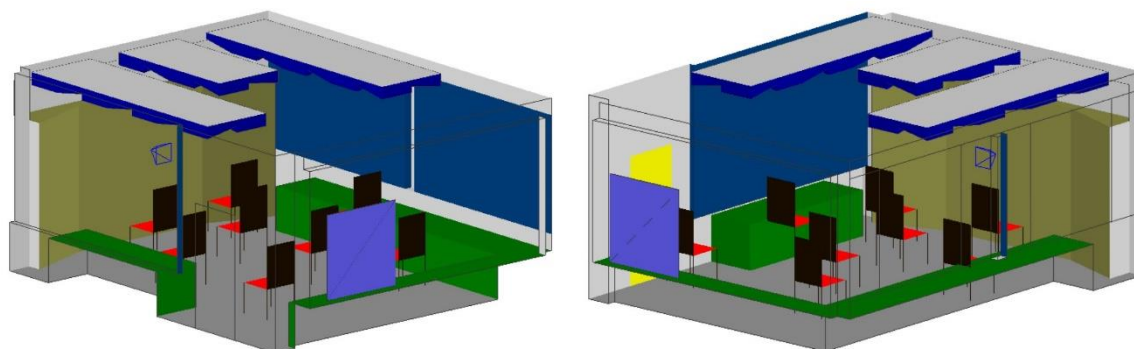
Oproti měření, které bylo provedeno ve výchozím stavu, je patrné, že průměrná hodnota srozumitelnosti STIPA díky realizaci stropního obkladu stoupla až na 0,82. V hlavním poslechovém místě (M1) dle simulace je hodnota indexu STIPA dokonce 0,88 a dle modelu je tedy v tomto měřicím bodě dosaženo celkově nejlepší srozumitelnosti. Výsledný graf se všemi získanými hodnotami pomocí simulace v měřicích bodech M1 – M8, lze vidět na Obr. 53. Ze získané závislosti pomocí simulace je zřejmé, že celková srozumitelnost v místnosti EK708 vzrostla. Další fakt, který lze pozorovat, je snížení rozdílů mezi jednotlivými měřicími místy, což naznačuje, že stropní obklad v modelu přispěl k rovnoměrnějšímu rozložení akustického pole místnosti.



Obr. 53: Simulované hodnoty STIPA v měřicích bodech (po osazení stropu)

7.4 Simulace místnosti EK708 – boční stěny

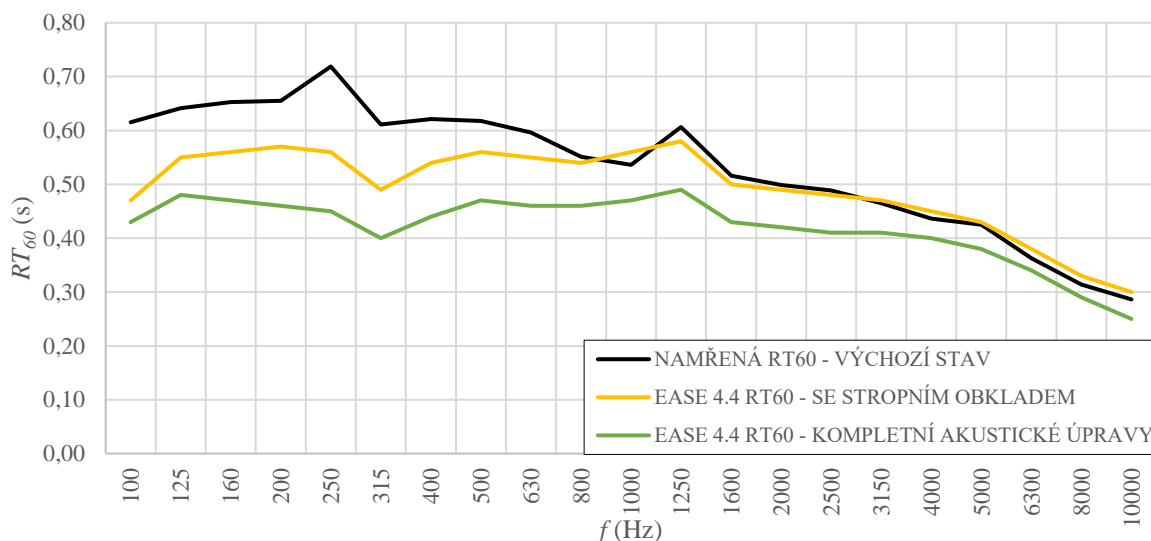
Protože ani instalace stropního obkladu nevede ke snížení doby dozvuku do požadovaných mezí, je potřeba počítat s dalšími úpravami. Zároveň je potřeba umístit pohltivé prvky také na boční stěny, aby nedocházelo k nežádoucím odrazům zpět do středu místnosti (k hlavnímu poslechovému místu). Nejjednodušším řešením pro stěnu s oknem je použití těžkého akustického závěsu. Pro zachování symetrie akustických úprav vůči poslechovému místu bude stejný závěs instalován také na druhou boční stěnu. Závěs bude od stropu po výšku stolů, aby bylo možné zachovat pracovní místa podél stěn. Závěsy bude možné shrnout do výklenků vedle rezonátoru a tím jednoduše snížit pohltivost prostoru během přednášek. V rámci dalších úprav byl model místnosti se stropním obkladem rozšířen právě o zmíněné závěsy. Finální řešení modelu místnosti EK708 v programu EASE 4.4, v rámci této diplomové práce, je vyobrazeno na Obr. 54.



Obr. 54: Finální řešení modelu místnosti EK708 (pohled zleva a zprava)

Po zatažení okenních závěsů a přidání závěsu na stěnu se dveřmi, byly opět provedeny simulace doby dozvuku, indexu srozumitelnosti STIPA a navíc oproti předchozím kapitolám, měření rozložení akustického pole na zvolené poslechové ploše.

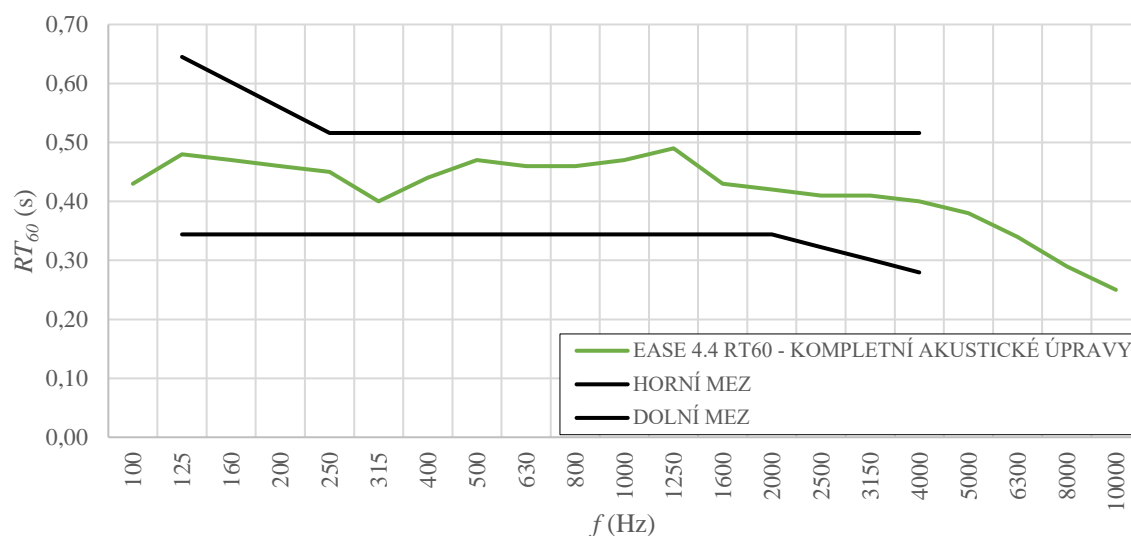
Vypočítanou závislost doby dozvuku na frekvenci se stropním obkladem a bočními závěsy lze vidět v porovnání s průměrnou naměřenou dobou dozvuku ve výchozím stavu a získanou dobou dozvuku ze simulace se stropním akustickým obkladem na Obr. 55.



Obr. 55: Závislost reálné a simulované průměrné doby dozvuku na frekvenci

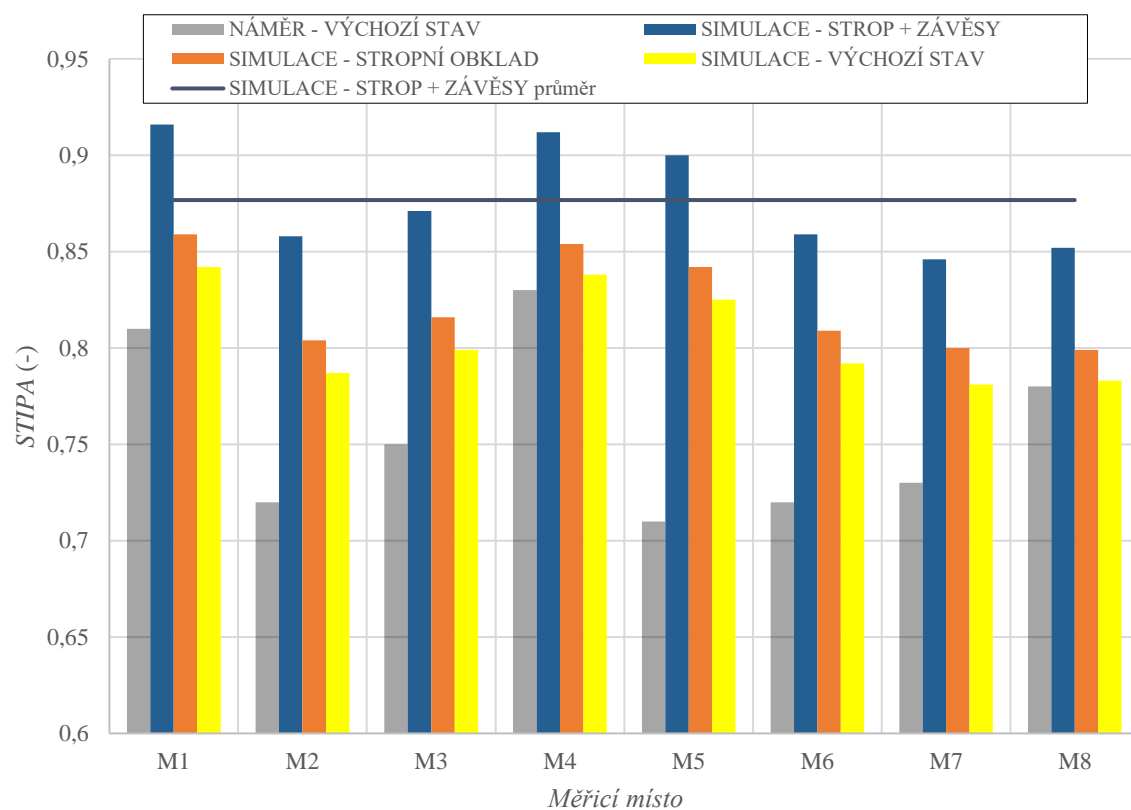
Ze simulace vychází, že doba dozvuku se po instalaci výše uvedených úprav sníží napříč všemi třetinooktávyovými pásmy na průměrnou hodnotu 0,42 s.

