



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A REALIZACE AKUSTICKÝCH ÚPRAV PROSTORU

DESIGN AND REALIZATION OF ACOUSTIC ADJUSTMENTS OF LISTENING ROOM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Vajda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Michal Vajda

ID: 200953

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace akustických úprav poslechového prostoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte geometrický model vybraného prostoru určeného pro poslech hudby a proveďte simulaci rozložení akustického tlaku v tomto prostoru pomocí software EASE. Proveďte také měření doby dozvuku v třetinooktávových pásmech a pomocí výsledků měření upravte parametry simulace. Na základě tohoto měření navrhnete akustické úpravy prostoru pro dosažení optimální a kmitočtově vyrovnané doby dozvuku a ověřte je pomocí simulace v EASE. Následně navržené akustické úpravy realizujte a výsledek opět ověřte měřením doby dozvuku v třetinooktávových intervalech.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s. ISBN 0451480.
- [2] COX, T., J., D'ANTONIO, P. Acoustic Absorbers and Diffusers, 1st ed.. Spon Press, Taylor & Francis Group, 2004, 405 s. ISBN 0-415-29649-8.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu akustických úprav bytového prostoru a následné realizaci těchto úprav. Jejím cílem je navrhnout optimální řešení prostoru pro poslech hudby v souladu s Českými technickými normami. Základními zkoumanými parametry jsou doba dozvuku a kritéria akustické kvality. Práce se zabývá simulací v modelovacím programu EASE a řeší situace před akustickou úpravou i po ní.

Pro komplexní řešení výše uvedených úprav a dosažení vytyčeného cíle jsou použity následující metody a postupy: Měření doby dozvuku je provedeno pomocí metody přerušeného šumu, výpočty jsou provedeny za pomoci Sabinova a Eyringova vzorce. Dále je simulace ověřena vlastním kalkulátorem v programu Excel. Po využití absorbérů vhodných k úpravě je provedena realizace s konečným měřením doby dozvuku. Na závěr je vytvořen dodatečný návrh úprav pomocí Helmholtzových rezonátorů.

Realizovanými metodami je dosaženo optimální a zároveň kmitočtově vyrovnané doby dozvuku a místnost je možné využívat jako mixážní halu pro vícekanálový záznam zvuku.

Klíčová slova

Absorbér, doba dozvuku, návrh, prostorová akustika, realizace, rezonátor, simulace

Abstract

This bachelor thesis is devoted to the design of acoustic modifications of residential space and the subsequent implementation of these modifications. Its aim is to design an optimal solution of the space for listening to music in accordance with the Czech Technical Standards. The basic parameters investigated are reverberation time and acoustic quality criteria. The thesis deals with simulation in the EASE modelling program and addresses situations before and after acoustic treatment.

The following methods and procedures are used to comprehensively address the above mentioned treatments and to achieve the set objective. Furthermore, the simulation is verified with a custom calculator in Excel. After using the absorbers suitable for adjustment, the implementation with the final measurement of the reverberation time is carried out. Finally, an additional modification design is created using Helmholtz resonators.

The implemented methods achieve an optimal and frequency balanced reverberation time and the room can be used as a mixing hall for multi-channel sound recording.

Keywords

Absorber, reverberation time, design, room acoustics, realization, resonator, simulation

Bibliografická citace

VAJDA, Michal. *Návrh a realizace akustických úprav poslechového prostoru* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141287>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Michal Vajda</i>
VUT ID studenta:	<i>200953</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh a realizace akustických úprav poslechového prostoru</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za účinnou odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Poděkování také věnuji Jackovi Brannému a firmě PROTI:HLUKU za odbornou konzultaci. Za možnost realizace akustických úprav děkuji Petru Hortvíkovi a firmě Ekustik.

V Brně dne: 30. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. AKUSTIKA PROSTORU	11
1.1 AKUSTICKÉ PROSTORY A JEJICH ŘEŠENÍ	11
1.1.1 Vlnová akustika.....	11
1.1.2 Statistická akustika.....	12
1.1.3 Geometrická akustika.....	15
1.1.4 Kritéria akustické kvality	16
1.2 MATERIÁLY A POHLCOVÁNÍ ZVUKU	17
1.2.1 Porézní materiály.....	17
1.2.2 Obklady založené na principu rezonance.....	18
1.2.3 Akustická tělesa se zvláště velkou pohltivostí	19
1.2.4 Užitékové materiály a jejich pohltivost.....	20
1.3 METODY MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	20
1.3.1 Metoda přerušného šumu	21
1.3.2 Metoda integrované impulsové odezvy	21
1.3.3 Vhodné přístroje k měření.....	21
1.3.4 Vhodná místa umístění přístrojů.....	22
2. ZVOLENÉ METODY, MATERIÁLY A POSTUPY	23
2.1 CÍLE PRÁCE VYCHÁZEJÍCÍ ZE ZADÁNÍ	23
2.2 ZVOLENÉ METODY A POSTUPY	23
2.3 ZVOLENÉ MATERIÁLY A PRODUKTY	23
2.3.1 Woody Queen.....	24
2.3.2 Woody Puzzle Tower.....	24
2.3.3 Woody Wavy.....	24
2.4 SOFTWARE EASE.....	25
3. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	26
3.1 SLEDOVANÝ PROSTOR	26
3.2 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU PŘED ÚPRAVOU	27
3.3 3D MODEL A SIMULACE PŘED ÚPRAVOU	29
3.4 3D MODEL A SIMULACE PO ÚPRAVĚ	35
3.5 KALKULÁTOR MICROSOFT EXCEL	43
3.6 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU PO ÚPRAVĚ	45
4. DODATEČNÝ NÁVRH ÚPRAV.....	48
5. ZÁVĚR.....	49
LITERATURA.....	50
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	52
SEZNAM PŘÍLOH.....	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1:	Odraz zvukové vlny – rovinná plocha [12]	15
1.2:	Odraz zvukové vlny – vypuklá plocha [12]	16
1.3:	Odraz zvukové vlny – dvě rovnoběžné stěny [19]	16
1.4:	Závislost činitele zvukové pohltivosti na počtu těles na jednotku plochy [19]	19
1.5:	Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti různých materiálů [19]	20
3.1:	Sledovaný prostor před úpravou – část 1	26
3.2:	Sledovaný prostor před úpravou – část 2	27
3.3:	Pozice zdroje a mikrofonu.....	29
3.4:	3D model místnosti před úpravou	31
3.5:	Graf porovnání doby dozvuku měření a simulace v EASE	31
3.6:	Simulace Total SPL před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band.....	32
3.7:	Simulace Direct SPL před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	33
3.8:	Simulace C7 před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	33
3.9:	Simulace C50 před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band.....	34
3.10:	Simulace C80 před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band.....	34
3.11:	Simulace D/R ratio před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	35
3.12:	Kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti (Woody Queen)	36
3.13:	Kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti (Woody Puzzle Tower)	36
3.14:	Kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti (Woody Wavy)	37
3.15:	3D model místnosti po úpravě	38
3.16:	Graf doby dozvuku po navržených úpravách – simulace EASE	39
3.17:	Simulace Total SPL po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band.....	40
3.18:	Simulace Direct SPL po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	41
3.19:	Simulace C7 po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	41
3.20:	Simulace C50 po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	42
3.21:	Simulace C80 po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band	42
3.22:	Simulace D/R ratio po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band.....	43
3.23:	Graf porovnání dob dozvuku po navržených úpravách simulací EASE a Excel.....	44
3.24:	Sledovaný prostor po úpravě – část 1a)	46
3.25:	Sledovaný prostor po úpravě – část 1b).....	46
3.26:	Graf porovnání dob dozvuku měřených i simulovaných.....	47

SEZNAM TABULEK

3.1:	Průměrná doba dozvuku v třetinooktávových pásmech před úpravou	28
3.2:	Průměrná doba dozvuku v třetinooktávových pásmech po úpravě	45
4.1:	Navržené parametry pro výrobu Hemholtzových rezonátorů	48

ÚVOD

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu akustických úprav prostoru a následné realizaci těchto úprav. Akustika prostoru je téma, kterému se věnuje pouze úzká část společnosti, a je třeba říci, že akustické úpravy jsou častokrát velmi žádoucí, ale bohužel nejsou realizovány.

Mezi nejčastěji akusticky upravované prostory se řadí ty, které mají sloužit k poslechu nebo k interpretaci hudby. Právě zde se nejvíce projevují nedostatky akustiky, protože jsou zde také nejvíce slyšitelné a můžou posluchače nebo interpreta rušit. Do kategorie prostorů určených k poslechu hudby lze zařadit především hudební studia, hudební zkušebny, poslechové sály, mixážní haly aj.

Pro tuto bakalářskou práci byla zvolena místnost, která je součástí bytu a v budoucnu má sloužit pro poslech hudby. Úprava místnosti se řídí podle Českých technických norem (ČSN), a také podle požadavků majitele prostoru.

Hlavním cílem práce je akusticky upravit daný prostor takovým způsobem, aby se snížila doba dozvuku na požadovanou délku a zároveň se dosáhlo vyrovnaného rozložení akustického tlaku v místnosti.

Místnost bylo třeba zaměřit. Pro 3D modelování a pro simulaci doby dozvuku i rozložení akustického tlaku bylo využito speciálního simulačního programu. Po provedení simulace daného prostoru v původním stavu následuje návrh akustické úpravy pomocí správně zvolených materiálů, které jsou přidány do sledované místnosti, a simulací daného prostoru po akustických úpravách je ověřena funkčnost navržených úprav. Následně byla provedena realizace akustických úprav prostoru, kdy navrhované materiály byly přidány do sledovaného prostoru a výsledným měřením byla ověřena funkčnost těchto akustických úprav, a také porovnána s původním stavem místnosti.

1. AKUSTIKA PROSTORU

Tato část bakalářské práce čerpá převážně z literatury [4][12][18][19].

1.1 Akustické prostory a jejich řešení

Jevy, které se objevují a které mají vliv na zvukové pole v uzavřené místnosti, můžou být posuzovány pomocí třech metod. Jedná se o vlnovou, statistickou a geometrickou akustiku.

1.1.1 Vlnová akustika

Pokud se jedná o místnost, kde dochází k odrazu zvuku od dvou navzájem rovnoběžných stěn, vzniká stojaté vlnění. Stojaté vlnění také vzniká vícenásobným odrazem od stěn místnosti. Nejnižší frekvence, při které vznikne stojaté vlnění, neboli *vlastní kmity místnosti*, se dá odvodit z největšího rozměru prostoru. Následující frekvence obsahující vlastní kmity se získávají z ostatních rozměrů prostoru. Čím vyšší je frekvence, tím častější je jejich výskyt.

Z řešení vlnové rovnice je možné odvodit vztah pro výpočet vlastních kmitů [19]

$$f_n = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}. \quad (1.1)$$

Zde značí c_0 rychlost šíření zvuku ve vzduchu, n_x , n_y , n_z je trojice nezáporných celých čísel a l_x , l_y , l_z jsou rozměry daného prostoru.

Při měření doby dozvuku lze na konkrétních kmitočtech pozorovat vyšší amplitudu. Kmitočet, který je v prostoru přirozeně zesílen se nazývá *módem místnosti*. Nejnižší kmitočet vlastního kmitu lze určit ze vztahu [19]

$$f = \frac{c_0}{2l_x}. \quad (1.2)$$

Zde l_x značí největší délku hrany uvažovaného prostoru. Následujícím módem je vždy celočíselný násobek nejnižšího kmitočtu vlastního kmitu.

Pro zajištění dobrého přenosu zvuku musí být v kmitočtovém pásmu co největší počet vlastních kmitů. Na nižších kmitočtech je možné pozorovat nevyrovnané zvukové pole, které je zapříčiněno většími rozestupy módů. K požadované vyrovnanosti zvukového pole dochází nad tzv. *kritickým kmitočtem*, který lze vypočítat dle vzorce [19]

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (1.3)$$

Zde značí T dobu dozvuku a V objem místnosti.

Z hlediska vlastních kmitů je potřeba, aby rozměry malých místností byly v optimálním poměru. Špatné poměry rozměrů většinou vedou ke zhoršení rozptylování zvukových vln.

Podle ČSN 73 0525 jsou doporučené poměry stran pro uzavřené prostory o objemu do 200 m^3 [4]

délka : šířka : výška = 1,2 : 1,05 : 1.

U prostorů větších se doporučuje poměr stran

délka : šířka : výška = 1,6 : 1,25 : 1 nebo 2,9 : 1,7 : 1.

Podle zkušeností při stavbě studií se doporučuje u menších místností [19]

délka : šířka : výška = 2,5 : 1,5 : 1.

U větších místností

délka : šířka : výška = 3 : 2 : 1.

1.1.2 Statistická akustika

Je třeba si uvědomit, že pro řešení složitější situovaných prostor je statistická akustika nejméně dostačující, a také nejméně přesná. Hlavním principem statistické akustiky je hledání výsledku pomocí průměrných hodnot. Lze si definovat energetické veličiny, které popisují zvukové pole. Jedná se o veličiny *hustota zvukové energie* w (W.s.m^{-3}) a *intenzita zvuku* I (W.m^{-2}). Pro práci s těmito veličinami však statistická teorie počítá s určitými zjednodušeními.

- Součtem středních hodnot energie je možné získat velikost zvukové energie v daném bodě uzavřeného prostoru. V tomto bodě se vyskytne energie v důsledku odrazů od stěn prostoru.
- Hustota zvukové energie má ve všech bodech daného prostoru stejnou velikost. Zde předpokládá difuzní zvukové pole.
- Vzniká stejná pravděpodobnost výskytu úhlů, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu.

Za předpokladu, že je vyzařování a pohlcování zvukové energie plynulé, a pokud vychází ze zákona o zachování energie, může být zákon o zachování zvukové energie v prostoru vyjádřen jako [19]

$$P = V \frac{dw}{dt} + P_s. \quad (1.4)$$

Zde se jedná o vyjádření hustoty zvukové energie w , jelikož po patričných úpravách vzorce je získán vztah pro dopad energie na jednotku plochy za jednotku času [19]

$$P = \frac{wc}{4}. \quad (1.5)$$

Veškeré tyto náležitosti směřují k podstatnému termínu. Přiřazování materiálové charakteristiky ke konkrétním druhům povrchu. Jedná se o schopnost a míru daného povrchu pohlcovat akustickou energii. Tyto vlastnosti jsou popsány bezrozměrnou veličinou, která vyjadřuje podíl pohlcované akustické energie na rozhraní dvou prostředí. Nazývá se *činitel zvukové pohltivosti* α (-). Zde průběh hodnot na určitých kmitočtech je různý pro různé materiály.