Z grafu na Obr. 56 je patrné, že zamýšlenými úpravami bude možné dosáhnout doby dozvuku požadované normou [13], pro multimediální učebny $T_0 = 0,43$ s. Pro dosažení doby dozvuku pro poslechové místnosti s vícekanálovým audiosystémem (0,2 s) by bylo potřeba realizovat další akustické úpravy. Pro další úpravy je volná ještě plocha celé zadní stěny a zadní část stropu (celkem cca 23 m²).



Obr. 56: Zavislost průměrné doby dozvuku na frekvenci ($T_0 = 0,43$ s)

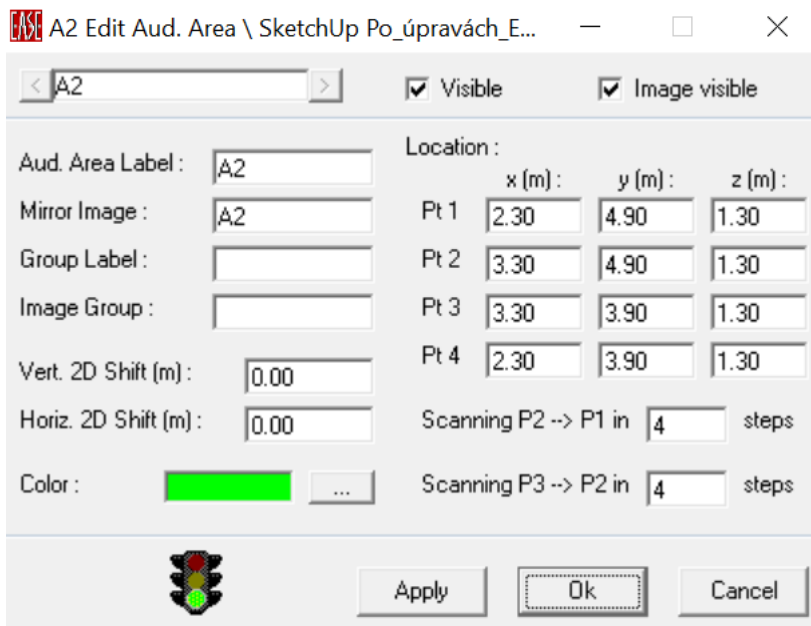
V tomto stavu modelu byl proveden i výpočet srozumitelnosti STIPA, jehož výsledky lze vidět na Obr. 57 v porovnání s náměrem ve výchozím stavu a hodnotami získanými při předchozích simulacích. Dle předpokladu vycházejícího ze simulovaného měření doby dozvuku, která poklesla, index srozumitelnosti STIPA vzrostl poměrně na všech měřicích místech.



Obr. 57: Porovnání všech získaných hodnot STIPA

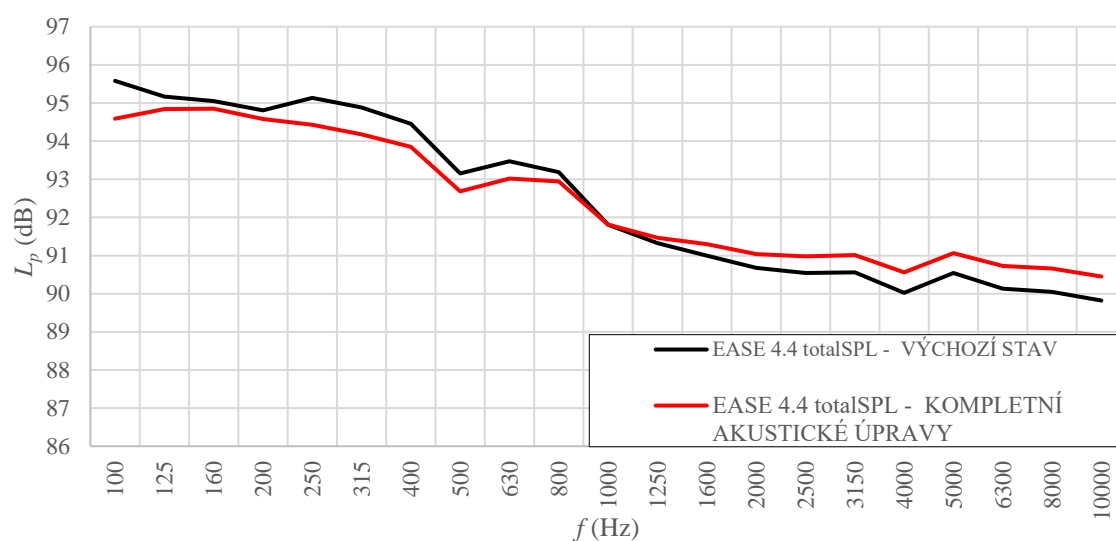
Při simulaci se všemi provedenými akustickými úpravami modelu, bylo nejvyšších hodnot indexu srozumitelnosti STIPA dosaženo v měřicích bodech M1 a M4 (stejně jako ve všech ostatních případech). Po reálném provedení úprav (osazení stropu a závěsů) by v bodě M1 měla být dle simulací hodnota STIPA největší ze všech měřicích míst (0,916). Vysoká hodnota indexu STIPA v bodě M4 je pravděpodobně ovlivněná polohou měřicího bodu, která je v těsné blízkosti modelu reproduktoru. Hodnota získaná v měřicím bodě M5 také dosahuje vysoké hodnoty (0,9), kdy se místo nachází stále v poměrně těsné blízkosti modelu reproduktoru. Měřicí bod M3 se nachází v místnosti dále od modelu reproduktoru, nicméně téměř v jeho ose, proto je zde hodnota indexu STIPA 0,87, což je stále vysoká hodnota. V měřicích bodech M2, M6, M7 a M8 jsou hodnoty mírně nižší, přesto se stále jedná o velmi vysoké hodnoty. Z grafu na Obr. 57 je také vidět vyrovnaní rozdílů mezi vypočítanými hodnotami STIPA, po provedených úpravách modelu.

Poslední provedenou simulací ve finální verzi modelu místnosti EK708, je simulace mapování rozložení akustického pole na ploše, kde se velmi pravděpodobně budou posluchači nacházet. Mapování bylo pro porovnání provedeno i v modelu ve výchozím stavu. Do modelů byla namísto původních měřicích modů M1 až M8 přidána plocha A1 a A2. Pro tuto simulaci byly použity 2 reproduktory ve stereo konfiguraci vůči hlavnímu poslechovému místu, které se nachází i uvnitř poslechové plochy A1 a A2. Jako model reproduktorů byl opět použit EV ETX - 10P.



Obr. 58: Lokace poslechové plochy A2

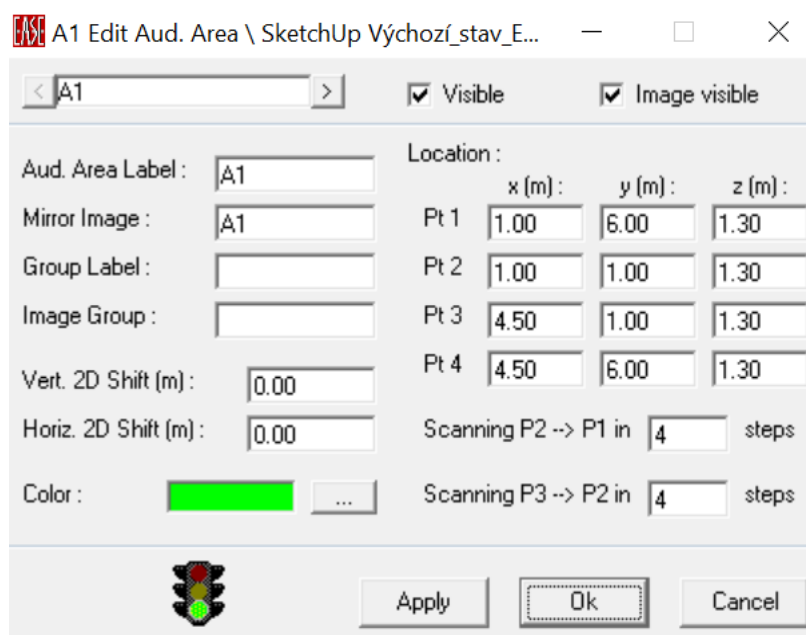
V první fázi byla provedena simulace měření průměrné hladiny akustického pole na ploše A2 o rozměrech 1x1 m, kdy střed této plochy bylo hlavní poslechové místo M1. Rozlišení při výpočtu bylo nastaveno na hodnotu 0,4 m. Ostatní parametry simulace byly nastaveny, jako je vyobrazeno na Obr. 48. Po provedení simulace ve výchozím stavu a s kompletními akustickými úpravami, byly výsledné průměrné hladiny akustického tlaku v závislosti na jednotlivých zkoumaných třetinoctávných pásmech vyneseny do grafu na Obr. 59. Z grafu vychází, že po provedení všech akustických úprav, by se tato frekvenční charakteristika v okolí poslechového místa měla více vyrovnat.



Obr. 59: Průměrné hladiny akustického tlaku v závislosti na frekvenci (na ploše A2)

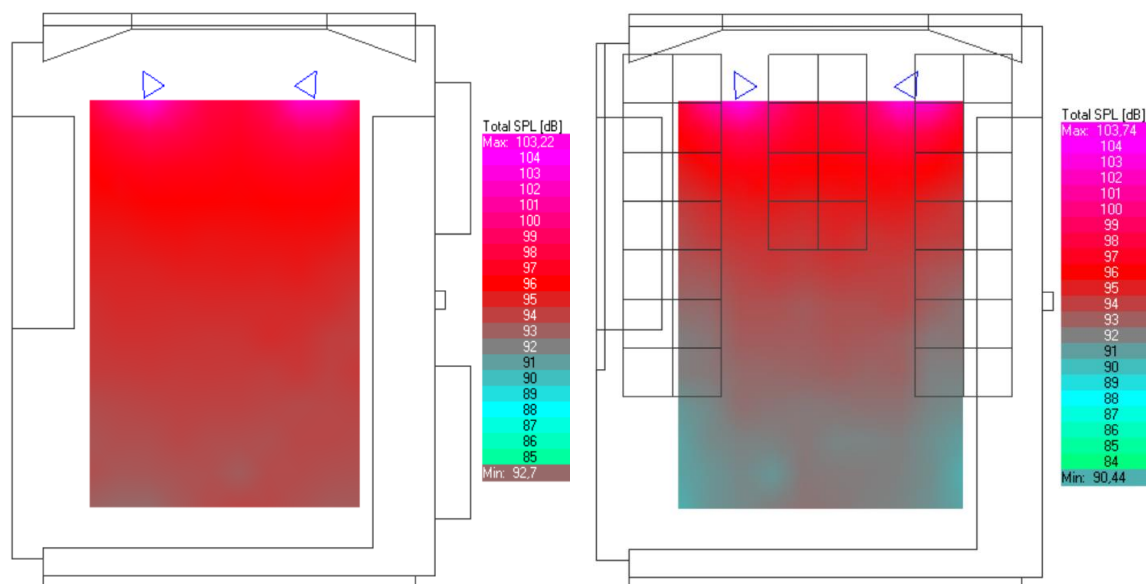
V závislosti na Obr. 59 je patrný mírný nárůst hladiny akustického tlaku ve třetinoctávných pásmech 1250 Hz až 10 kHz. Obecně ale lze říci, že při vyšších frekvencích (500 Hz a více) je znatelné větší ztlumení prostoru oproti frekvencím nižším.

V další fázi těchto simulací bylo provedeno samotné mapování rozložení akustického pole na poslechové ploše A1 (viz Obr. 60). Rozlišení simulace bylo nastaveno na hodnotu 0,4 m, ostatní parametry simulace byly opět nastaveny, jako při simulaci s plochou A2.



Obr. 60: Lokace poslechové plochy A1

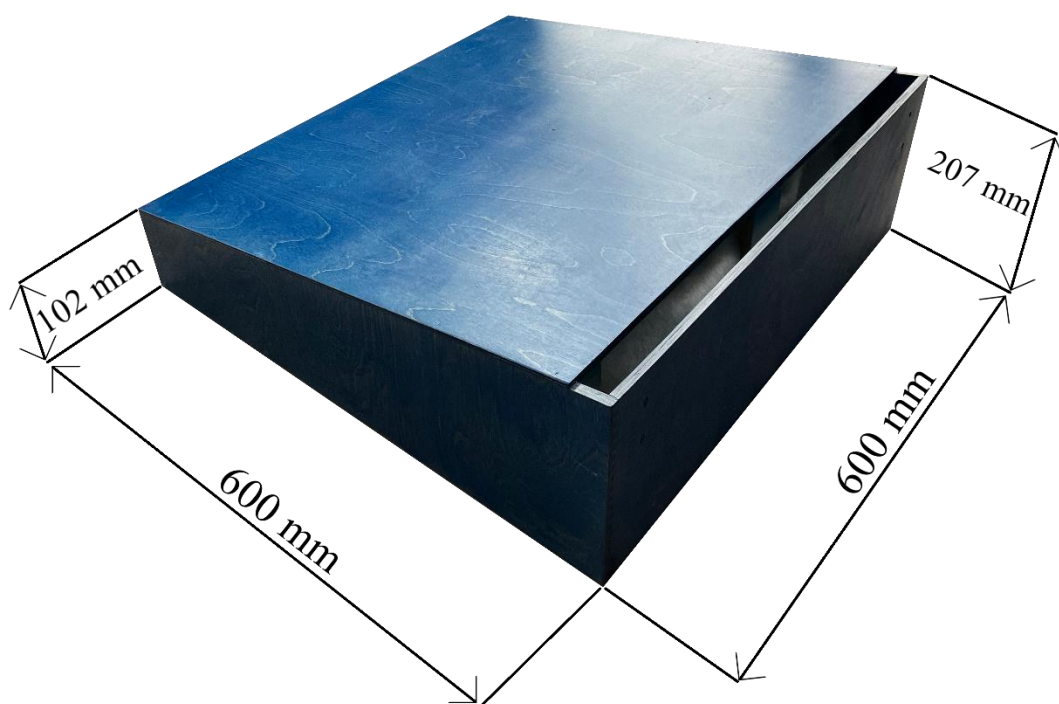
Výsledkem simulace jsou mapy rozložení akustického pole na dané poslechové ploše. Zde v textu práce je uvedena ukázka map pro třetinooktávové pásmo 100 Hz modelu místnosti s kompletními akustickými úpravami (vpravo) a ve výchozím stavu (vlevo) na Obr. 61. Mapy pro třetinooktávová frekvenční pásma 1000 Hz a 10 kHz jsou uvedeny v přílohách Příloha 4 až Příloha 9.



Obr. 61: Mapy rozložení akustického pole pro třetinooktávové pásmo 100 Hz

8 Dodatečné akustické úpravy v místnosti EK708

Z výchozích měření v místnosti EK708 vyplývá, že je nutné realizovat další akustické úpravy. Úpravy by měly zlepšit celkový komfort poslechu hudby a mluveného slova, což potvrzují i kapitoly 7.3 a 7.4, které se zabývaly modelováním těchto situací. Návrhem úprav této místnosti se už zabývalo několik diplomových prací [34][37][40], v rámci jedné z nich byl navržen a vyroben štěrbínový rezonátor s laditelnou rezonanční frekvencí 50 až 100 Hz. Každá kazeta má štěrbinu o rozměrech 582 x 27 mm, kterou je možné osadit vložkou a tím posunout rezonanční frekvenci níže. Celkový objem dutiny kazety je 48 dm³ a je částečně vyplněn pohltivým porézním materiálem. Štěrbínový rezonátor lze vidět na Obr. 62.



Obr. 62: Štěrbínový rezonátor určený pro stropní obložení

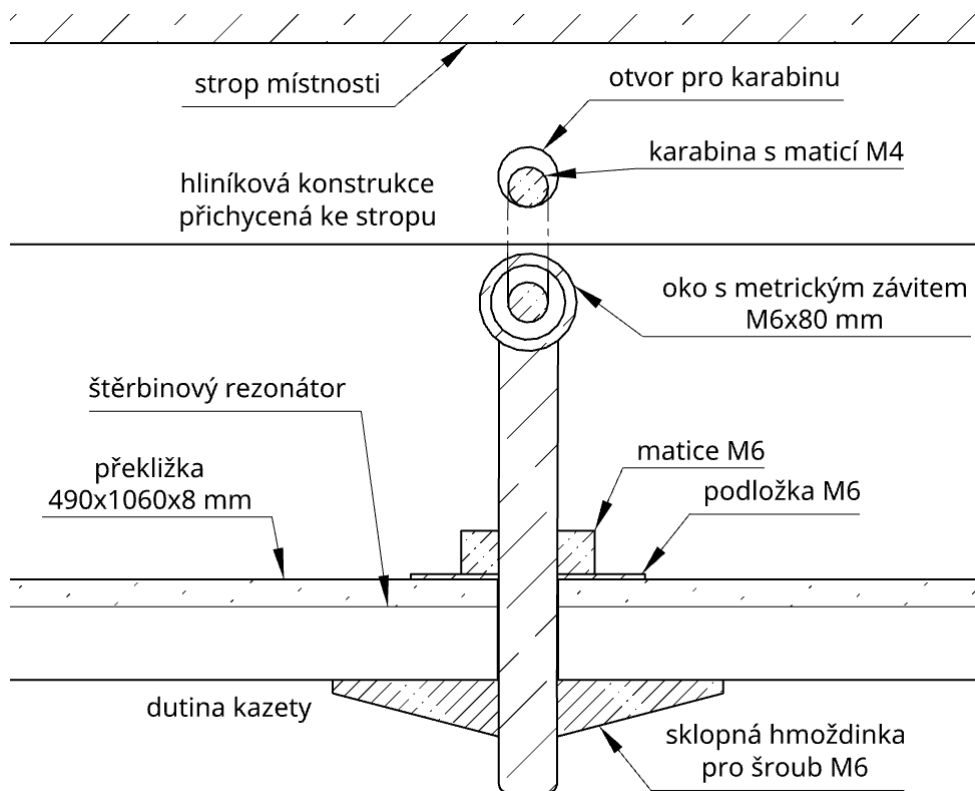
Tato kapitola se dále zabývá finálním řešením uchycení kazet ke stropu. Realizace stropního obkladu by měla napomoci rovnoměrnějšímu rozložení zvukového pole a snížit dobu dozvuku v pásmu nízkých frekvencí.

8.1 Realizace stropního akustického obkladu

Již v kapitole 7.3 byla řeč o stropním obkladu v souvislosti s modelováním a simulacemi. Ze simulací vychází, že kazety by opravdu měly napomoci snížení doby dozvuku na nižších kmitočtech, což naznačuje i závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci viz Obr. 50. V kapitole 7.4 je poté ověřeno, že stropní obklad se svým charakteristickým zkosením

přispěje i k rovnoměrnější frekvenční amplitudové charakteristice audiosystému. Navíc při simulacích bylo ověřeno rozmístění stropního obkladu, které je nastíněno i v rámci této kapitoly.

Při fyzické realizaci stropního obkladu bylo nejprve nutné vyřešit umístění a zavěšení akustických kazet pod strop místnosti. Hmotnost jedné samotné kazety je 6,7 kg. Celkem bude použito 36 kazet ve 3 oddělených sekcích. Topologické uspořádání způsobu uchycení sestavy na hliníkovou stropní konstrukci je vyobrazeno na Obr. 63.