Pro práci s akustickou energií v prostoru se dále využívá *ekvivalentní pohltivá plocha* A . Zde se znovu jedná o schopnost a míru daného povrchu pohlcovat akustickou energii. Výsledek této plochy se určuje v m^2 . Ekvivalentní pohltivou plochu v tomto případě lze vypočítat jako [19]

$$A = \alpha \times S. \quad (1.6)$$

Zde značí α činitele zvukové pohltivosti a S plochu povrchu.

Jednou z hlavních veličin sledovaných v této práci a tedy v určitém uzavřeném prostoru je *doba dozvuku* T (s). Jedná se o dobu, kdy po vypnutí zdroje zvuku poklesne akustický tlak zvuku na 10^{-6} původní hodnoty, tzv. dozvuk. Doba dozvuku je závislá na objemu místnosti, na vlivu pohltivosti stěn, tzn. ekvivalentní pohltivé ploše, a také na kmitočtu zdroje. Pro výpočet doby dozvuku je využíváno několika možných vztahů.

Doba dozvuku podle Sabina

Sabine pracuje s vypočtenou a experimentálně upřesněnou konstantou úměrnosti 0,161. Doba dozvuku podle Sabina T_s je definována rovnicí [19]

$$T_s = 0,161 \frac{V}{A}. \quad (1.7)$$

Zde značí V objem místnosti a A ekvivalentní pohltivou plochu místnosti.

Pokud nemají stěny místnosti stejný činitel zvukové pohltivosti, výpočet se řídí podle vzorce pro průměrnou hodnotu α [19]:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (1.8)$$

za předpokladu, že $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ jsou různé činitele zvukové pohltivosti a $S_1, S_2, \dots, S_n$ jsou různé stěny nebo různé části stěn.

Sabinův vzorec se využívá pro prostory s malým činitelem zvukové pohltivosti stěn. Dále platí pro místnosti o objemu $V \leq 2000 \text{ m}^3$.

Za předpokladu, kdy je pohltivost stěn nulová, tedy $\alpha = 0$, platí, že doba dozvuku v místnosti bude nekonečná. V případě, že pohltivost stěn je maximální, tedy $\alpha = 1$, neplatí nulový výsledek, ale hodnota $0,164 \text{ V/S}$.

Doba dozvuku podle Eyringa

Eyring pracuje s předpokladem, že se libovolný paprsek o konkrétní intenzitě po odrazu od plochy skokově zeslabí o αI . Doba dozvuku podle Eyringa T_E je definována rovnicí [19]

$$T_E = 0,164 \frac{V}{\alpha_E S} . \quad (1.9)$$

Zde značí V objem místnosti, α_E Eyringův činitel zvukové pohltivosti a S celkovou plochu povrchu v případě, že $\alpha_E = -\ln(1 - \alpha)$ a $\alpha = \frac{A}{S}$.

Doporučuje se pro vyšší střední hodnoty činitele zvukové pohltivosti $0,2 < \alpha < 0,8$.

Doba dozvuku podle Millingtona

Millington pracuje s předpokladem, že se stěny, které ohraničují uzavřený prostor, skládají z n ploch a ty mají různý činitel zvukové pohltivosti. Doba dozvuku podle Millingtona T_M je definována rovnicí [19]

$$T_M = 0,164 \frac{V}{\alpha_E S + 4mV} . \quad (1.10)$$

Zde značí m činitele útlumu. Lze s ním pracovat ve všech třech případech výpočtu doby dozvuku pro velké objemy.

Činitel útlumu $m \text{ (m}^{-1}\text{)}$ je závislý na relativní vlhkosti, na kmitočtu a také na teplotě. Doporučuje se pro případ, kdy jsou střední hodnoty činitele zvukové pohltivosti $\alpha > 0,8$.

1.1.3 Geometrická akustika

Při šíření vlnění se v případě vyskytnutí překážky vlna buď odrazí, pohltí, nebo dojde k ohybu zvukové vlny. Tyto jevy jsou závislé na rozměru překážky oproti vlnovým délkám zvukové vlny. Pokud jde o šíření zvukové vlny v uzavřeném prostoru, může se šířit od zdroje ke sledovanému místu dvěma způsoby – přímo a odrazy.

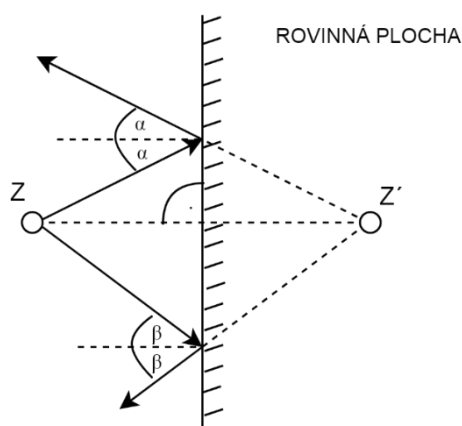
V oblasti geometrické akustiky nenastává ohyb zvukových vln. V takovém případě se hovoří o zvukových paprscích, které se řídí podle platného zákona o rovnosti úhlu dopadu a odrazu.

Ve chvíli, kdy je srovnáván paprsek přímý s paprskem odraženým, které od stejného zdroje putují ke sledovanému místu, je možné zjistit, že odražený paprsek urazí mnohem delší dráhu, než paprsek mířící přímo od zdroje k danému bodu. Na velikosti zpoždění odraženého paprsku závisí vnímání lidského ucha. Pokud se jedná o zanedbatelné zpoždění, lidské ucho vnímá oba paprsky za tentýž. Jestliže je zpoždění mezi paprsky dostatečně velké, lidské ucho začne vnímat hned několik jevů, jako je vytrácení srozumitelnosti, ozvěna místnosti a další.

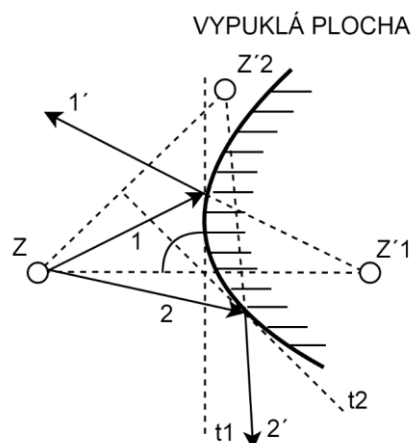
Je nutné rozdělovat odraz zvukových vln od rovinných ploch a od křivých ploch. V případě, že se sestrojují zvukové paprsky při odrazu od rovinné plochy, využívá se k tomu fiktivní zdroj Z' , který je zrcadlovým obrazem zdroje zvuku Z . Odražený paprsek se chová tak, jako by z fiktivního zdroje vycházel, viz obr. 1.1.

Za předpokladu, že se paprsek odrazí od více stěn, existuje pro první odraz fiktivní zdroj $M1'$. Při druhém odrazu pro sestrojení čela vlny je považován za zdroj $M1$ a k němu je třeba nalézt zrcadlový odraz, tedy $M2$ s fiktivním zdrojem $M2'$, viz obr. 1.3. Jako zvláštní případ odrazů od rovinné plochy jsou dvě stěny stojící k sobě kolmo.

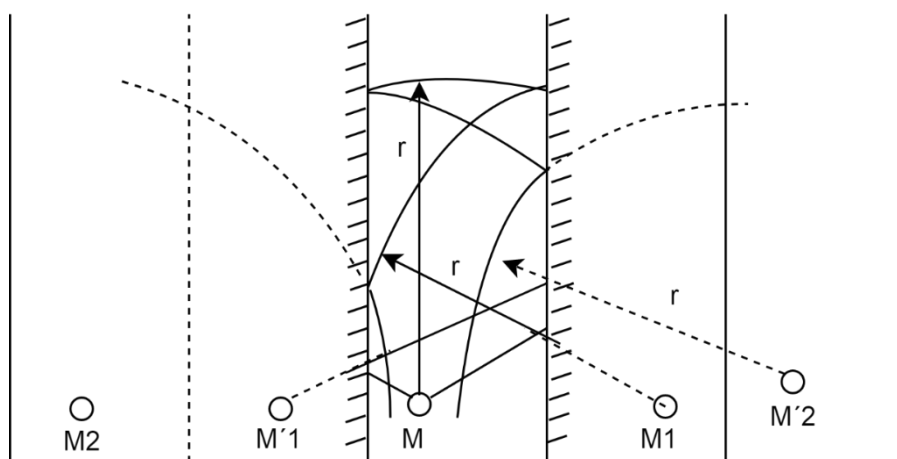
Jestliže jsou sestrojovány zvukové paprsky při odrazu od křivé plochy, mluví se o ploše vypuklé, anebo vyduté. V uzavřeném prostoru, kde se nachází plochy vypuklé, zvukové vlny se rozptylují a dosahují co nejrovnoměrnějšího rozložení zvukové energie. Naopak v uzavřených prostorech s plochami vydutými může nastat zhoršování akustických vlastností z důvodu soustřeďování zvukových vln.



Obr. 1.1: Odraz zvukové vlny – rovinná plocha [12]



Obr. 1.2: Odraz zvukové vlny – vypuklá plocha [12]



Obr. 1.3: Odraz zvukové vlny – dvě rovnoběžné stěny [19]

1.1.4 Kritéria akustické kvality

V uzavřených prostorech se posuzuje kvalita poslechu při jeho konkrétních vlastnostech. Toto posuzování je buď subjektivní, nebo objektivní. Velký vliv na subjektivní posuzování má vizuální kontakt posluchače a jejich samotný výběr. Při využití několika posluchačů dochází ke statistické chybě a k průměrování výsledku. Objektivní posouzení kritérií je kmitočtově závislé a nejčastěji se získává z impulsových odezev. Níže jsou popsány kritéria, která jsou v této práci zkoumána, konkrétně v kapitolách 3.3 a 3.4.

Míra přímého zvuku C_7 se využívá pro lokalizaci přímého zvuku. Je definována poměrem energií, které přicházejí do 7 ms a od 7 ms. Dobrá lokalizace přímého zvuku nastává u hodnot, které jsou vyšší než -15 dB.

Míra zřetelnosti C_{50} je hlavním akustickým kritériem pro řeč. Dobrá srozumitelnost je považována u hodnot překračujících 0 dB. Pokud bude mít standardní místnost hodnoty srozumitelnosti menší než -5 dB, není pro přednes řeči vhodná.

Míra jasnosti C_{80} je hlavním akustickým kritériem pro hudbu. Toto kritérium se využívá např. pro posouzení rychlých hudebních pasáží, dále pro rozlišení a detail tónů. Čím delší je dozvuk v místnosti, tím menší detaily existují. Optimální hodnota míry jasnosti záleží na typu hudebního žánru. Tato hodnota by se měla pohybovat v rozmezí 1 ± 2 dB. Určitě by neměla překročit hodnotu 8 dB.

1.2 Materiály a pohlcování zvuku

Ke zkrácení doby dozvuku je nutné do místnosti vložit nové prvky. Pro takovou úpravu se využívají materiály a konstrukce, které mají správné pohltivé vlastnosti. Aby se podařilo vytvořit akustický návrh úpravy prostoru, musí být známá míra pohlcování zvuku těchto materiálů a konstrukcí. Pohlcování zvuku je přeměna zvukové energie na jinou energii. V tomto případě se jedná hlavně o změnu na energii tepelnou.

Při návrhu materiálů vhodných k akustické úpravě se mnohdy řeší nejen akustické vlastnosti, ale také například estetické vlastnosti prvků. Důvodem mohou být požadavky od zadavatele práce aj.

Prvky pro pohlcování zvuku se dělí na obklady tvořené porézními materiály, obklady založené na principu rezonance a složené pohltivé konstrukce.

Ve sledovaném prostoru se můžou nacházet předměty, které slouží jako užitkové vybavení, ale i předměty s jiným účelem, které mají také svoje pohltivé vlastnosti, a které je třeba pro návrh úprav znát.

1.2.1 Porézní materiály

Porézní materiály jsou pevné látky disponující velkým množstvím dutin, které obsahují vzduch. Poměr dutin tvoří 80 až 99 % celkového objemu látky. To, jakou mírou materiál pohlcuje zvukovou energii, závisí na množství pórů, které musí být mezi sebou propojeny. Výjimku tvoří elastické materiály, kde póry nemusí být propojeny pro snadné pronikání zvuku. Mezi porézní materiály se řadí skleněné, minerální, organické a plastické hmoty. Pohlcování zvuku se odehrává v mezní vzduchové vrstvě, kde dochází k proměně na tepelnou energii. Pro porézní materiály platí, že čím je materiál tlustší, tím je jeho činitel zvukové pohltivosti vyšší. Toto tvrzení platí pro nízké kmitočty.

Pro nejvyšší účinnost je výhodnější umístit materiál od stěny, nikoliv ho přikládat úplně na stěnu.

1.2.2 Obklady založené na principu rezonance

Obklady založené na principu rezonance se dělí do těchto kategorií:

- a) kmitající membrány
- b) kmitající desky
- c) Helmholtzovy rezonátory

Ve chvíli dopadu zvukové vlny na obklad dojde k nucenému kmitání. Jakmile zvukové vlny přestanou dopadat na obklad, objevuje se zde díky rezonančnímu kmitočtu obkladu tzv. doznívání. V případě, kdy není prostor dostatečně tlumený, může nastat díky rezonančnímu kmitočtu a málo tlumícím rezonátorům prodloužení doby dozvuku. Proto se vkládají do těchto obkladů tlumicí vložky z porézního materiálu, aby bylo docíleno fungujícího pohlcování zvukových vln.

Kmitající membrány – tenká fólie nebo deska, která je umístěna na dřevěném roštu a s odstupem od stěny. V prostoru mezi membránou a stěnou dochází k tlumení kmitání částic. Rezananční kmitočet f_r pro kmitající membrány lze vypočítat jako [19]

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{md}}. \quad (1.11)$$

Zde značí m hmotnost membrány, d tloušťku vzduchového polštáře, S plochu membrány a ρ hustotu vzduchu.

Kmitající desky – pro zvýšení hmotnosti membrány je použito pevné desky. U kmitajících desek záleží na větší tuhosti v ohybu. Rezananční kmitočet f_r pro kmitající desky lze vypočítat jako [19]

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{Md}}. \quad (1.12)$$

Zde značí M plošnou hmotnost desky v případě, že $M = \frac{m}{S}$.