Obr. 63: Způsob uchycení sestavy ke hliníkové nosné konstrukci

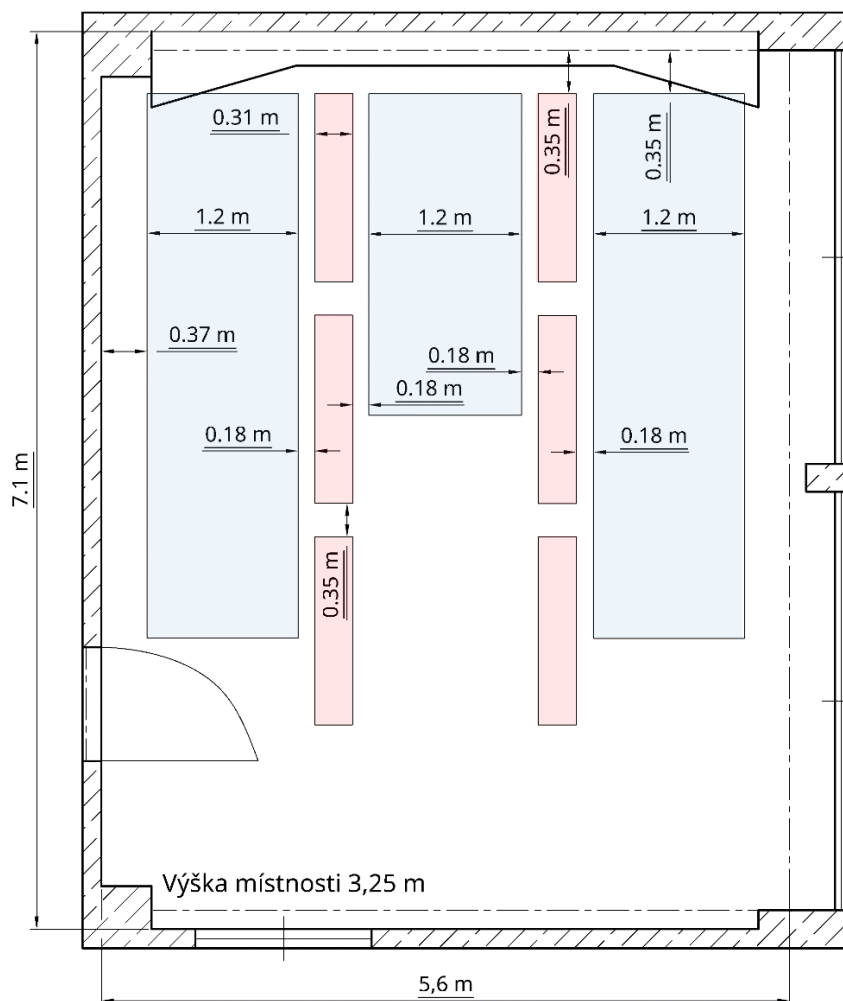
Dvojice kazet tvoří jednu sestavu. Kazety jsou spojeny dřevěnou překližkou o rozměrech 490 x 1060 x 8 mm. Překližka byla připevněna ke šestiřtinovým rezonátorům pomocí vrtů vrtaných do příček uvnitř rezonátorů na 12 místech celé sestavy. Poté byly vyvrtány do sestavy 4 otvory skrz překližku až do dutiny rezonátoru. Do těchto otvorů byla následně umístěna sklopná hmoždinka natočená na závitovém oku M6. Sestava je zavěšena za oka a závitové karabiny na hliníkovou konstrukci, která je určena pro připevnění na strop. Utěsnění otvoru kolem sklopné hmoždinky k rezonátoru poté zajišťovala podložka a matice M6. Velkou výhodou tohoto univerzálního způsobu uchycení je, že v případě, že by bylo potřeba zaměnit šestiřtinové rezonátory za jiný typ akustického obkladu, univerzální uchycení

tuto manipulaci bezproblémově umožňuje. Prototyp sestavy uchycený na nosné hliníkové konstrukci lze vidět na Obr. 64.



Obr. 64: Fotografie uchycené sestavy na hliníkovém rámu

Po vyhotovení prototypové sestavy, která se jeví jako dostatečně pevná (nedochází k průhybu), bylo na základě provedených simulací (viz kapitola 7) ověřeno rozmístění a uspořádání kazet na stropě jako vhodné. Obklady na stranách místnosti (u oken a u stěny s dveřmi) budou tvořeny celkem 7 sestavami (14 štěrbinových rezonátorů). Každá z těchto dvou sekcí má mít na délku 4,2 m a na šířku 1,2 m. Třetí stropní obklad bude umístěn uprostřed místnosti mezi stávajícími světly. Ten bude tvořen celkem čtyřmi sestavami (8 štěrbinových rezonátorů) a bude se tedy rozkládat na ploše o délce 2,4 m a šířce 1,2 m. Rozložení stropních obkladů na stropě v místnosti EK708 přibližuje půdorys vyobrazený na Obr. 65.



Obr. 65: Rozložení stropního obkladu (světle modrá) vůči světlům (světle červená)

Tabulka 7 uvádí jednotlivé části sestavy, jejich rozměr, potřebný počet kusů a orientační cenu pro znalost hrubých nákladů na kompletní stropní obložení.

Tabulka 7: Materiál potřebný pro sestavy kazet s orientačními cenami

Položka	Počet (ks)	Rozměr	Orientační cena
deska z překližky	18	490 x 1060 x 8 mm	7456 Kč: 4 desky, 2500 x 1250 x 8 mm
vrut do dřeva s půlkulatou nebo čočkovou hlavou	236	rozměr 4 x 40 mm	300 Kč / 500 ks
sklopná hmoždinka	76	pro šroub M6	659 Kč / 100 ks
oko s metrickým závitem	84	M6 x 80 mm	377 Kč / 100 ks
podložka velká	76	pro šroub M6	66 Kč / 100 ks
matice M6	76	běžná	16 Kč / 100 ks
karabina s maticí	76	M4	690 Kč / 100 ks
štěrbinový rezonátor	36	6,8 kg jedna kazeta	-
ORIENTAČNÍ CENA CELKEM			9564 Kč

Závěr

Tématem této diplomové práce bylo řešení prostorové akustiky poslechové místnosti. V teoretické části byly nadefinovány základní parametry související s návrhem poslechových místností, které je potřeba velmi dobře znát a chápat, aby bylo samotné řešení prostorové akustiky uzavřených prostorů vůbec možné. Dále se práce zabývá jednotlivými možnostmi akustických obkladů, doporučeními norem a specifikací týkajících se akustiky uzavřených prostorů a modelováním akustických polí v programu EASE 4. Na základě znalosti této teorie bylo možné přistoupit k samotné realizaci praktické části.

V praktické části této práce bylo nejprve provedeno měření doby dozvuku a indexu srozumitelnosti STIPA. Co se týká srozumitelnosti, místnost EK708 dosahovala výborných výsledků již ve výchozím stavu. V případě doby dozvuku však místnost dle příslušných požadavků norem a specifikací uvedených v teorii, požadované doby dozvuku nedosahuje. Na základě tohoto měření bylo rozhodnuto o realizaci dodatečných akustických úprav prostoru, které povedou ke zlepšení kvality poslechu. Nejprve však byly tyto akustické úpravy ověřeny pomocí simulací provedených v programu EASE 4.4. Pro poměrně přesné naladění modelu místnosti ve výchozím stavu posloužila právě reálná měření ve výchozím stavu, kdy byl model naladěn zejména na dobu dozvuku. V dalších kapitolách je provedeno rozšíření tohoto modelu o dodatečné plánované akustické úpravy prostoru, nejprve ve formě stropního obkladu tvořeného štěrbínovými rezonátory. Pomocí provedených simulací byl ověřen pozitivní vliv samostatného stropního obložení štěrbínovými rezonátory, na výslednou dobu dozvuku, která poklesla z původní průměrné hodnoty napříč všemi třetinooktávovými pásmy 0,57 s na 0,49 s. Stropní obklad bude mít po jeho realizaci pozitivní vliv i na srozumitelnost v místnosti, což naznačuje nárůst z původní průměrné hodnoty STIPA 0,76, která byla získána reálným měřením, na 0,82, což je průměrná hodnota STIPA, získaná při simulaci s osazeným stropním obkladem. V další fázi byl model opatřen akustickou úpravou ve formě závěsů, které budou v budoucnu osazeny po bocích nízkofrekvenčního laťového rezonátoru a bude je možné rozprostřít po celé délce místnosti. Dle očekávání i tato akustická úprava měla při simulacích pozitivní vliv na dobu dozvuku i index STIPA. Doba dozvuku poklesla na průměrnou hodnotu 0,42 s a index srozumitelnosti STIPA vzrostl na průměrnou hodnotu 0,877. Realizací jak stropního obkladu, tak osazením závěsů by na základě simulací mělo být docíleno požadované doby dozvuku a výborné srozumitelnosti zejména v hlavním poslechovém místě. V rámci poslední kapitoly byla

provedena samotná realizace sestav štěrbinových rezonátorů, určených k stropnímu obložení. Při realizaci sestav stropního obkladu, bylo v rámci této práce vymyšleno univerzální uchycení stropních akustických obkladů, kdy jeho velkou výhodou je, že v případě nutnosti je možné bezproblémově vyměnit štěrbinové rezonátory za jiný typ akustického obkladu.