Helmholtzovy rezonátory – využívají se děrované panely nebo desky, které mají v sobě otvory např. kuželového, válcového nebo obdélníkového tvaru. Panel obsahuje jeden nebo více takových otvorů. Tyto otvory tvoří hrdlo do dutiny a každému otvoru patří jedna dutina. Deska je také umístěna s odstupem od stěny. Rezananční kmitočet f_r pro Helmholtzovy rezonátory lze vypočítat jako [19]

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{ab}{V(l+2\Delta l)}}. \quad (1.13)$$

Zde značí V objem dutiny, $2\Delta l$ korekci otvoru a l délku hrdla rezonátoru v případě obdélníkových otvorů s rozměry a a b .

Pro výpočet rezonátoru obsahující konstrukci s jedním otvorem se využívá vzorec [19]

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_0}{V(l+2\Delta l)}}. \quad (1.14)$$

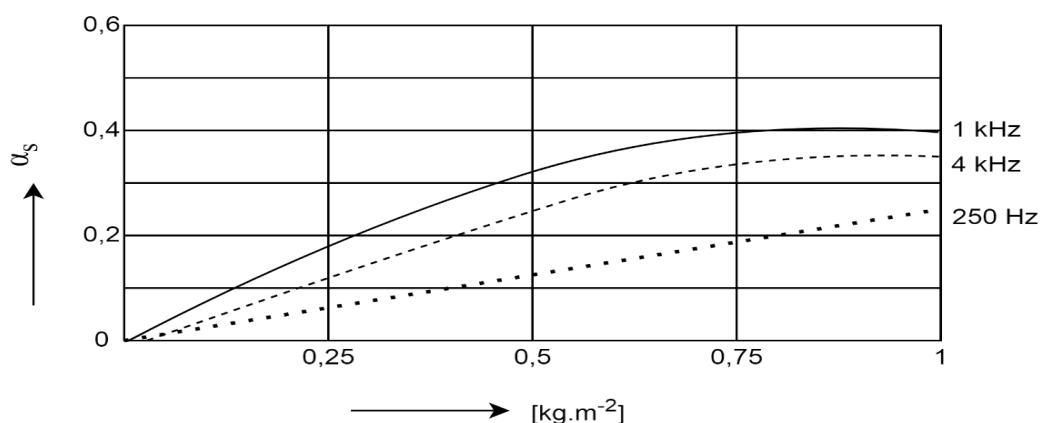
S_0 v tomto případě značí plochu otvoru.

Výpočty u všech tří případů obkladů založených na rezonančním principu platí za předpokladu, kdy je dopad zvuku kolmý na obklady.

1.2.3 Akustická tělesa se zvláště velkou pohltivostí

Tělesa vyráběná z porézních a zpevňovacích materiálů, která díky svému umístění mají zvláště velkou pohltivost. Nejčastěji to jsou zavěšené prvky pod stropem.

Při správném rozmístění pohltivých těles činitel zvukové pohltivosti může dosahovat i vyšších hodnot než 1, jelikož se jejich vlivem zvukové vlny ohýbají. V případě, že je množství prvků zavěšených na stropě vedle sebe předimenzováno, zmenší se vzdálenosti mezi nimi a tedy i prostor pro ohyb zvukových vln. V jistou chvíli se činitel zvukové pohltivosti začne zmenšovat místo uvažovaného předpokladu, že čím více prvků, tím se bude činitel zvukové pohltivosti zvětšovat. Závislost činitele zvukové pohltivosti na počtu zavěšených těles na stropě na jednotku plochy je možné vidět na obr. 1.4.

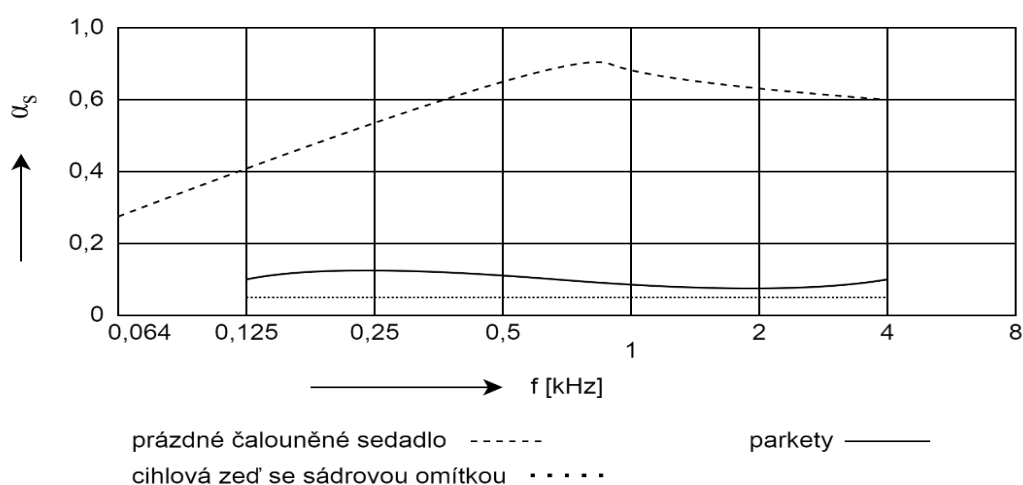


Obr. 1.4: Závislost činitele zvukové pohltivosti na počtu těles na jednotku plochy [19]

Taková akustická tělesa mají nejčastěji tvar kuželů, klínů nebo hranolů. Dále desky tvaru čtverce nebo obdélníku, které tvoří tzv. kazetování.

1.2.4 Užitékové materiály a jejich pohltivost

Jak je již výše uvedeno, nesmí se zapomínat na prvky a materiály ve sledovaném prostoru, které slouží jako užitékové vybavení, ale mají své vlastní pohltivé vlastnosti, které se nesmí opomínat při tvorbě návrhu akustických úprav. Do takových materiálů se řadí především stavební materiál stěn, stropu a podlahy. Dále je využívána znalost pohltivých vlastností dveří a oken. Mezi předměty umístěné v daném prostoru jsou zařazeny např. pohovky a gauče aj. Zobrazení kmitočtové charakteristiky činitele zvukové pohltivosti různých předmětů a typů materiálů lze pozorovat na obr. 1.5.



Obr. 1.5: Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti různých materiálů [19]

1.3 Metody měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku je pro akustickou úpravu prostoru velmi důležité. Co se doby dozvuku týče, je to nejčastěji sledovaná veličina. Důvodem je, že dozvuk v uzavřeném prostoru bývá nejvíce vnímán a nejvýrazněji ovlivňuje kvalitu poslechu. Měřením se zjišťuje, jestli je daný prostor akusticky ideální pro daný účel. Pokud prostor svými parametry nespadá do tzv. optimálních podmínek (optimální doba dozvuku k danému účelu a jeho přípustné rozmezí), je zapotřebí ho akusticky upravit.

Ke správnému měření a posuzování doby dozvuku slouží České technické normy. Pro měření doby dozvuku se využívá norma ČSN ISO 3382 [11], pro jeho správné posuzování norma ČSN 73 0526 [5] a dále ČSN 73 0527 [6].

Uvedené metody měření – Metoda přerušného šumu a Metoda integrované impulsové odezvy dají stejný výsledek.

1.3.1 Metoda přerušného šumu

Tato metoda využívá jako zdroj zvuku reproduktor. Z širokopásmového elektrického šumu je pro tyto účely odvozený signál, který se do zdroje přivádí. Dále je možné využít k vybudění prostoru kmitočtově modulovaný signál sinusového tvaru s modulačním kmitočtem okolo 10 Hz.

Výkon zdroje musí být natolik velký, aby hluk okolí a jeho hladinu překonal alespoň o 40 – 45 dB. Následné měření se průměruje z různých pozic zdroje i mikrofonu. Během měření nesmí dojít k přebuzení signálem.

1.3.2 Metoda integrované impulsové odezvy

Tato metoda využívá takový zdroj zvuku, který sám nedoznívá. Pro získání impulsové odezvy se používá např. pistole. Výkon zdroje musí být natolik velký, aby hluk okolí a jeho hladinu překonal alespoň o 35 – 45 dB. Při použití speciálních zvukových signálů může být dosaženo většího odstupu signálu od šumu. V průběhu časového průměrování nesmí dojít ke změně impulsové odezvy. Zpětnou integrací kvadrátu impulsové odezvy je možné získat křivku poklesu pro oktaťová pásma.

Pro obě metody měření doby dozvuku platí:

Výsledek doby dozvuku může být nespolehlivý za předpokladu, že je křivka poklesu zvlněná nebo prohnutá. V takovém případě by mohlo dojít k indikaci směsí módů, které mají rozdílné doby dozvuku. Křivka poklesu musí sledovat přibližně přímku.

1.3.3 Vhodné přístroje k měření

K měření doby dozvuku se využívá hned několik přístrojů. Základními přístroji jsou zdroj zvuku a mikrofony, dále záznamníky a analyzátory. Normované parametry těchto přístrojů a zařízení jsou k nalezení v normě ČSN ISO 3882-1. [8]

Zdroj zvuku – používá se všesměrový. Cílem je vybudit dostatečně velkou hladinu akustického tlaku, aby byly získány hledané křivky poklesu, a zároveň do nich nevstupoval hluk okolí. Zdroj by měl být schopen vybudit hladinu alespoň o 45 dB větší, než je hladina akustického tlaku hluku okolí.

Mikrofony – používají se všesměrové, tlakové. Při měření se může mikrofón zapojovat přímo do analyzátoru nebo filtru pro okamžité vyhodnocení křivek. Druhou možností je vytvořit záznam pro pozdější analýzu. Průměr membrány měřícího mikrofónu činí maximálně 13 mm.

Záznamníky – využívá se digitální záznam zvuku. Musí být ze záznamu znatelná akustická hladina hluku okolí. Další podmínkou jsou charakteristiky zařízení pro rychlost záznamu a přehrávání vzorku.

Proti přebuzení se musí využívat přístroje s indikací špičky hladiny akustického tlaku.

1.3.4 Vhodná místa umístění přístrojů

V otázce správného umístění přístrojů se hovoří o umístění zdroje a o umístění měřícího mikrofону.

Zdroj je ve sledovaném prostoru umístován pro měření tak, aby jeho akustický střed byl 1,5 m vysoko nad podlahou. Zdroj také bývá umístován do pozic, kde se nachází nebo bude nacházet přirozený zdroj zvuku. Měření má být provedeno minimálně pro dvě různé pozice zdroje.

Mikrofon je ve sledovaném prostoru umístován pro měření tak, aby se podařilo vytvořit vzorky rovnoměrně po celé ploše. Také se mikrofon staví na místa, kde by se měl nacházet posluchač. Mikrofon nesmí být při měření stavěn příliš blízko u zdroje.

Místa mikrofónu jsou od sebe vzdálená polovinu vlnové délky, alespoň 2 m. Vzdálenost od odrazivých ploch, tedy i podlahy, je čtvrtina vlnové délky, alespoň 1 m. Výška mikrofónu v místnostech určených k poslechu hudby je volena jako výška lidského ucha při sezení, tedy 1,2 m nad podlahou. Při rozložení míst mikrofónu je dbáno na předjímání vlivů způsobujících rozdíly v dobách dozvuku.

2. ZVOLENÉ METODY, MATERIÁLY A POSTUPY

Tato část bakalářské práce čerpá převážně z literatury [5][14][13][21].

2.1 Cíle práce vycházející ze zadání

Cílem této bakalářské práce je akustická úprava sledovaného prostoru pro potřeby poslechu hudby a následná realizace těchto úprav. Důležitým aspektem pro tuto úpravu je snížení doby dozvuku na optimální úroveň. Mimo jiné budou v daném prostoru provedeny simulace celkové hladiny akustického tlaku (Total SPL), přímé hladiny akustického tlaku (Direct SPL), míry přímého zvuku C_7 , míry zřetelnosti C_{50} , míry jasnosti C_{80} a poměru přímého a odraženého zvuku (D/R ratio) v původním stavu, a také po navržených úpravách.

Prostor má být upraven takovým způsobem, aby splňoval podmínky poslechové místnosti. Podmínkám pro optimální dobu dozvuku, míře hluku pozadí a jiným se věnuje norma ČSN 73 0526 [5], konkrétně tabulka v příloze A.1 této práce.

Podle požadavků majitele prostoru se také musí dbát na estetickou stránku úprav, na finanční rozpočet majitele prostoru a na omezení při osazování navržených materiálů a produktů.

2.2 Zvolené metody a postupy

Během měření doby dozvuku byla použita metoda přerušného šumu. Následně byl pro výpočty spojené s dobou dozvuku zvolený Sabinův (1.7) a Eyringův (1.9) vzorec. 3D simulace prostoru před akustickou úpravou i po úpravě, dále simulace akustické kvality prostoru a také simulace doby dozvuku před úpravou i po úpravě byla provedena v softwaru EASE. Kontrolní výpočty a simulace doby dozvuku na základě vlastního vytvořeného kalkulátoru byly provedeny v programu Microsoft Excel. Po simulaci a návrhu akustických úprav byla navázána spolupráce se společností Ekustik pro zhotovení navržených produktů.

2.3 Zvolené materiály a produkty

K akustické úpravě prostoru budou použity produkty od společnosti Ekustik, která se věnuje jejich sériové výrobě. Důvodem pro volbu společnosti Ekustik je dlouhodobá spolupráce při odběru produktů. Dalším faktorem výběru byla krátká čekací lhůta na zhotovené produkty a spolehlivost v kvalitě finálních produktů. Majiteli prostoru byl předveden katalog materiálů a barev pro zhotovení produktů a tím byl výběr zhotovitele potvrzený. Pro potřeby této bakalářské práce budou využita katalogová data společnosti Ekustik [14].

2.3.1 Woody Queen

Jedná se o akustický absorbér, jehož rozměry činí 60 x 120 cm. Produkt se vyrábí ve třech tloušťkách, tj. 5, 10 a 15 cm. V této práci se bude využívat absorbér s tloušťkou 10 cm, jelikož menší tloušťka absorbéru nepostačuje k požadované absorpci a větší tloušťka nevyhovuje estetickým požadavkům. Je vhodný do místností pro poslech hudby, dále do nahrávacích místností a studií. Při objednání lze využít různých estetických úprav absorbéru, jako je výběr látky nebo povrchová úprava dřeva.

Čím je absorbér Woody Queen hlubší, tím se zvyšuje jeho efektivita při pohlcování nižších frekvencí. Produkt je vyroben z recyklované akustické pěny a neobsahuje skelnou ani minerální vatu. Efektivně pohlcuje zvukovou energii od 150 Hz, kdy činitel zvukové pohltivosti α absorbéru dosahuje hodnot vyšších, než je 0,75. Graf činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci tohoto produktu společně s obrázkem je vložen do přílohy A.2 a A.3 této práce.

2.3.2 Woody Puzzle Tower

Jde o akustický absorbér o rozměrech 60 x 190 x 15 cm. Je flexibilní díky přidaným kolečkům a je rozložitelný na tři kusy. Díky své flexibilitě se využívá v hudebních zkušebnách, ale také ve studiích a nahrávacích místnostech. Může být využito estetických úprav produktu.

Woody Puzzle Tower je vyroben z recyklované akustické pěny. Efektivně pohlcuje zvukovou energii od 180 Hz, kdy činitel zvukové pohltivosti α absorbéru dosahuje hodnot vyšších, než je 0,70. Obrázek tohoto produktu je vložen do přílohy A.4 této práce.

2.3.3 Woody Wavy

V tomto případě se jedná o akustický absorbér sestavený pro pohlcování nízkých frekvencí. Jeho rozměry činí 60 x 120 x 26 cm. Uvnitř Woody Wavy lze nalézt těžkou a pružnou membránu. Jelikož tato membrána působí jako pružina, nízké frekvence ji rozvlní a zvuková energie se tímto pohlcuje přeměnou na vibrace. Výhodou tohoto absorbéru je také přítomnost porézní absorpční vrstvy, která je přidána do konstrukce pro vyšší účinnost na vyšších frekvencích.

Woody Wavy je vyroben z recyklované akustické pěny a neobsahuje skelnou ani minerální vatu. Efektivně pohlcuje zvukovou energii mezi frekvencemi 50 až 80 Hz, kdy činitel zvukové pohltivosti α absorbéru dosahuje hodnot vyšších, než je 0,75. Dále se díky porézní absorpční vrstvě ukazuje jako velmi účinný od frekvence 500 Hz. Graf činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci tohoto produktu společně s obrázkem je vložen do přílohy A.5 a A.6 této práce.

2.4 Software EASE

Pro modelování prostoru a pro simulace celkové hladiny akustického tlaku (Total SPL), přímé hladiny akustického tlaku (Direct SPL), míry přímého zvuku C_7 , míry zřetelnosti C_{50} , míry jasnosti C_{80} a poměru přímého a odraženého zvuku (D/R ratio) ve sledované místnosti bude využit software EASE. Jedná se o specializovaný software, který je schopen nasimulovat vyzařování reproduktorů nebo bodových zdrojů v uzavřeném prostoru. Výhodou softwaru je přiřazování jednak materiálových charakteristik k plochám a jednak jejich koeficienty absorpce. EASE je schopný pracovat s mírou obsazenosti prostoru např. diváky. Dále je software spolehlivý ve vyhledání nedokonalostí a chyb při modelování, které bychom jinak nemuseli odhalit.

Software pracuje na principech geometrické akustiky a využívá dvě metody modelování. Metoda Monte Carlo simuluje na základě vytváření rozdělení pravděpodobnosti možných výsledků, tzv. nahodilý přístup. Druhá metoda simuluje na základě zrcadlení zdrojů. Tato metoda je rychlejší a přesnější.

3. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

3.1 Sledovaný prostor

Prostor použitý pro tuto bakalářskou práci se nachází v klidné brněnské části v prvním patře zděného domu a je součástí bytu o pěti místnostech. Jeho tvar je poněkud komplikovaný. Dominantou místnosti jsou dva výklenky, ve kterých se nachází vždy tři okna. Z místnosti také vedou dvojce dveře. Jedny dveře slouží ke vstupu na balkón a druhé dveře sousedí s chodbou bytu. Pro zjištění celkového objemu místnosti a namodelování v používaném softwaru, byly pro tyto účely zaměřeny všechny plochy pomocí laserového měřiče vzdálenosti.

Stěny celé místnosti jsou zděné a jsou pokryté hrubozrnnou omítkou, včetně stropu. Podlaha je osazena jasanovými parketami s dvojitou vrstvou matného oleje. Okna i dveře jsou standardní.

Byt je po rekonstrukci a vybavenost sledované místnosti je malá. Hlavní část prostoru bude využívána k danému účelu. Nachází se zde stůl s pohovkou a další prvky, které slouží jako dekorace místnosti. Za zmínku stojí výklenek této části, kde je umístěno velké množství květin. Dominantou druhé části prostoru je kuchyňská linka a její příslušenství. Dále se zde nachází kuchyňský stůl se židlemi. Objem místnosti činí 120 m³.

Podle doložených fotografií může být usuzováno, že bude nutno použít velkého množství absorpčního materiálu, aby bylo možné místnost upravit ke splnění podmínek pro provozování poslechu hudby.



Obr. 3.1: Sledovaný prostor před úpravou – část 1



Obr. 3.2: Sledovaný prostor před úpravou – část 2

3.2 Měření doby dozvuku před úpravou

Pro měření doby dozvuku před úpravou byl využit všesměrový zdroj a všesměrový mikrofón. Aby byly zachyceny vzorky rovnoměrně po celé sledované ploše, bylo měření provedeno pro dvě pozice zdroje a pro šestnáct pozic mikrofónu. Mikrofóny byly stavěny tak, aby pro rozdílný zdroj měly mírně rozdílných osm pozic. Na obr. 3.3 jsou znázorněny pozice zdroje velkými písmeny Z1 a Z2. Pozice mikrofónu jsou znázorněny velkými písmeny M1 – M8. Přesné pozice přístrojů jsou znázorněny v tabulce v příloze A.9. Zdroj byl v obou případech umístěn ve výšce 1,5 m nad podlahou. V tomto případě pozice zdroje Z1 je předpokládaným místem, odkud bude v budoucnu hudba reprodukována studiovými monitory. Mikrofón byl umisťován ve výšce odpovídající výšce lidského ucha při sezení, tedy 1,2 m nad podlahou. Dále se umisťování přístrojů řídilo dle kapitoly 1.3.4.

Celkem bylo provedeno 16 měření metodou přerušného šumu v třetinooktávových pásmech. Prostor byl tedy buzen širokopásmovým náhodným šumem. Toto měření probíhalo se zavřenými okny i dveřmi a v takovou denní dobu, kdy se nepředpokládá hlasitý vjem z okolních bytů ani z ulice. Po ukončení buzení místnosti širokopásmovým náhodným šumem a po poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB jsou získány hodnoty doby dozvuku. Hodnoty doby dozvuku v třetinooktávových pásmech před úpravou prostoru jsou vloženy do tabulky a přiloženy do přílohy Příloha B - Seznam

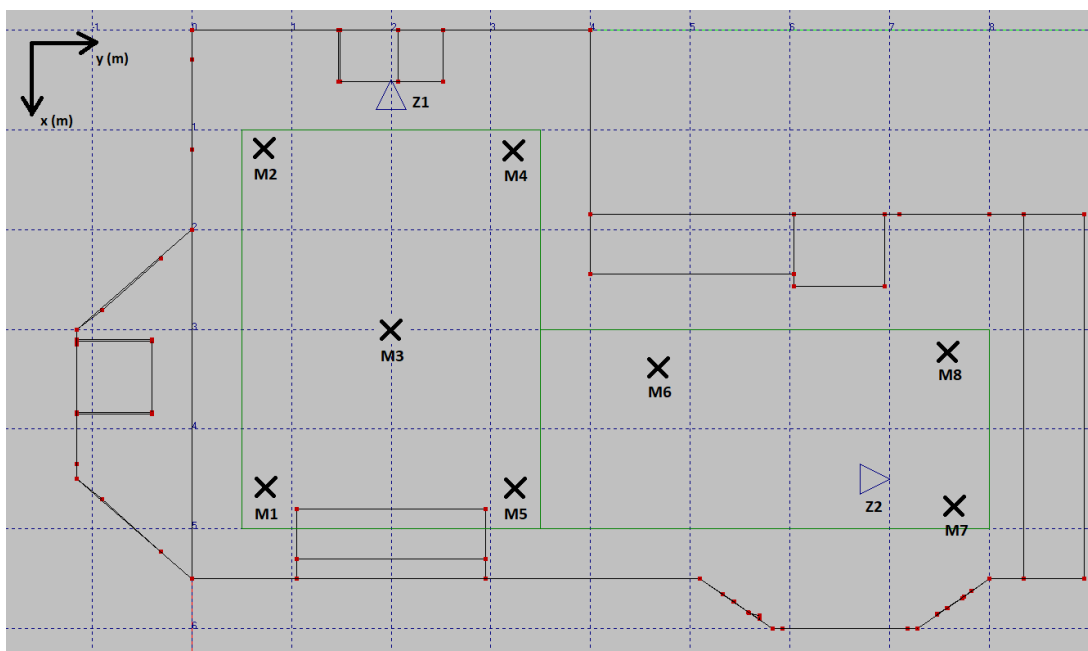
elektronických příloh. Ze všech šestnácti měření byla vypočítána průměrná doba dozvuku v třetinooktávových pásmech a ta je zobrazena v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Průměrná doba dozvuku v třetinooktávových pásmech před úpravou

Frekvence (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000
Doba dozvuku (s)	0,842	0,844	0,846	0,732	0,722	0,712	0,754	0,749	0,744	0,770	0,763
Frekvence (Hz)	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000	
Doba dozvuku (s)	0,757	0,785	0,815	0,844	0,737	0,734	0,731	0,553	0,543	0,533	

Z tabulky 3.1 je zřejmé, že naměřená doba dozvuku v námi sledovaném prostoru je opravdu dlouhá. Průměrná doba dozvuku se pohybuje převážně okolo sedmi a půl desetin sekundy. Jak již bylo řečeno v kapitole 3.1, důvodem je malá vybavenost místnosti a převažující odrazivé plochy. Z tabulky doby dozvuku v třetinooktávových pásmech před úpravou prostoru lze soudit, že odchylka jednotlivých měření je na nízkých frekvencích výraznější. Jde o frekvence od 25 Hz do 400 Hz. Kritický kmitočet vypočtený pomocí vzorce (1.3) udává hodnotu 156,06 Hz. V kmitočtových pásmech od 400 Hz výše je odchylka měření minimální. Výjimečným případem je měření 2-7 na frekvenci 1 600 Hz, kdy doba dozvuku přesahuje jednu sekundu. Oproti tomu doba dozvuku při měření 2-1 na frekvenci 3 150 Hz klesla výrazně níže než ostatní měření. Výrazná odchylka měření na nižších frekvencích může být zapříčiněna módy místnosti pod kritickým kmitočtem, ale také přenosem vibrací z okolí (např. projíždějícím automobilem po přilehlé silnici). Módy sledované místnosti vypočtené ze vzorce (1.2) jsou přehledně vloženy do tabulky v příloze A.8.

Pro vybraný účel místnosti je doba dozvuku nedostačující, a proto je třeba prostor akusticky upravit. Úprava bude provedena pomocí porézních materiálů, a také pomocí obkladů založených na principu rezonance. Těmito prvky by mělo být řešeno celé frekvenční pásmo pro optimální snížení doby dozvuku. Vhodná doba dozvuku sledované místnosti bude stejná, jako je požadována v mixážní hale pro vícekanálový záznam zvuku, dle tabulky v příloze A.1.



Obr. 3.3: Pozice zdroje a mikrofону

3.3 3D model a simulace před úpravou

V rámci této bakalářské práce byl vytvořen 3D model v simulačním programu EASE. Nejprve byl prostor namodelován v původním stavu, tedy model před úpravou. Prostor je zachycený v modelu v takovém stavu, ve kterém se nacházel při prvotním měření doby dozvuku.

Základním krokem bylo správné nastavení nového projektu. Program EASE během modelování kontroluje tzv. „otevřený model místnosti“. V případě, že není model kompletně uzavřený, oznamuje chybovými hláškami nutnost nápravy. Pokud se v průběhu modelování vyskytne chyba, program vás vede k použití záložky Check Holes. V této záložce jsou vypsány všechny body, kterých se chyba v modelu týká. Za předpokladu, že jsou všechny chyby v modelu opraveny, program zahlásí vyskakovacím oknem hlášku „Well done“ a tím oboznámí uživatele o správné funkčnosti modelu. Dalším krokem je vytvoření projektové databáze, do které se volí druhy materiálů podle popisu sledované místnosti. V tomto případě se jedná o materiály největšího zastoupení ploch stejného druhu v místnosti, které nejvíce ovlivňují odraz i pohltivost šířených zvukových vln. Všechny materiály v projektové databázi mají předdefinovaný koeficient pohltivosti a odrazivosti. Tento koeficient je možné podle vlastních potřeb také editovat. Pokud žádný z materiálů nacházejících se v databázi nevyhovuje, lze si vytvořit vlastní materiál, přiřadit mu koeficient pohltivosti a zařadit ho do vlastního modelu. Takové možnosti bylo v této práci využito a pro 3D model simulace před úpravou byl vytvořený jeden vlastní materiál.

Při vytváření samotného modelu se do tří souřadnicových os vkládají body pojmenované v programu EASE jako „vertex“. Body jsou umísťovány do modelu tak, jak byla místnost zaměřena laserovým měřičem vzdálenosti. Spojením požadovaných bodů ve správném směru vzniká plocha pojmenovaná v programu EASE jako „face“. Spojení bodů správným směrem má vliv na orientaci plochy v prostoru a na funkčnost modelu. Proto musí vytvořené plochy směřovat dovnitř modelu místnosti.