Seznam obrázků

Obr. 1: Závislost hladiny akustického tlaku na čase (vyobrazení RT_{60}), převzato z [7] ..	3 -
Obr. 2: Závislost činitele útlumu ve vzduchu m na relativní vlhkosti, převzato z [12]....	5 -
Obr. 3: Ilustrační obrázek vysvětlující absorpci zvukové energie, převzato z [7]	6 -
Obr. 4: Schéma měřicího systému impedanční trubice, převzato z [7].....	7 -
Obr. 5: Teoretické spektrum vlastních kmitů v uzavřeném kvádrovém prostoru	13 -
Obr. 6: Zobrazení rozložení akustického tlaku v místnosti.....	13 -
Obr. 7: Meze pro frekv. amplitudovou charakteristiku audiosystému, převzato z [33].	15 -
Obr. 8: Meze pro frekv. amplitudovou charakteristiku audiosystému, převzato z [25]..	15 -
Obr. 9: Frekvenční amplitudová charakteristika audiosystému Deni Zajecar (závislost hladiny akustického tlaku SPL (dB) na frekvenci f (Hz), převzato z [32].....	16 -
Obr. 10: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci s měnící se tloušťkou porézního pohltivého materiálu ze skelných vláken ($1''= 2,54$ cm, $4''= 10,16$ cm), převzato z [7]	18 -
Obr. 11: Vliv odsazení akustického panelu ze skelných vláken (tloušťka $1''=2,54$ cm) od podkladové stěny na činitele zvukové pohltivosti ($0''=$ žádné odsazení, $3''=$ odsazení 7,62 cm od stěny), převzato z [7]	19 -
Obr. 12: Obrázek porézních materiálů pořízený pomocí SEM, převzato z [3].....	19 -
Obr. 13: Ukázka porézních akustických pohltivých materiálů, převzato z [20][21].....	20 -
Obr. 14: Ilustrační obrázek kmitající membrány, převzato z [3].....	21 -
Obr. 15: Závislost činitele zvukové pohltivosti na frekvenci kmitající membrány Modex TM (tlustou čarou – teoretický průběh, tenkou čarou naměřený průběh), převzato z [3].....	21 -
Obr. 16: Konstrukční uspořádání Helmholtzova rezonátoru s jedním otvorem.....	23 -
Obr. 17: Helmholtzův rezonátor s děrovanou sádrokartonovou deskou, převzato z [38]-	23 -
Obr. 18: Poslechové studio se stropním laťovým rezonátorem, převzato z [39]	24 -
Obr. 19: Teoretická závislost laťového rezonátoru, vyhotoveno pomocí [36].....	24 -
Obr. 20: Rozptyl přímého dopadajícího zvukového paprsku, převzato z [7].....	25 -
Obr. 21: Difuzor s periodickým uspořádáním, přepracováno z [5].....	26 -
Obr. 22: RPG difuzor (odrazová fázová mřížka), přepracováno z [5]	26 -
Obr. 23: Vyzařovací diagramy a) RPG, b) hladká odrazivá plocha, převzato z [3].....	27 -
Obr. 24: Příklady reálných difuzorů používaných v praxi (vlevo – RPG difuzor, vpravo rozptylový prvek s různou hloubkou odrazivých ploch), převzato z [23].....	27 -
Obr. 25: Příklad poslechové místnosti s akustickými úpravami, převzato z [24]	28 -
Obr. 26: Optimální doby dozvuku T_0 (s) při objemu místností V (m^3), převzato z [14]	31 -

Obr. 27: Toleranční pásmo naměřené doby dozvuku T (s) vzhledem k optimální době dozvuku T_0 (s) v závislosti na frekvenci, převzato z [14]	32 -
Obr. 28: Toleranční maska pro dobu dozvuku dle specifikace [25], převzato z [25]	33 -
Obr. 29: Multikanálový audiosystém 5.1 dle Dolby Atmos, převzato z [28]	34 -
Obr. 30: Rozložení vícekanálového audiosystému dle [27], převzato z [27].....	35 -
Obr. 31: Obarvení ploch dle hodnoty α (nejtmavší=nejvyšší hodnoty), převzato z [31] -	37 -
Obr. 32: Modelování vlastního reproduktoru v programu EASE 4, převzato z [31]	38 -
Obr. 33: Vizualizace odrazů prvního řádu na zvolené plochy, převzato z [31]	39 -
Obr. 34: Fotografie výchozího stavu místnosti	40 -
Obr. 35: Vyobrazení pozic měřicích mikrofónů a zdroje zvuku v místnosti EK708	41 -
Obr. 36: Graf naměřené doby dozvuku ve výchozím stavu	42 -
Obr. 37: Naměřená průměrná doba dozvuku (T_0 pro toleranční meze je 0,43 s)	43 -
Obr. 38: Optimální doba dozvuku při objemu místností 130 m ³ , převzato z [14]	43 -
Obr. 39: Fotografie umístění reproduktoru pro měření STIPA	44 -
Obr. 40: Naměřené hodnoty STIPA v jednotlivých měřicích bodech spolu s průměrem-	45 -
Obr. 41: Spektrum počátečních vlastních frekvencí v místnosti EK708.....	46 -
Obr. 42: Model místnosti EK708 v programu SketchUp 2017	47 -
Obr. 43: Jiný pohled na model místnosti, upřesňující nutnost použití 2D ploch	48 -
Obr. 44: Závislost pohltivosti α (-) všech ploch v místnosti na frekvenci	49 -
Obr. 45: Model místnosti EK708 v prostředí programu EASE 4.4.....	50 -
Obr. 46: Nastavení simulace pro výpočet doby dozvuku (funkce Local Decay Time)..	50 -
Obr. 47: Porovnání průměrné naměřené a simulované doby dozvuku.....	51 -
Obr. 48: Nastavení simulace měření STIPA (funkce Standard with Reflections)	52 -
Obr. 49: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot STIPA (výchozí stav).....	52 -
Obr. 50: Pohltivost štěrbinového rezonátoru v základním stavu (černě) a s osazenou dřevěnou vložkou ve štěrbině (červeně) v závislosti frekvenci.....	53 -
Obr. 51: Model místnosti se stropním obkladem po simulaci měření doby dozvuku	54 -
Obr. 52: Reálná a simulovaná průměrná doba dozvuku v závislosti na frekvenci.....	55 -
Obr. 53: Simulované hodnoty STIPA v měřicích bodech (po osazení stropu)	56 -
Obr. 54: Finální řešení modelu místnosti EK708 (pohled zleva a zprava).....	57 -
Obr. 55: Závislost reálné a simulované průměrné doby dozvuku na frekvenci	57 -
Obr. 56: Závislost průměrné doby dozvuku na frekvenci ($T_0 = 0,43$ s)	58 -
Obr. 57: Porovnání všech získaných hodnot STIPA	58 -
Obr. 58: Lokace poslechové plochy A2	59 -

Obr. 59: Průměrné hladiny akustického tlaku v závislosti na frekvenci (na ploše A2) .	- 60 -
Obr. 60: Lokace poslechové plochy A1	- 61 -
Obr. 61: Mapy rozložení akustického pole pro třetinooktávové pásmo 100 Hz	- 61 -
Obr. 62: Štěrbínový rezonátor určený pro stropní obložení	- 62 -
Obr. 63: Způsob uchycení sestavy ke hliníkové nosné konstrukci	- 63 -
Obr. 64: Fotografie uchycené sestavy na hliníkovém rámu	- 64 -
Obr. 65: Rozložení stropního obkladu (světle modrá) vůči světlům (světle červená) ...	- 65 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnocení srozumitelnosti dle hodnot ZSS, převzato z [5].....	- 8 -
Tabulka 2: Hodnocení srozumitelnosti dle indexu STI, převzato z [19].....	- 9 -
Tabulka 3: Limity hluku pozadí $L_{p\ max}$ (dB) pro příslušný prostor, převzato z [13].....	- 29 -
Tabulka 4: Optimální objem V_0 (m ³) a optimální doba dozvuku T_0 (s) vybraných prostorů, převzato z [13].....	- 30 -
Tabulka 5: Naměřené hodnoty <i>STIPA</i> a hladiny akustického tlaku L_{Aeq} v měřicích bodech M1 – M8.	- 45 -
Tabulka 6: Plochy jednotlivých pohltivých povrchů v místnosti EK708.....	- 48 -
Tabulka 7: Materiál potřebný pro sestavy kazet s orientačními cenami	- 65 -

Literatura

- [1] SMETANA, Ctirad a kol., 1981. *Praktická elektroakustika*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.
- [2] KRŇÁK, Milan. 1971. *Akustické obklady*. Praha: Výzkumný ústav zvukové, obrazové a reprodukční techniky.
- [3] 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.
- [4] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL, 1980.
- [5] VEVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-1283-6.
- [6] ČSN EN ISO 354. Česká technická norma: *Akustika-měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. 2. vydání. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [7] POHLMANN, Ken C. 2016. *Master Handbook of Acoustics, Seventh Edition*. London, New York: McGraw-Hill Education. ISBN 978-1260473599.
- [8] SALAVA, Tomáš. 1979. *Elektroakustická a elektromechanická měření*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 298 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [9] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: ČVUT, 2002.
- [10] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, Praha, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [11] *Vlnová akustika*. Online. Encyklopedie fyziky. 2006 - 2024. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1202-vlnova-akustika>. [cit. 2024-02-06].
- [12] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 73 0525, *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*. Únor, 1998. Praha, 1998.
- [13] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 73 0526, *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku*. Únor, 1998. Praha, 1998.
- [14] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 73 0527, *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely*. Srpen, 2023. Praha.
- [15] UNMZ. ČSN EN ISO 354, *Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. Listopad 2003. Praha.

- [16] NOLČ, Lukáš. *Určení pohltivosti akustických prvků v dozvukové komoře ve svislé konfiguraci*. Bakalářská práce. Plzeň: FEL ZČU Plzeň, 2022.
- [17] UNMZ. ČSN EN ISO 3382-1, *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Prosinec 2009. Praha.
- [18] *Srozumitelnost řeči*. Online. Saint-Gobain Ecophon. Dostupné z: <https://www.ecophon.com/cz/about-ecophon/acoustic-knowledge/room-acoustic-descriptors/speech-clarity/>. [cit. 2024-03-01].
- [19] ČAS. ČSN EN IEC 60268-16 ed.3, *Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*. Červen 2021.
- [20] *VYUŽITÍ AKUSTICKÝCH MATERIÁLŮ*. Online. Fibertex Nonwovens A/S. 2024. Dostupné z: <https://www.fibertex.com/cs/obchodni-odvetvi/akustika/pouziti>. [cit. 2024-03-08].
- [21] *Advanced Acoustics*. Online. 2024. Dostupné z: <https://advancedacoustics-uk.com/>. [cit. 2024-03-08].
- [22] *Acoustic Melamine Foam*. Online. Marinsu. 2020. Dostupné z: <https://marinsu.com.tr/marka/acousticmelaminefoam>. [cit. 2024-03-08].
- [23] *MUZIKER*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.muziker.cz/>. [cit. 2024-03-16].
- [24] *Acoustic Fields*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.acousticfields.com/>. [cit. 2024-03-16].
- [25] *Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic: EBU Tech. 3276 – 2nd edition*. PDF. 2. EBU UER, 1998.
- [26] UNMZ. ČSN EN ISO 3382-2, *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Únor 2009. Praha.
- [27] *Listening conditions for the assessment of sound programme material: Multichannel sound: EBU Tech. 3276 – E*. PDF. EBU UER, 2004.
- [28] *Dolby Atmos® Home Theater Installation Guidelines*. Online. In: Dolby. 2024. Dostupné z: https://www.dolby.com/siteassets/technologies/dolby-atmos/atmos-installation-guidelines-121318_r3.1.pdf. [cit. 2024-03-21].
- [29] *Technical University of Denmark*. Online. In: JOURNAL OF VIBROENGINEERING. Odeon, 2000, s. 219-224. ISSN 1392-8716. Dostupné z: https://odeon.dk/pdf/Vilnius_2000-rindel.pdf. [cit. 2024-03-22].

- [30] MARC, ARETZ. *Combined Wave and Ray Based Room Acoustic Simulations of Small Rooms: Challenges and limitations on the way to realistic simulation results*. Disertační práce. ISBN 978-3-8325-3242-0. Aachen: RWTH Aachen, 2012.
- [31] *EASE 4 – Predecessor software version of EASE 5*. Online. AFMG. 2024. Dostupné z: <https://www.afmg.eu/en/ease4>. [cit. 2024-03-22].
- [32] An Inconvenient Truth About Room Acoustics (The Myth of The Flat Frequency Response). Online. Acoustics Insider. 2024. Dostupné z: <https://www.acousticsinsider.com/blog/flat-frequency-response?fbclid=IwAR1wWlztD1DAAtWqsZwwUEyrCD0nKxzV7E3L5qFGSFExJeiAAwuEsjAZ4k3M>. [cit. 2024-03-24].
- [33] *Recommendation ITU-R BS.1116-3: Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems*. Online. In: 1211 Geneva 20 Switzerland: ITU, 2024. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-3-201502-I!!PDF-E.pdf. [cit. 2024-03-24].
- [34] LANDGRÁF, Martin. *Akustické úpravy poslechové místnosti*. Diplomová práce. Plzeň: FEL ZČU Plzeň, 2023.
- [35] Speech Intelligibility STI. Online. NTi Audio. 2024. Dostupné z: <https://www.nti-audio.com/en/applications/evacuation-systems/speech-intelligibility-stipa>. [cit. 2024-04-25].
- [36] Acoustic Modelling. Online. 2024. Dostupné z: <http://www.acousticmodelling.com/8layers/>. [cit. 2024-04-26].
- [37] ALTMAN, Jan. *Návrh akustických úprav poslechové místnosti*. Diplomová práce. Plzeň: FEL ZČU Plzeň, 2010.
- [38] Absorbér sádrokartonový Rigips Rigitone 80×1 050×1 800 mm. Online. DEK a.s. 2024. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/3630061005-rigiton-absorber-8-15-20-super-1050x1800mm>. [cit. 2024-05-19].
- [39] Home Studio 101: Secrets For Building The Perfect Studio Space. Online. DEK a.s. 2023. Dostupné z: <https://unison.audio/home-studio/>. [cit. 2024-05-19].
- [40] BALKOVSKÝ, Bronislav. *Návrh akustických úprav poslechové místnosti*. Plzeň: Dostupné z: <https://theses.cz/id/8n69op/>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Oldřich Tureček, Ph.D, 2011.
- [41] Speaker Boundary Interference Response (SBIR). Online. GIK Acoustics. 2009. Dostupné z: <https://gikacoustics.net/speaker-boundary-interference-response-sbir/>. [cit. 2024-05-22].

Seznam Příloh

Příloha 1: Souřadnice měřicích bodů, kde x (cm) je vzdálenost od laťového rezonátoru, y (cm) vzdálenost od postranní stěny bez oken a z (cm) vzdálenost mikrofonu od podlahy	I
Příloha 2: Naměřené doby dozvuku z jednotlivých měřicích pozic spolu s vypočítanou průměrnou hodnotou	I
Příloha 3: Vypočtené vlastní frekvence na počátku frekvenčního pásma (n_x, n_y, n_z (-) jsou módy vlastních kmitů v daném směru).....	II
Příloha 4: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 s kompletními akustickými úpravami pro třetinooktávové pásmo 100 Hz.....	III
Příloha 5: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 ve výchozím stavu pro třetinooktávové pásmo 100 Hz.....	III
Příloha 6: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 s kompletními akustickými úpravami pro třetinooktávové pásmo 1000 Hz.....	IV
Příloha 7: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 ve výchozím stavu pro třetinooktávové pásmo 1000 Hz.....	IV
Příloha 8: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 s kompletními akustickými úpravami pro třetinooktávové pásmo 10 kHz.....	V
Příloha 9: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 ve výchozím stavu pro třetinooktávové pásmo 10 kHz.....	V
Příloha 10: Detailní fotografie uchycení akustického prvku ke hliníkovému rámu.....	VI
Příloha 11: Program pro výpočet vlastních frekvencí kvádrového prostoru.....	X

Přílohy - tabulky

Příloha 1: Souřadnice měřicích bodů, kde x (cm) je vzdálenost od laťového rezonátoru, y (cm) vzdálenost od postranní stěny bez oken a z (cm) vzdálenost mikrofonu od podlahy

Měřicí bod	x (cm)	y (cm)	z (cm)
M1	245	280	130
M2	301	465	130
M3	408	286	130
M4	122	366	130
M5	154	179	130
M6	305	107	130
M7	523	97	130
M8	528	362	130

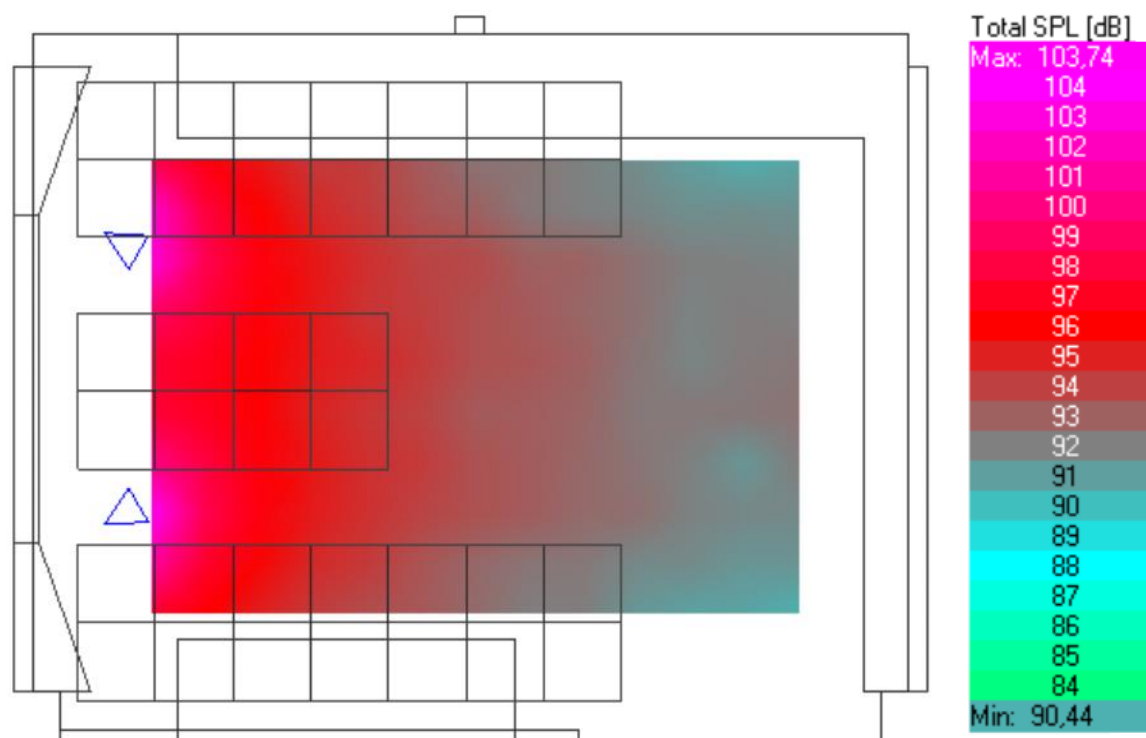
Příloha 2: Naměřené doby dozvuku z jednotlivých měřicích pozic spolu s vypočítanou průměrnou hodnotou

f (Hz)	RT_{60} (s)								PRŮMĚR
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
50	1,23	0,81	0,66	1,39	1,99	-	1,22	0,84	1,16
63	1,22	0,58	1,13	0,83	0,82	0,6	0,67	0,69	0,82
80	0,6	0,5	0,49	0,47	0,6	0,45	0,57	0,45	0,52
100	0,51	0,73	0,62	0,73	0,68	0,5	0,66	0,49	0,62
125	0,63	0,84	0,67	0,5	0,49	0,52	0,95	0,53	0,64
160	0,53	0,63	0,67	0,72	0,77	0,74	0,6	0,56	0,65
200	0,68	0,66	0,82	0,76	0,7	0,53	0,55	0,54	0,66
250	0,75	0,88	0,57	0,79	0,65	0,82	0,62	0,67	0,72
315	0,5	0,49	0,6	0,59	0,79	0,63	0,54	0,75	0,61
400	0,61	0,61	0,57	0,61	0,6	0,66	0,61	0,7	0,62
500	0,55	0,55	0,57	0,67	0,58	0,69	0,67	0,66	0,62
630	0,59	0,65	0,54	0,62	0,56	0,57	0,58	0,66	0,60
800	0,52	0,56	0,54	0,57	0,52	0,53	0,57	0,6	0,55
1000	0,54	0,53	0,56	0,57	0,55	0,58	0,44	0,52	0,54
1250	0,87	0,52	0,53	0,52	0,7	0,58	0,54	0,59	0,61
1600	0,53	0,52	0,6	0,53	0,54	0,5	0,37	0,54	0,52
2000	0,5	0,51	0,49	0,52	0,46	0,5	0,5	0,51	0,50
2500	0,5	0,49	0,46	0,5	0,49	0,49	0,46	0,52	0,49
3150	0,49	0,46	0,43	0,47	0,5	0,46	0,44	0,47	0,47
4000	0,45	0,47	0,41	0,46	0,45	0,46	0,34	0,45	0,44
5000	0,39	0,41	0,37	0,5	0,45	0,39	0,46	0,43	0,43
6300	0,32	0,37	0,36	0,39	0,35	0,36	0,38	0,37	0,36
8000	0,28	0,31	0,32	0,33	0,3	0,31	0,32	0,34	0,31
10000	0,26	0,26	0,31	0,28	0,28	0,3	0,29	0,31	0,29