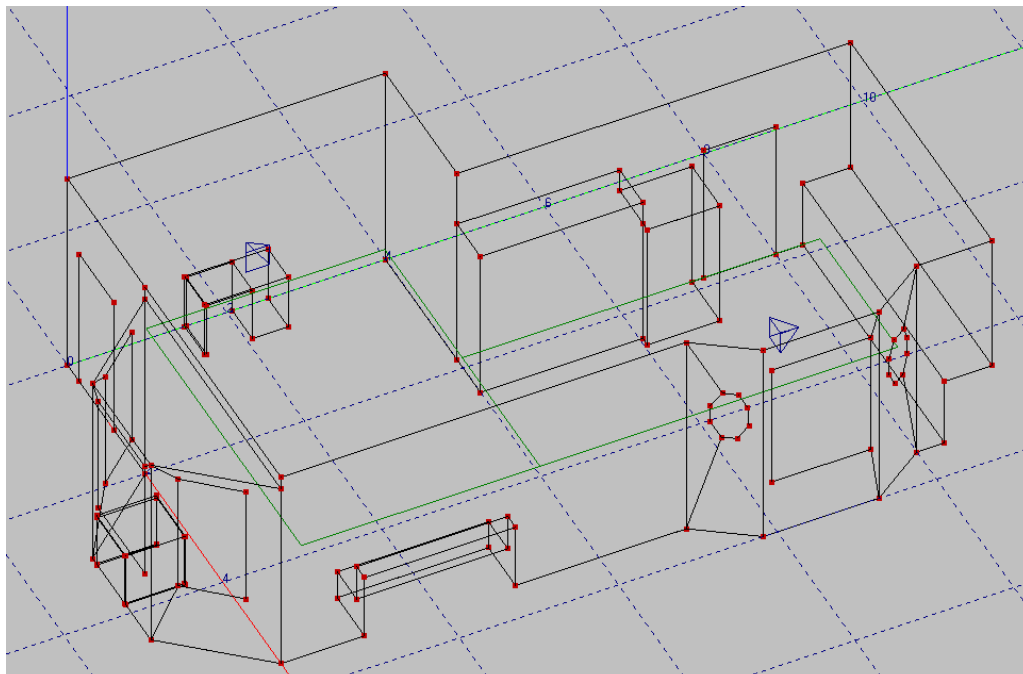
Po vytvoření celého 3D modelu pomocí zásadních ploch ve sledovaném prostoru byly v programu EASE přiděleny charakteristiky všem plochám, které ovlivňují dobu dozvuku v místnosti. Jedná se o koeficienty absorpce. Mezi zásadní plochy ovlivňující tuto dobu dozvuku se řadí stěny a strop, podlaha z parket, okna, dveře a kuchyňská linka, která je vyrobena převážně z dřevěného materiálu. Při uzavřeném modelu je software schopný vypočítat objem místnosti i požadovanou dobu dozvuku. Objem místnosti daného prostoru odpovídá objemu vytvořeného modelu. Simulace doby dozvuku v softwaru byla upravena, aby odpovídala naměřeným hodnotám.

Graf, který porovnává měření doby dozvuku s dobou dozvuku simulovanou v softwaru, lze vidět na obr. 3.5. Křivka měřené doby dozvuku znázorňuje průměr všech šestnácti měření v třetinooktávových pásmech. Program EASE simuluje veškeré hodnoty ve frekvenčním rozsahu od 100 Hz do 10 000 Hz. Rozdíl mezi křivkou doby dozvuku z měření a ze simulace je minimální, ovšem existuje. Důvodem takového rozdílu je nezaznamenání veškeré výbavy sledovaného prostoru do 3D modelu vytvořeném v softwaru. Dále mohou vzniknout odlišnosti u koeficientů absorpce použitých materiálů. Program EASE také předpokládá absolutní klid a žádný vnější vliv různých ruchů a vibrací.

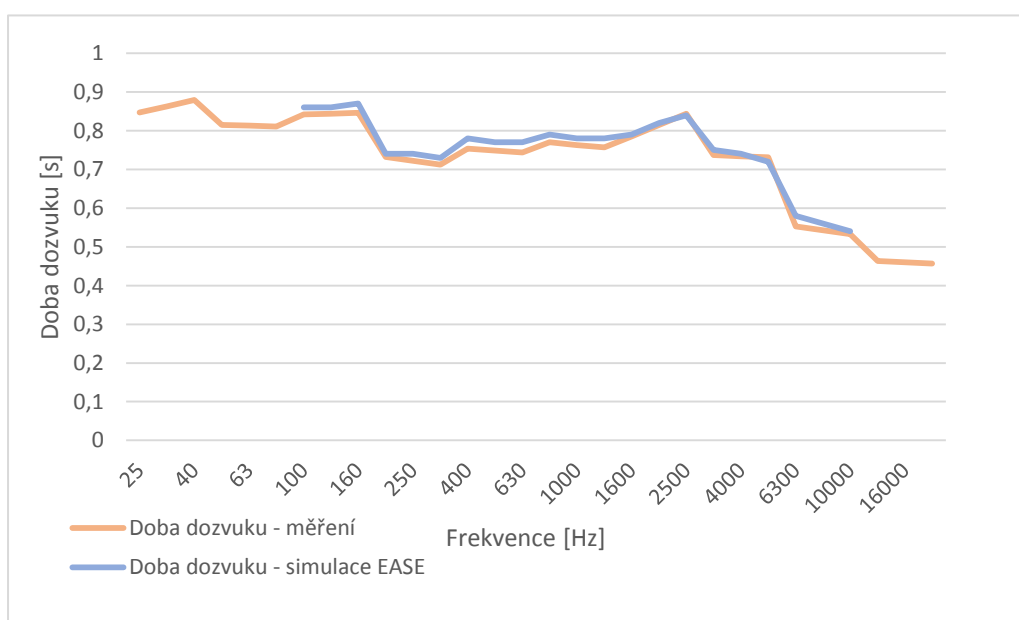
Pro všechny výpočty a simulace provedené v EASE je nutné přidat do 3D modelu také reproduktor a poslechovou plochu z projektové databáze. Hlavním aspektem se stává absence všesměrového zdroje zvuku v knihovně EASE. Je proto nutné vybrat z knihovny takový reproduktor, který by mohl alespoň částečně nahradit všesměrový zdroj zvuku použitý během měření místnosti. Pro účely simulace byl z projektové databáze vybrán reproduktor Yamaha F15. Do 3D modelu místnosti byl reproduktor Yamaha F15 vložen dvakrát. Důvodem je reálné měření, během kterého byly zvolené hned dvě pozice zdroje zvuku Z1 a Z2, viz tabulka A.9 v příloze. Reprodukory v modelu jsou nasměrované k poslechovému místu, tedy kolmým směrem k pohovce.

Poslechová plocha místnosti se vkládá do modelu pomocí položky „Audience Area“. Opět je třeba zvolit čtyři body, mezi kterými se poslechová plocha bude nacházet. Tato plocha se po spojení čtyř bodů vytvoří ve výšce 1,2 m nad podlahou, což je dle kapitoly 1.3.4 průměrná výška lidského ucha při sezení. Do 3D modelu místnosti byly vloženy hned dvě poslechové plochy. První poslechová plocha pokrývá téměř celou hlavní část prostoru, která se primárně bude využívat k danému účelu. Je to prostor od simulovaného reproduktoru po pohovku. Druhá poslechová plocha je umístěna takovým způsobem, aby pokryla prostor před kuchyňskou linkou a nezasahovala do plochy první. Poslechové

plochy zasahují do těch míst, kde se předpokládá výskyt posluchače během reprodukce hudby. V tomto okamžiku je možné v programu EASE započít simulace, které jsou vloženy níže v této bakalářské práci.

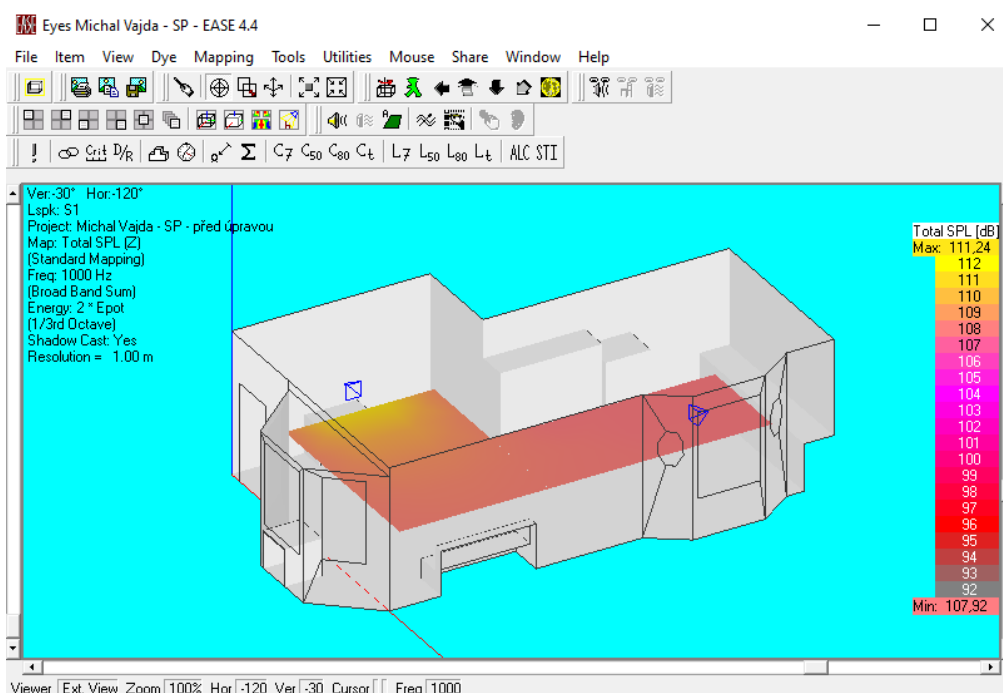


Obr. 3.4: 3D model místnosti před úpravou

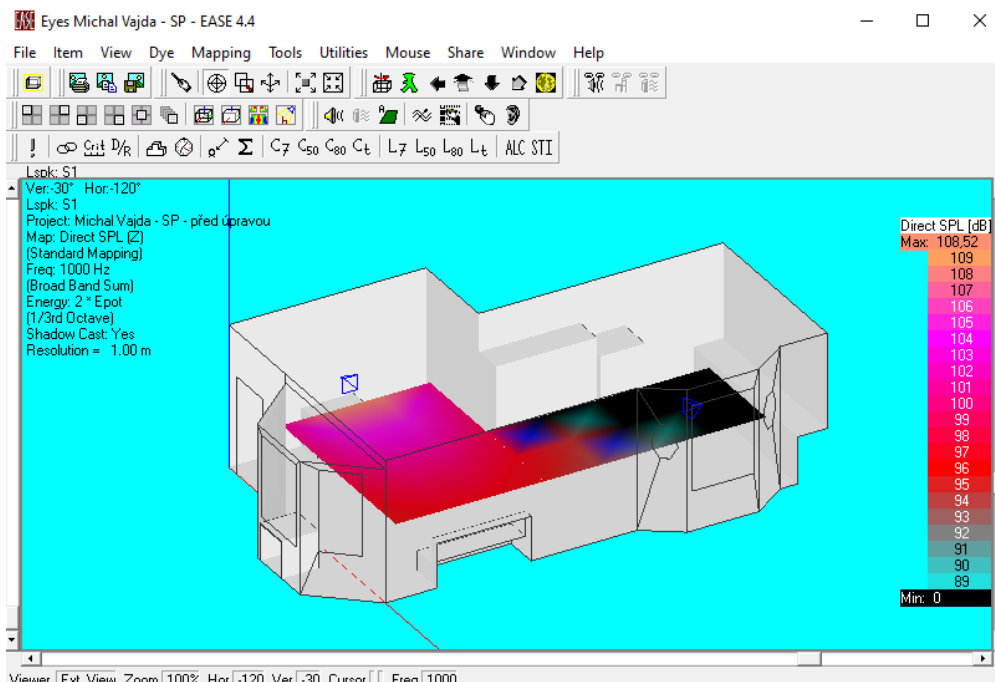


Obr. 3.5: Graf porovnání doby dozvuku měření a simulace v EASE

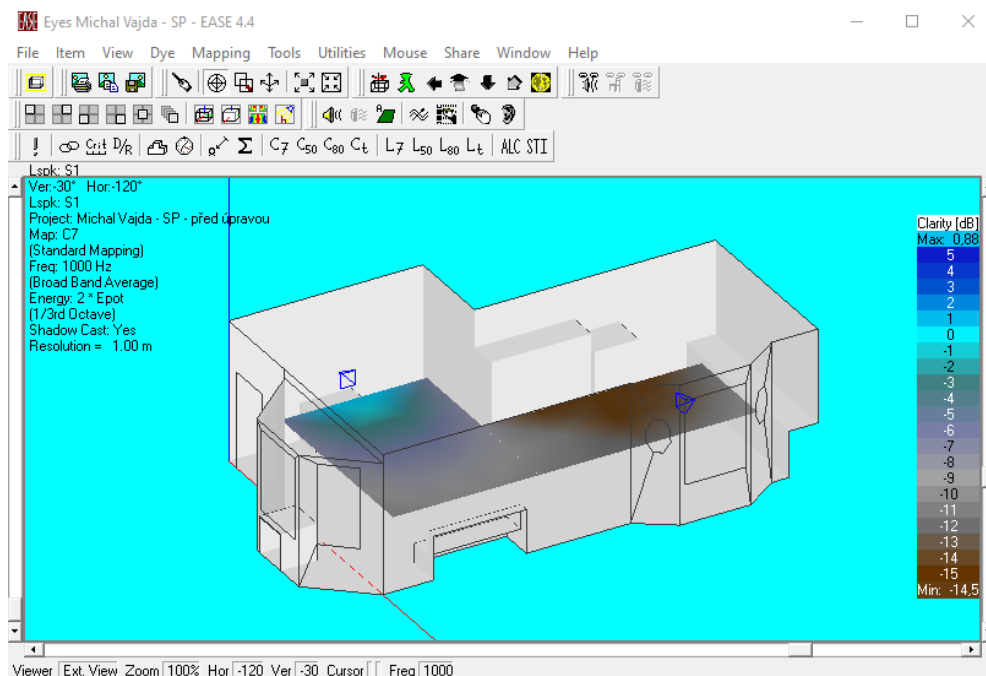
V programu EASE jsou požadované simulace k nalezení v záložce „Mapping“. Simulace celkové hladiny akustického tlaku (Total SPL), přímé hladiny akustického tlaku (Direct SPL), míry přímého zvuku C_7 , míry zřetelnosti C_{50} , míry jasnosti C_{80} a poměru přímého a odraženého zvuku (D/R ratio) byly zaznamenány pro oba zdroje Z1 a Z2 ve všech oktávových pásmech a jejich zobrazení je vloženo v Příloha B - Seznam elektronických příloh. Tyto simulace v modelu před úpravou jsou pro zdroj Z1 a kmitočet 1000 Hz, Broad Band (širokopásmově) zobrazeny na obrázcích níže.