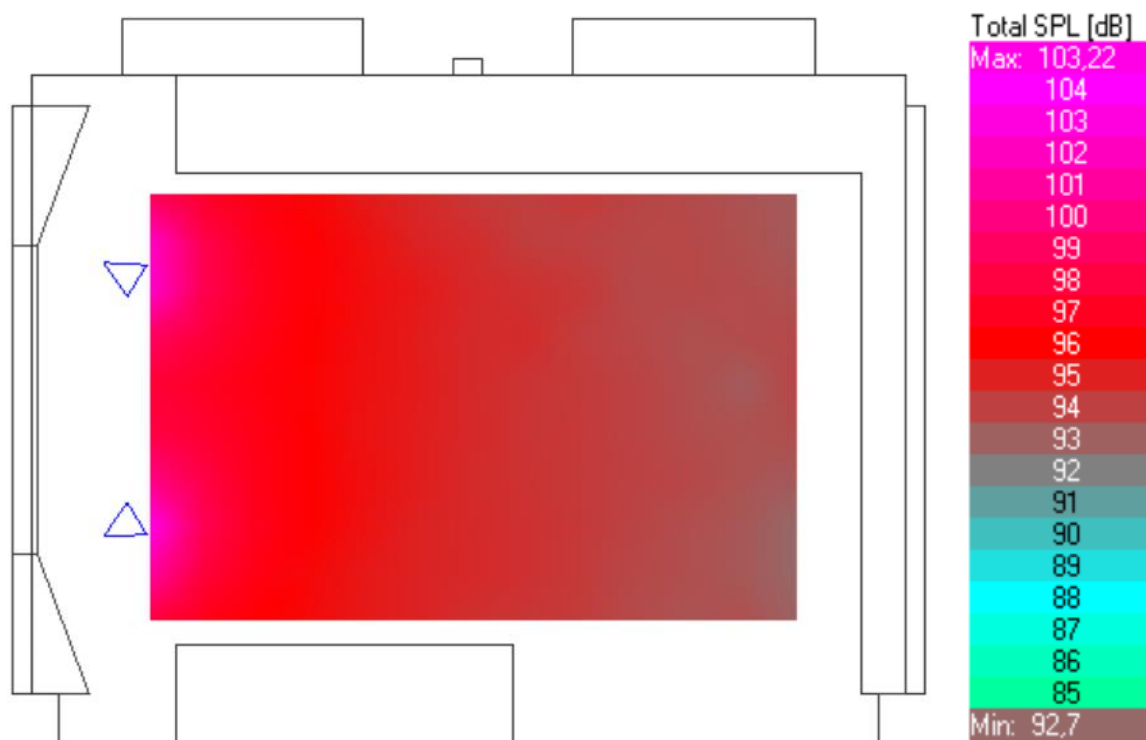
Příloha 3: Vypočtené vlastní frekvence na počátku frekvenčního pásma (n_x , n_y , n_z (-) jsou módy vlastních kmitů v daném směru)

n_x (-)	n_y (-)	n_z (-)	Vlastní frekvence (Hz)
1	0	0	24,2
0	1	0	30,6
1	1	0	39,0
2	0	0	48,3
0	0	1	52,8
2	1	0	57,2
1	0	1	58,0
0	1	1	61,0
0	2	0	61,3
1	1	1	65,6
1	2	0	65,8
2	0	1	71,5
3	0	0	72,5
2	1	1	77,8
2	2	0	78,0
3	1	0	78,7
0	2	1	80,9
1	2	1	84,4
3	0	1	89,6
0	3	0	91,9
2	2	1	94,2
3	1	1	94,7

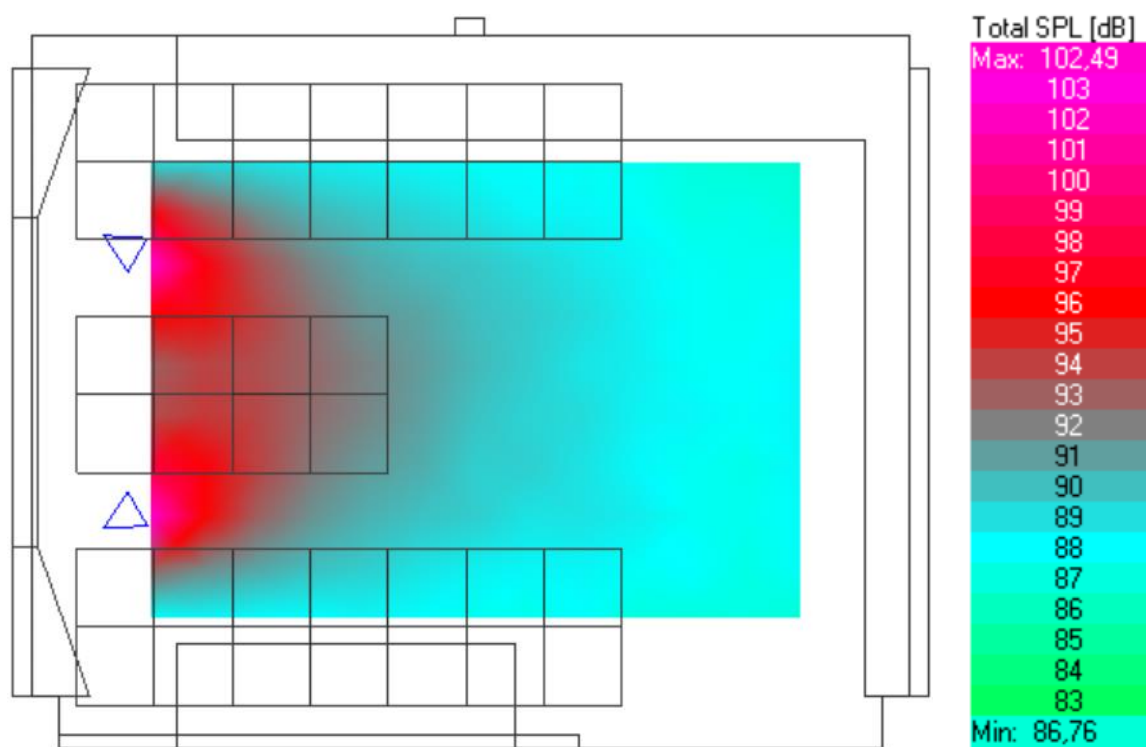
Přílohy - obrázky



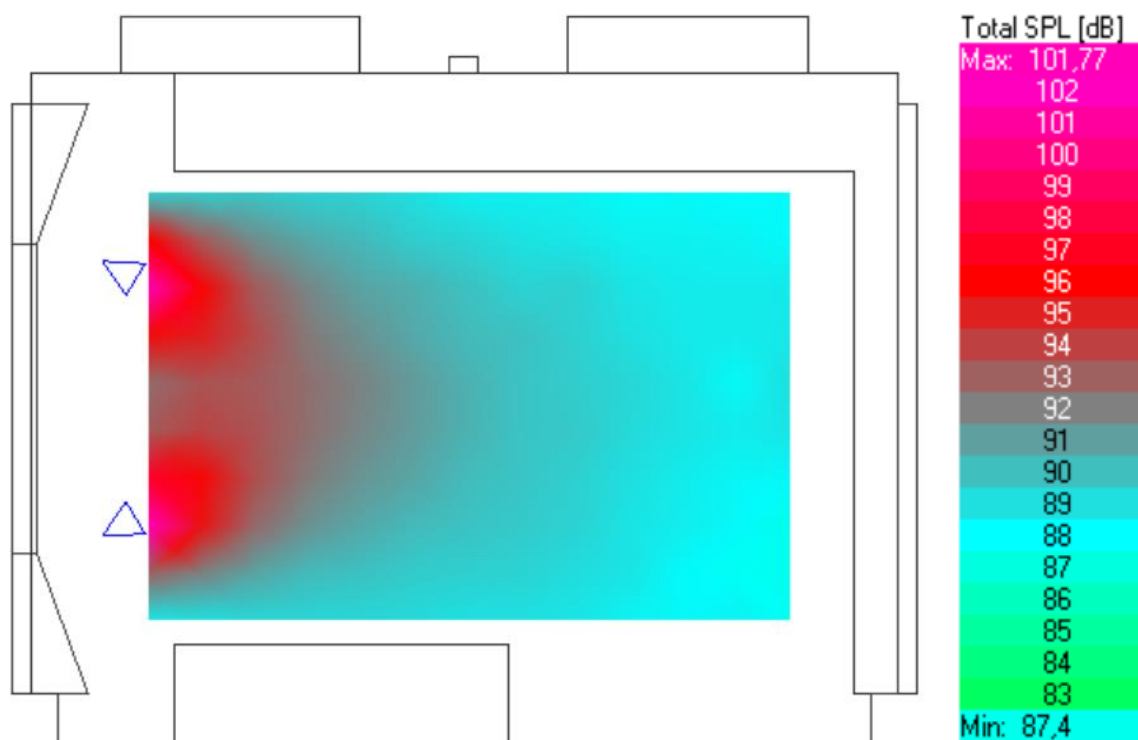
Příloha 4: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 s kompletními akustickými úpravami pro třetinooktávové pásmo 100 Hz