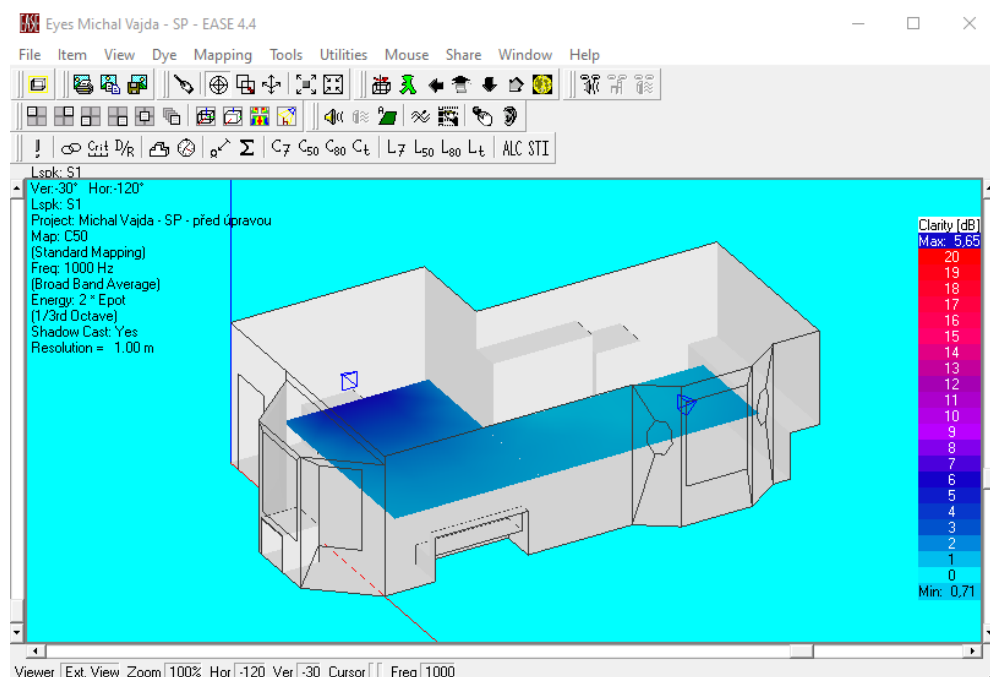
Obr. 3.6: Simulace Total SPL před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



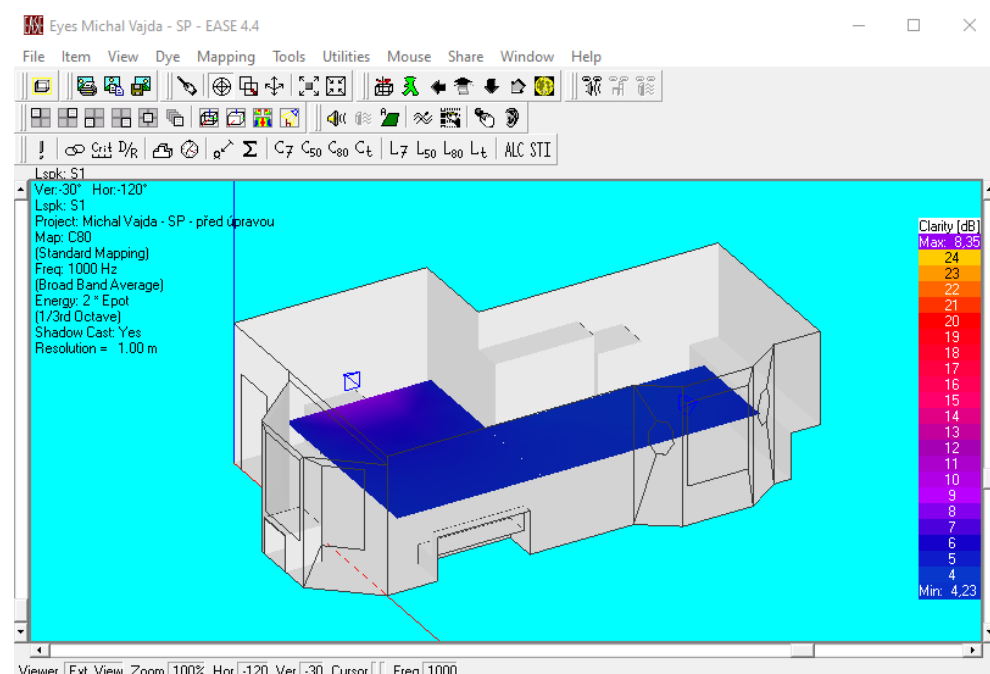
Obr. 3.7: Simulace Direct SPL před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



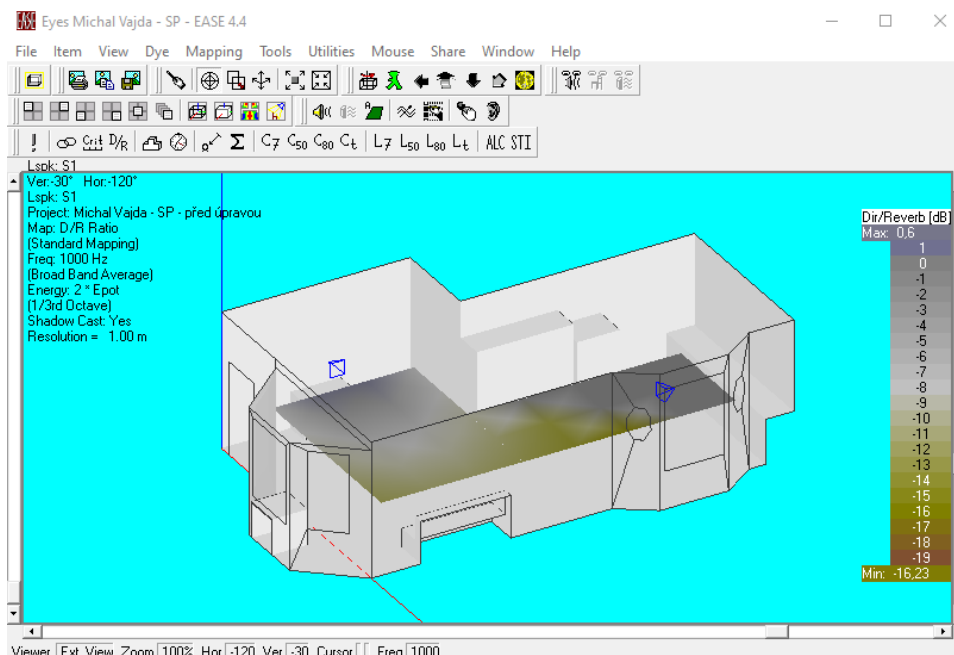
Obr. 3.8: Simulace C₇ před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



Obr. 3.9: Simulace C_{50} před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



Obr. 3.10: Simulace C_{80} před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



Obr. 3.11: Simulace D/R ratio před úpravou – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band

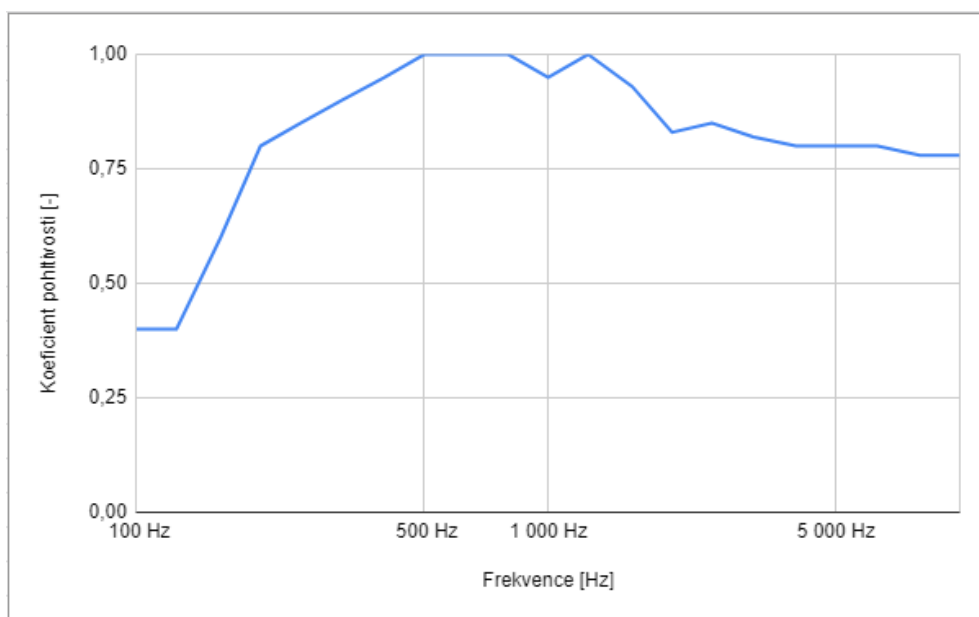
3.4 3D model a simulace po úpravě

Jelikož bylo zjištěno, že doba dozvuku ve sledovaném prostoru nevyhovuje požadavkům, je zapotřebí provést akustickou úpravu. V programu EASE byl pro tyto účely vytvořen 3D model prostoru, kde byly přidány akustické prvky, viz kapitola 2.3 této bakalářské práce.

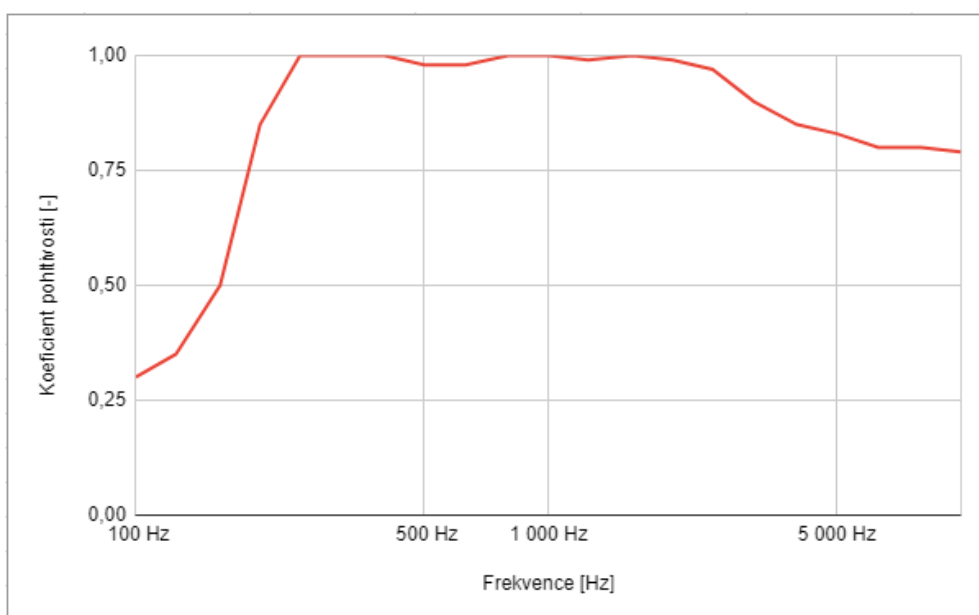
Pro přidání vlastních absorpčních prvků je třeba nejprve vytvořit vlastní materiál v databázi EASE. Stejným způsobem, který je detailněji popsán v kapitole 3.3, byly vytvořeny celkem tři nové materiály. Tyto materiály kopírují absorpční vlastnosti zvolených produktů pro tuto akustickou úpravu. Jedná se o akustické panely Woody Queen, Woody Puzzle Tower a Woody Wavy. Po přidělení koeficientů pohltivosti pro dané kmitočty materiálu je možné namodelovat vlastní objekt do prostoru. Kmitočtovou závislost koeficientu pohltivosti všech tří absorpčních panelů je možné vidět na obr. 3.12, 3.13 a 3.14.

Při vkládání akustických absorberů do 3D modelu a také do sledované místnosti nastává omezení několika faktory, které se musí zohlednit. Hlavním problémem je omezená plocha pro zavěšení panelů. V hlavní poslechové části omezuje výklenek s okny. Dále nelze všet akustické panely na strop, jelikož je na něm umístěno osvětlení místnosti, viz obr. 3.1 a 3.2, a také není zavěšení prvků vhodné pro praktické využívání místnosti. V druhé části prostoru je mnohem více omezení, jelikož se zde opět

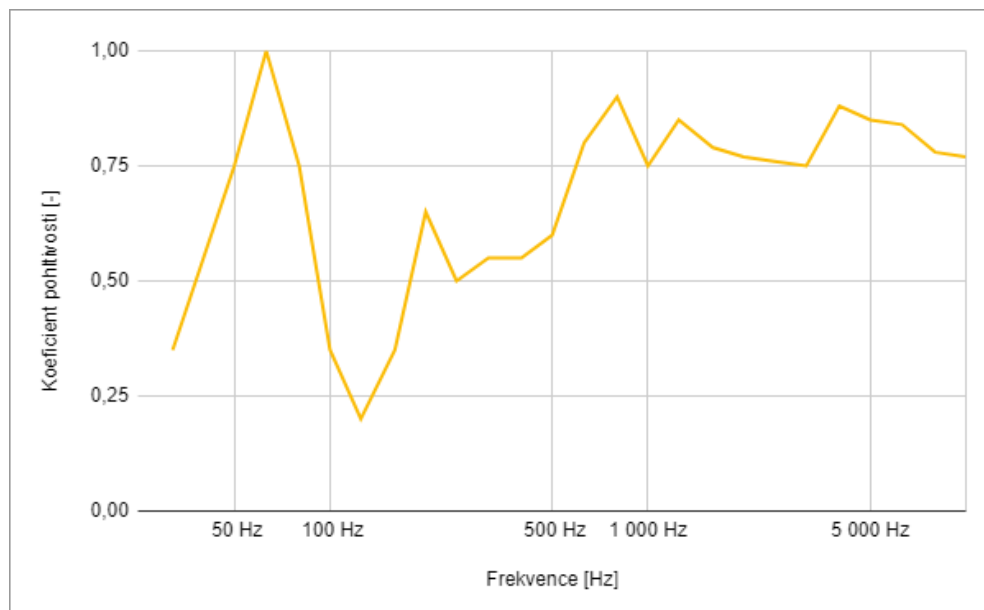
nachází výklenek s okny, ale hlavně velkou část ploch obsazuje kuchyňská linka. Ve sledované místnosti nepřipadá v úvahu akustická vestavba, která by vzhledem k estetice nebyla vhodná. Dále je také minimální výskyt variant, jak by se dala akustická vestavba efektivně provést. Proto bude využito pouze kusových produktů od společnosti Ekustik.