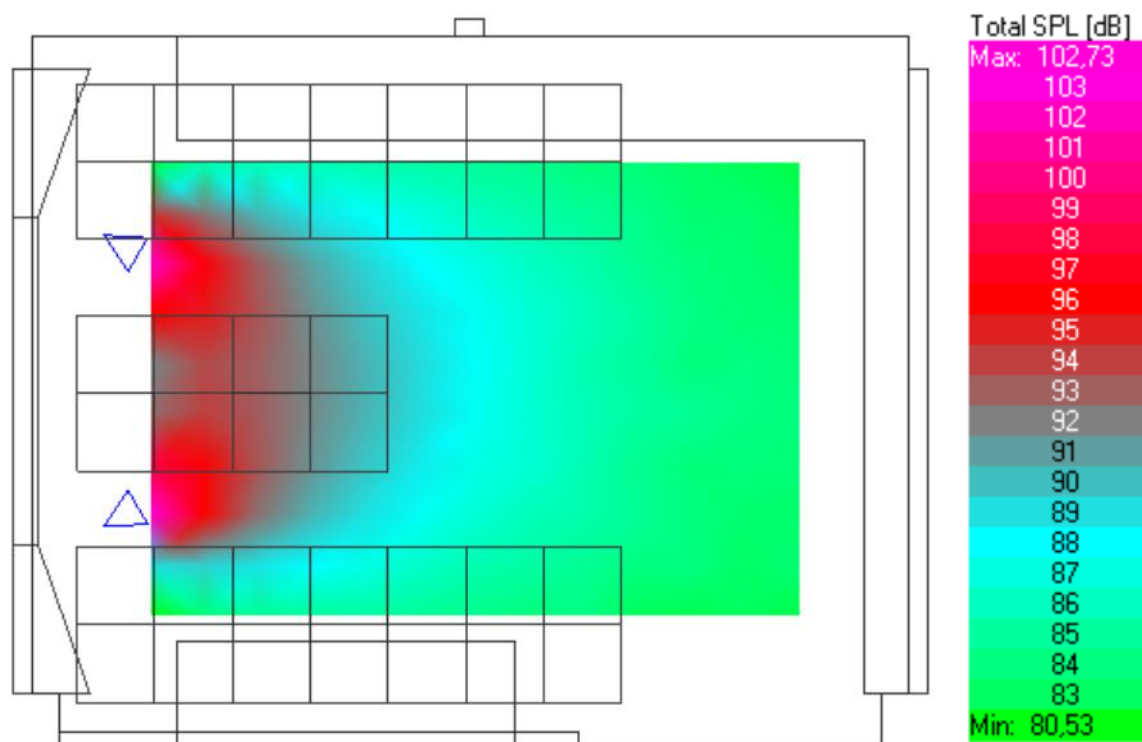
Příloha 5: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 ve výchozím stavu pro třetinooktávové pásmo 100 Hz



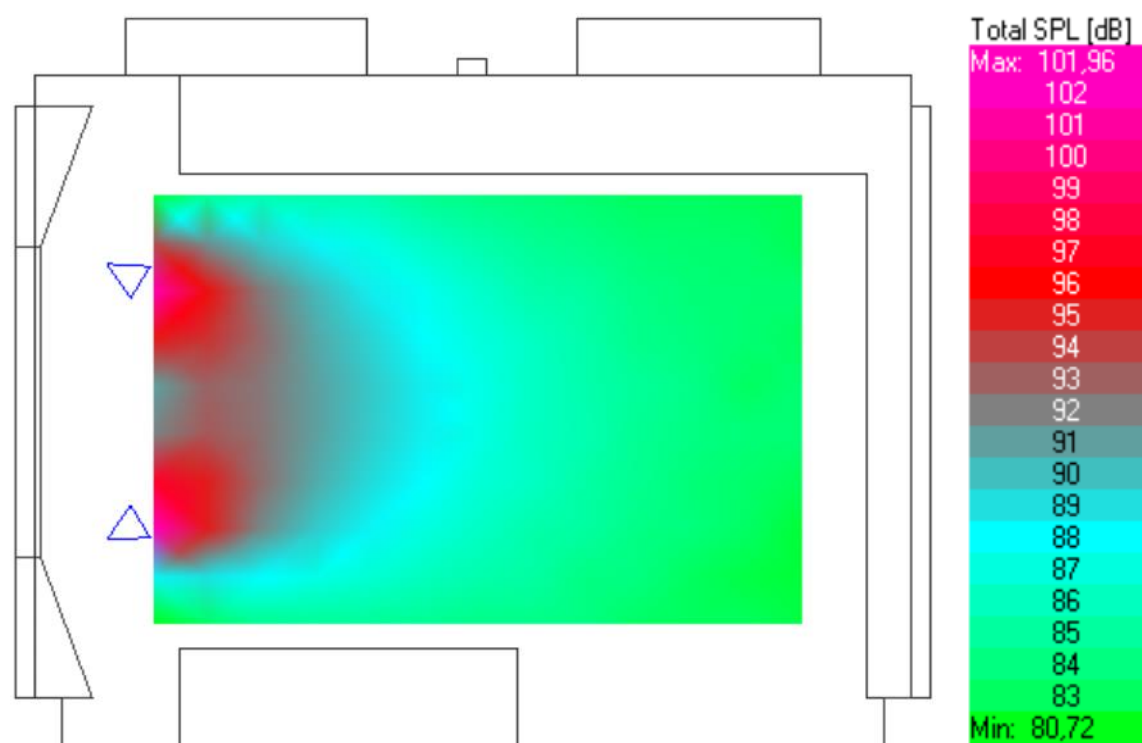
Příloha 6: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 s kompletními akustickými úpravami pro třetinooktávové pásmo 1000 Hz



Příloha 7: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 ve výchozím stavu pro třetinooktávové pásmo 1000 Hz



Příloha 8: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 s kompletními akustickými úpravami pro třetinooktávové pásmo 10 kHz



Příloha 9: Mapa rozložení zvukového pole v modelu místnosti EK708 ve výchozím stavu pro třetinooktávové pásmo 10 kHz



Příloha 10: Detailní fotografie uchycení akustického prvku ke hliníkovému rámu.

Přílohy – program pro výpočet vlastních frekvencí

```
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from openpyxl import Workbook

def calculate_eigenmodes(a, b, c, m_max, n_max, p_max,
speed_of_sound):
    eigenmodes = []
    for m in range(m_max + 1):
        for n in range(n_max + 1):
            for p in range(p_max + 1):
                if m == 0 and n == 0 and p == 0:
                    continue
                f_mnp = (speed_of_sound / 2) * math.sqrt((m /
a) ** 2 + (n / b) ** 2 + (p / c) ** 2)
                eigenmodes.append((m, n, p, f_mnp))
    return eigenmodes

def calculate_critical_frequency(RT60, volume):
    critical_frequency = 2000 * math.sqrt(RT60 / volume)
    return critical_frequency

if __name__ == "__main__":
    # Získání vstupních hodnot od uživatele
    a = float(input("Zadejte délku místnosti (v metrech): "))
    b = float(input("Zadejte šířku místnosti (v metrech): "))
    c = float(input("Zadejte výšku místnosti (v metrech): "))
    m_max = int(input("Zadejte maximální počet módů v ose x:
"))
    n_max = int(input("Zadejte maximální počet módů v ose y:
"))
```

```
p_max = int(input("Zadejte maximální počet módů v ose z:
"))
RT60 = float(input("Zadejte RT60 dobu dozvuku (v
sekundách): "))

# Další výpočty
volume = a * b * c
surface_area = 2 * (a * b + b * c + a * c) # Výpočet
povrchu místnosti
speed_of_sound = 343 # Rychlost zvuku ve vzduchu (v m/s)

# Volání funkcí pro výpočty
eigenmodes = calculate_eigenmodes(a, b, c, m_max, n_max,
p_max, speed_of_sound)
critical_frequency = calculate_critical_frequency(RT60,
volume)

# Vytvoření excelovského souboru
wb = Workbook()
ws = wb.active
ws.append(["Mód", "Frekvence (Hz)"])
print("Módy a frekvence:")
for mode in eigenmodes:
    mode_str = "{}".format(mode[:3])
    frequency_str = "{:.2f}".format(mode[3]).replace('.',',',',') # Nahrazení tečky za čárku
    ws.append([mode_str, frequency_str])
    print(mode_str, frequency_str)

# Vykreslení čárového spektra
frequencies = [mode[3] for mode in eigenmodes]
plt.figure(figsize=(10, 6))
for mode in eigenmodes:
```

```
        if mode[3] <= critical_frequency * 0.2 +
critical_frequency:
            if mode[0] == 0 and mode[1] == 0 or mode[0] == 0
and mode[2] == 0 or mode[1] == 0 and mode[2] == 0:
                plt.vlines(mode[3],      ymin=0,      ymax=0.5,
color='black', alpha=0.7, linewidth=2, label='Axiální')
            elif mode[0] == 0 or mode[1] == 0 or mode[2] == 0:
                plt.vlines(mode[3],      ymin=0,      ymax=0.75,
color='blue', alpha=0.7, linewidth=2, label='Tangenciální')
            else:
                plt.vlines(mode[3],      ymin=0,      ymax=1,
color='green', alpha=0.7, linewidth=2, label='Šikmé')

        plt.axvline(x=critical_frequency,      color='red',
linestyle='--', label='Kritická frekvence')
        plt.xlabel('Frekvence (Hz)')
        plt.ylabel('')
        plt.title('')

        # Vytvoření legendy
        handles, labels = plt.gca().get_legend_handles_labels()
        unique_labels = list(set(labels))
        unique_handles = [handles[labels.index(label)] for label
in unique_labels]
        plt.legend(unique_handles,      unique_labels,      loc='upper
left')

        plt.gca().spines['left'].set_visible(False)
        plt.gca().spines['right'].set_visible(False)
        plt.gca().spines['top'].set_visible(False)
        plt.gca().get_yaxis().set_visible(False)
        plt.gca().spines['left'].set_position(('data', 0))
        plt.gca().spines['bottom'].set_position(('data', 0))
```

```
# Nastavení umístění popisků osy x
plt.tick_params(axis='x', which='both', bottom=True,
top=False, labelbottom=True, labeltop=False, pad=10)

# Změna rozsahu osy x
plt.xlim(left=-1) # Přizpůsobení hodnoty vpravo podle
vašich dat

# Nastavení maximální hodnoty osy x
max_x = critical_frequency * 0.2 + critical_frequency

# Nastavení členění osy x s kroky po 10
plt.xticks(np.arange(0, max_x, 10))

plt.grid(axis='x')
plt.show()

print("Kritická frekvence (nad touto hodnotou lze
spolehlivě využít vztahy pro výpočet doby dozvuku):
{:.2f}".format(critical_frequency))
ws.append(["Kritická frekvence (nad touto hodnotou lze
spolehlivě využít vztahy pro výpočet doby dozvuku)",
"{:.2f}".format(critical_frequency).replace('.', ',')])
ws.append(["Objem místnosti (m^3)", volume])
ws.append(["Povrch místnosti (m^2)", surface_area])

# Uložení excelovského souboru
wb.save("vypocet_pole.xlsx")

print("Výsledky byly uloženy do excelovského souboru
'vypocet_pole.xlsx'.")
```