Obr. 3.12: Kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti (Woody Queen)



Obr. 3.13: Kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti (Woody Puzzle Tower)

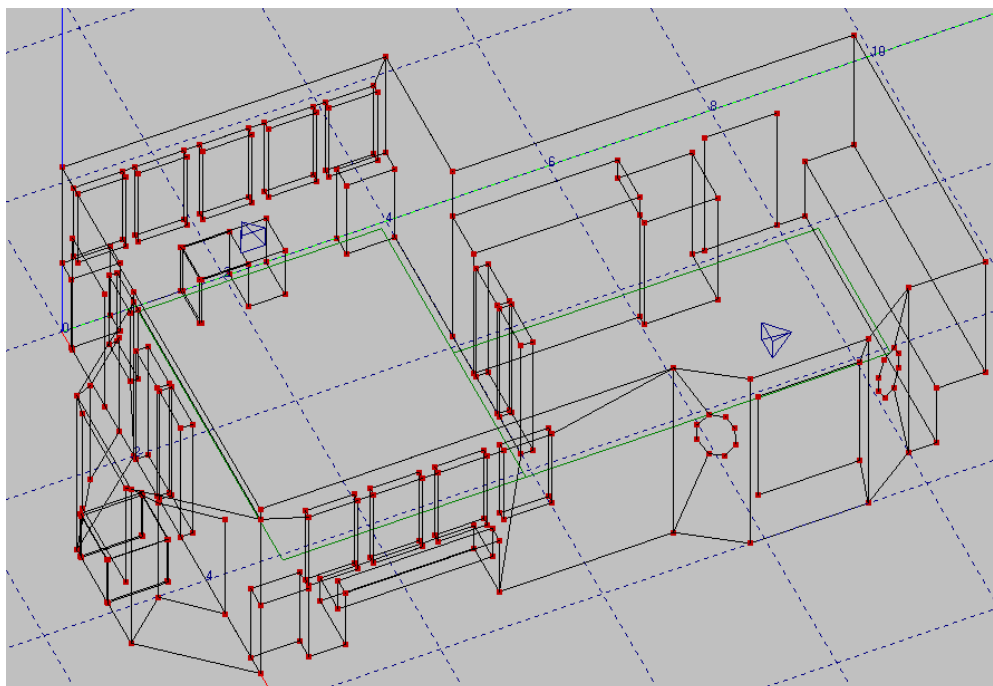


Obr. 3.14: Kmitočtová závislost koeficientu pohltivosti (Woody Wavy)

Sledovaná místnost podle normy ČSN 73 0526 [5] spadá pod jisté parametry, které musí splňovat, aby byla upravená doba dozvuku vhodná. Tyto parametry dělí místnosti podle účelu užívání. V tomto případě jde o místnosti určené k poslechu hudby, přesněji se jedná o místnost „Mixážní hala pro vícekanálový záznam zvuku“, viz tabulka A.1 v příloze. Z tabulky pro daný účel je možné odečíst hodnotu optimální doby dozvuku, která je pro sledovanou místnost rovna 0,5 s. Dále dle normy ČSN 73 0526 [5] existuje přípustné rozmezí dob dozvuku v závislosti na středním kmitočtu – tzv. *toleranční pásmo*. Toleranční pásmo optimální doby dozvuku bylo přepočítáno pro sledovanou místnost a tyto hodnoty ucelené v tabulce jsou vloženy do přílohy A.7.

Ze vztahů pro výpočet doby dozvuku vyplývá, že čím více je v dané místnosti ekvivalentní pohltivé plochy, tím kratší je dozvuk. Tedy pokud je potřeba zkrátit dozvuk v místnosti je nutné navýšit ekvivalentní pohltivou plochu. V případě, že křivka dozvuku v nějakém frekvenčním pásmu leží nad horní mezí tolerančního pásma, je potřeba přidat panel, který má maximální účinnost v tomto frekvenčním pásmu. Pokud leží křivka dozvuku pod spodní hranicí tolerančního pásma, tak je nutné odebrat panel, který má největší účinnost v daném frekvenčním pásmu. Za předpokladu, že celá křivka doby dozvuku leží mezi oběma hranicemi tolerančního pásma, je žádoucí, aby byl její průběh rovnoměrný. Vyhazení křivky doby dozvuku se dá docílit úpravou počtu kusů jednotlivých panelů. V případě, že křivka doby dozvuku leží celá v tolerančním pásmu a je dostatečně rovnoměrná, stává se tak počet panelů hledaným výsledkem. Je nutné také dbát na finanční rozpočet pro danou akustickou úpravu.

Do 3D modelu proto bylo vloženo celkem 10 kusů akustických absorbérů Woody Queen (2.3.1), 4 kusy akustických absorbérů Woody Puzzle Tower (2.3.2) a 3 kusy akustických absorbérů Woody Wavy (2.3.3). Absorbéry Woody Queen byly rozmístěny v modelu následujícím způsobem: Celkem pět panelů tohoto typu bylo umístěno na stěnu za simulovaný reproduktor. Na protilehlou stěnu, tedy na straně pohovky bylo umístěno hned pět těchto panelů. Poslední panel tohoto typu se nachází mezi výklenkem v hlavní poslechové části prostoru a dveřmi směřujícími z místnosti na balkon. Důvodem právě takového rozmístění panelů Woody Queen je co možná největší a neefektivnější pohlcení prvotních odrazů od přímých zvukových vln šířících se od zdroje. V ideálních případech je snaha rozmístit panely takovým způsobem, aby kolem místa poslechu vznikla zóna bez odrazu. Panely nebylo možné umístit na stěnu vpravo od zdroje zvuku z důvodu plánované dekorace. Absorbéry Woody Wavy byly rozmístěny v modelu do tří rohů hlavní poslechové části místnosti. Důvodem pro umístění těchto panelů do rohů místnosti je největší efektivita pohlcování právě v této pozici. Závěrem byly do modelu přidány absorbéry Woody Puzzle Tower, které jsou rozmístěny po dvojicích. První dvojice absorbérů je postavena před výklenek v hlavní poslechové části, aby zamezila odrazům zvukových vln vytvořených právě ve výklenku. Druhá dvojice absorbérů je postavena v průchodu mezi oběma částmi celé místnosti. Zde je snaha o tlumení odrazů přicházejících z části s kuchyňskou linkou a druhým výklenkem. Absorbéry Woody Puzzle Tower jsou do prostoru vloženy tak, že nebudou vadit praktickému využívání místnosti. Rozložení akustických absorbérů do prostoru lze pozorovat na obr. 3.15.

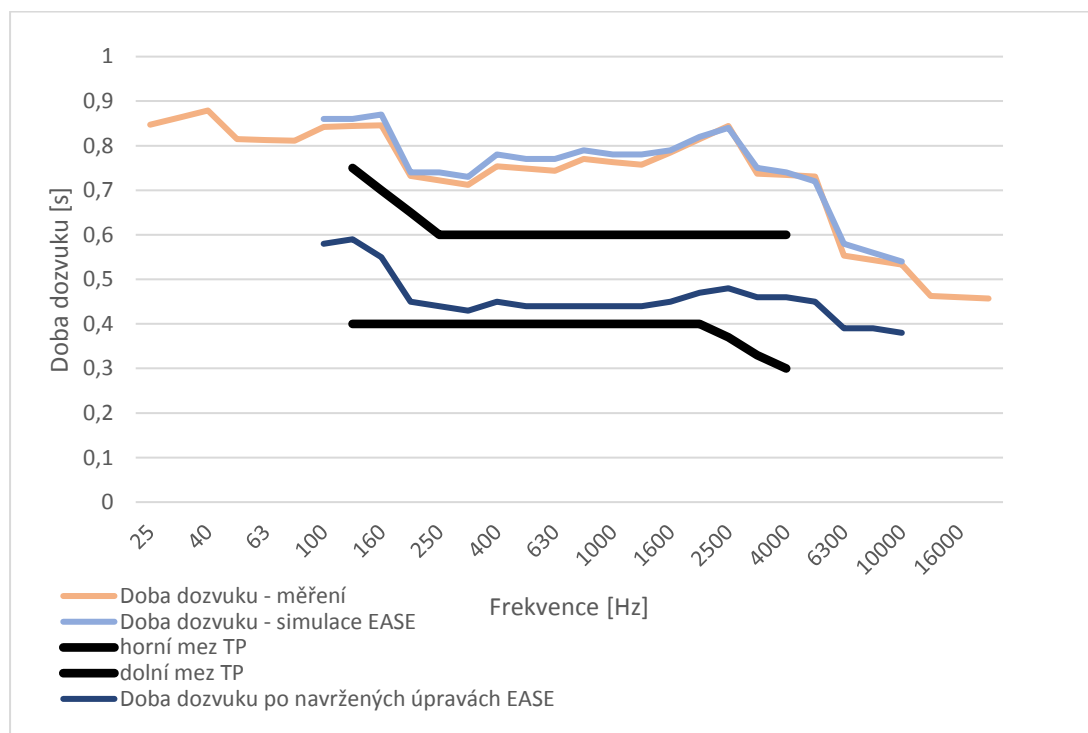


Obr. 3.15: 3D model místnosti po úpravě

Po vložení všech absorpčních prvků do prostoru byla znovu provedena simulace doby dozvuku pomocí programu EASE. Simulace po úpravě by měla prozradit funkčnost navržených úprav, tedy sníženou dobu dozvuku na požadovanou hodnotu a kmitočtovou vyrovnanost doby dozvuku. Graf doby dozvuku po navržené úpravě je zobrazen na obr. 3.16.

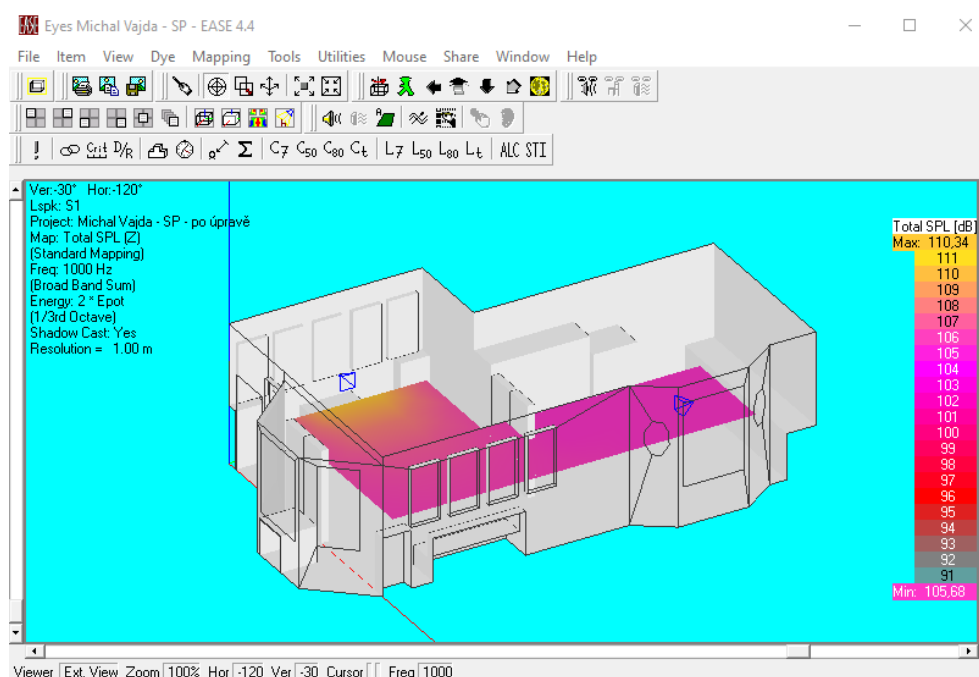
Jak lze vyčíst z grafu, simulovaná doba dozvuku se snížila pod hranici 0,5 s, což znamená dosažení nižších hodnot, než je optimální doba dozvuku. Největší pokles je zaznamenán na kmitočtu 2 500 Hz, kde se doba dozvuku snížila o 0,364 s. Nejvyšší doba dozvuku se objevuje na kmitočtu 125 Hz, kde se hodnota snížila na 0,59 s. Od kmitočtu 200 Hz výše je doba dozvuku téměř vyrovnaná.

Pokud je výsledek porovnán s českou technickou normou, přesněji ČSN 73 0526 [5] a tabulkou obsaženou v příloze A.1, je zjištěno, že sledovaný prostor není vhodné využívat za takovým účelem, jako jsou místnosti s optimální dobou dozvuku nižší než 0,3 s. Délka doby dozvuku při simulaci dosahuje hodnot v průměru 0,46 s. Ani toleranční pásmo těchto prostorů by neobsáhlo takovýchto hodnot doby dozvuku. Po zrealizování navržených akustických úprav bude možné daný prostor využívat za účelem mixážní haly pro vícekanálový záznam zvuku nebo za účelem televizní obrazové hlasatelny, dle tabulky v příloze A.1. V tomto případě optimální doba dozvuku sledované místnosti vyhovuje.

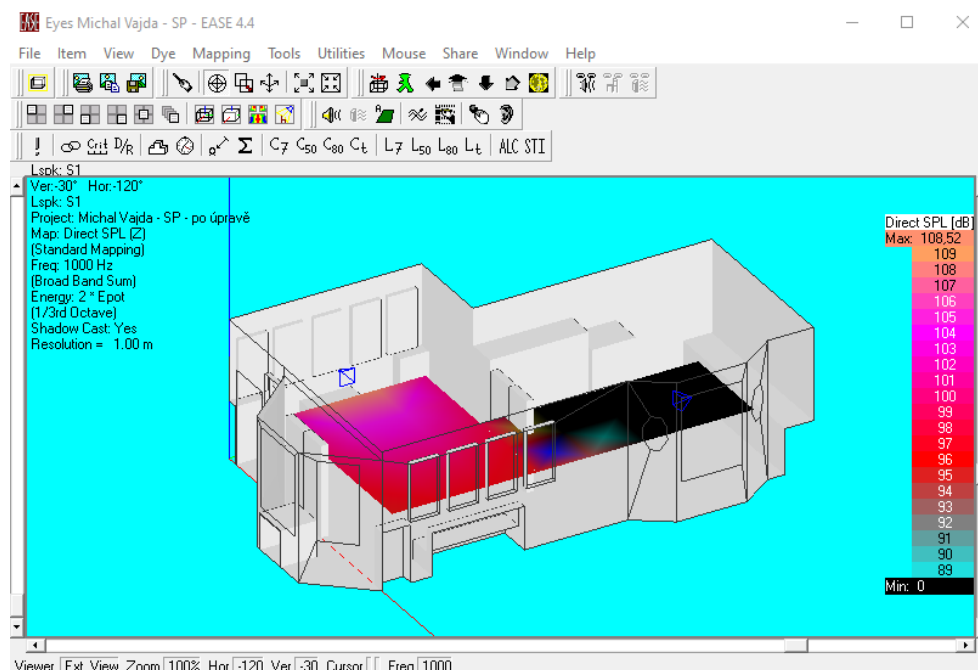


Obr. 3.16: Graf doby dozvuku po navržených úpravách – simulace EASE

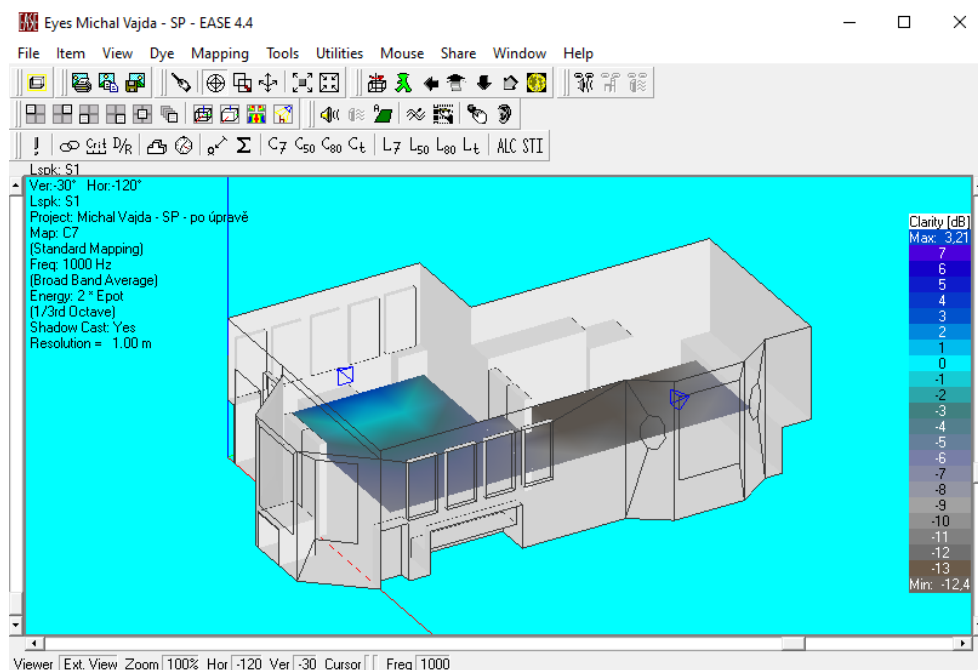
Kromě simulace doby dozvuku po úpravě 3D modelu byly pro prostor s navrženými úpravami provedeny v programu EASE simulace celkové hladiny akustického tlaku (Total SPL), přímé hladiny akustického tlaku (Direct SPL), míry přímého zvuku C_7 , míry zřetelnosti C_{50} , míry jasnosti C_{80} a poměru přímého a odraženého zvuku (D/R ratio). Data byla opět zaznamenána pro oba zdroje Z1 a Z2 ve všech oktávových pásmech a jejich zobrazení je vloženo v Příloha B - Seznam elektronických příloh. Tyto simulace v modelu po úpravě jsou pro zdroj Z1 a kmitočet 1000 Hz, Broad Band (širokopásmově) zobrazeny na obrázcích níže.



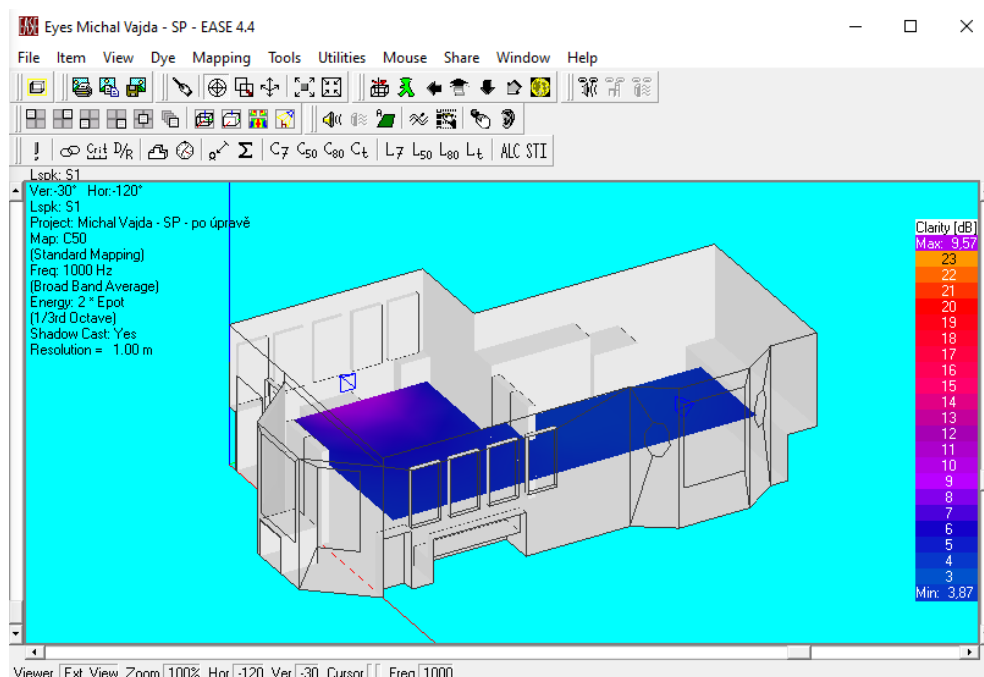
Obr. 3.17: Simulace Total SPL po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



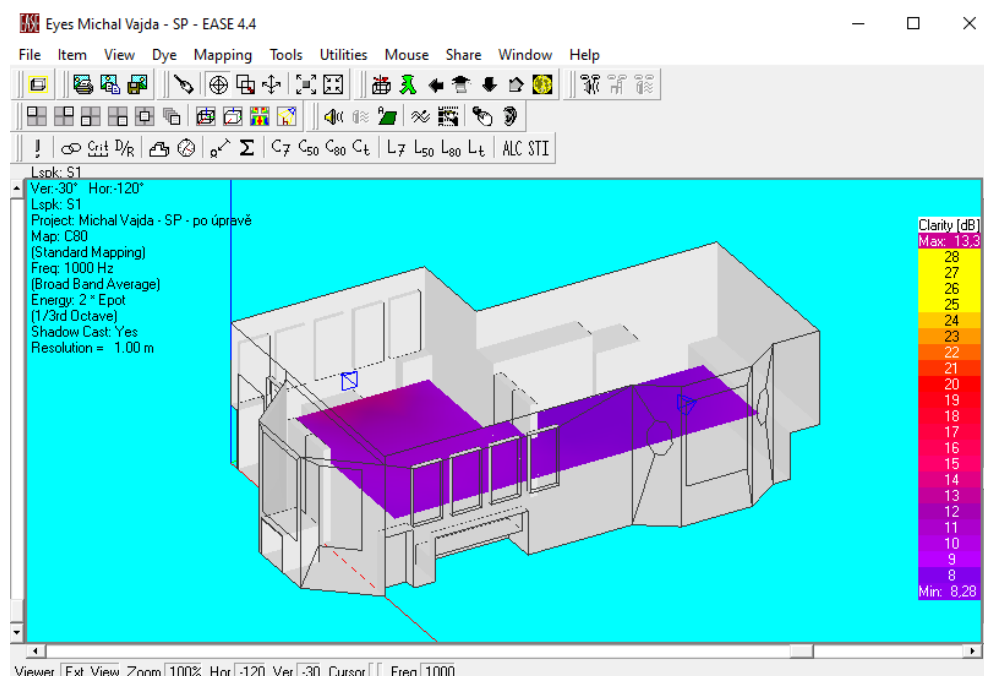
Obr. 3.18: Simulace Direct SPL po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



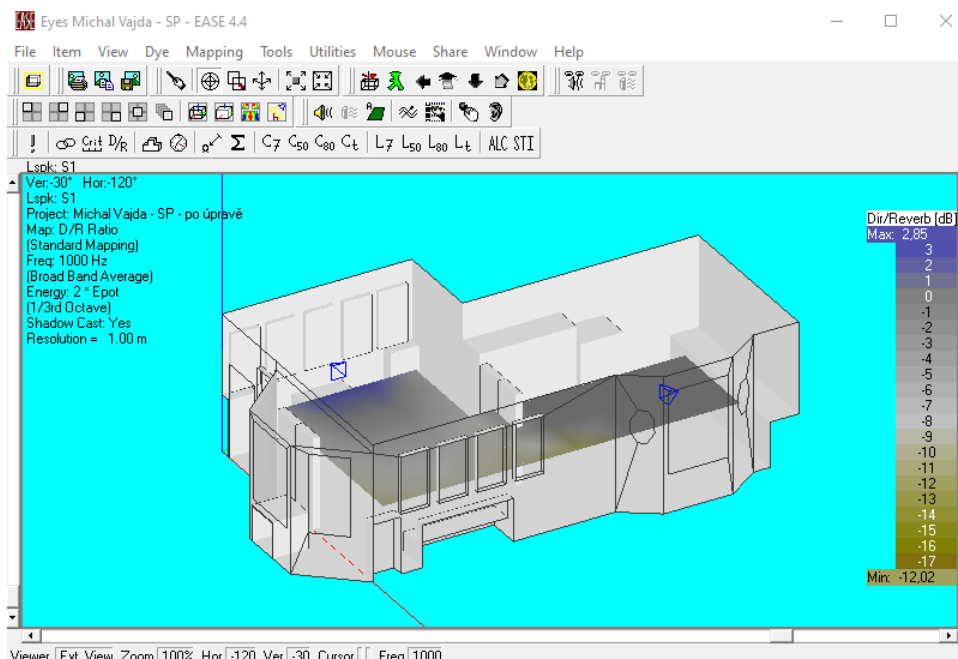
Obr. 3.19: Simulace C_7 po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



Obr. 3.20: Simulace C_{50} po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



Obr. 3.21: Simulace C_{80} po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band



Obr. 3.22: Simulace D/R ratio po úpravě – zdroj Z1, 1000 Hz, Broad Band

3.5 Kalkulátor Microsoft Excel

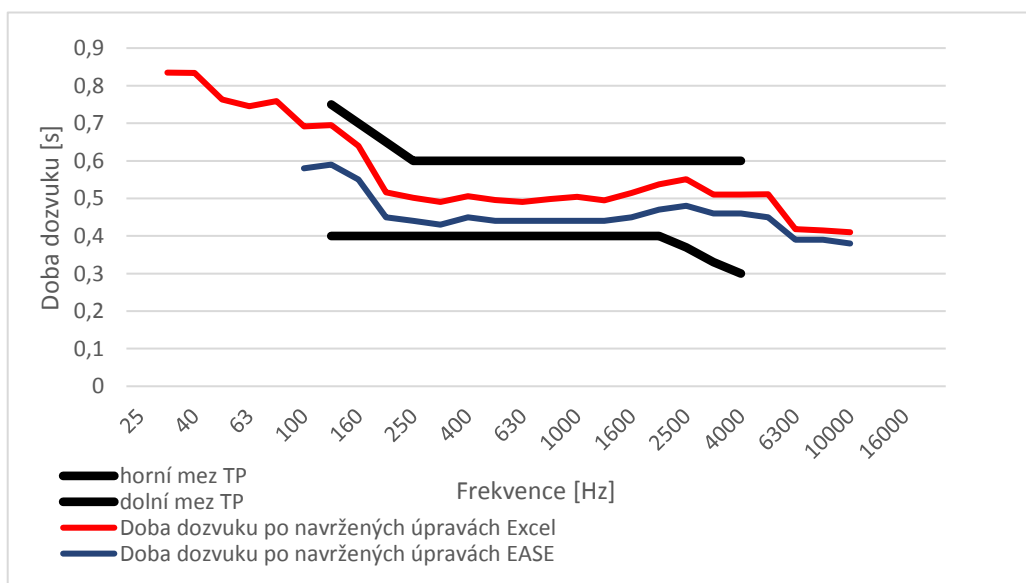
Pro účely této bakalářské práce byl vytvořen kalkulátor doby dozvuku v tabulkovém editoru Microsoft Excel. Hlavním důvodem tvorby tohoto kalkulátoru se stala skutečnost, že modelovací software EASE, který je v této bakalářské práci taktéž využitý, provádí veškeré simulace, včetně výpočtu doby dozvuku, pouze pro frekvenční pásma od 100 Hz do 10 000 Hz. Měření doby dozvuku má svá úskalí a jedním z nich jsou značné nepřesnosti v okrajových frekvenčních pásmech, která spadají do slyšitelného spektra lidského ucha. Pro tuto práci je však důležité pracovat i s těmito frekvenčními pásmy. Jedná se o frekvence pod 100 Hz a nad 10 000 Hz. Tyto frekvence je nutné zanalyzovat také pro možnou akustickou úpravu. Dále byl tento kalkulátor využitý pro srovnání výpočtů doby dozvuku podle Sabinova vzorce a Eyringova vzorce (více v kapitole 1.1.2). Kalkulátor v programu Excel je připravený pro práci se sledovaným prostorem. Každopádně je možné jednoduchými kroky tento kalkulátor poupravit a simulovat jím dobu dozvuku i jiných místností.

Jelikož simulace doby dozvuku v programu EASE, viz kapitoly 3.3 a 3.4, byla provedena pomocí výpočtu Eyringova vzorce, kalkulátor v programu Excel uvažuje pro tyto výpočty vzorec doby dozvuku podle Sabina. Hlavními vstupními parametry do tohoto kalkulátoru jsou měření doby dozvuku, horní a dolní hranice tolerančního pásma, objem místnosti a koeficient pohltivosti akustických obkladů a prvků.

Hranice tolerančního pásma závisí na převažujícím typu signálu v místnosti. V tomto případě se jedná o přípustné rozmezí doby dozvuku pro hudbu, viz tabulka A.7 v příloze. Koeficient pohltivosti akustických obkladů a prvků je možné získat z katalogových hodnot společností, které se věnují sériové výrobě akustických produktů. Pokud by se jednalo o nově vytvořený produkt, musel by se činitel zvukové pohltivosti naměřit v dozvukové místnosti.

V kalkulátoru je nejprve vypočítána ekvivalentní pohltivá plocha místnosti A_0 pro třetinooktávová pásma pomocí upraveného vzorce (1.7). Dále je vytvořena tabulka používaných absorbérů. V tomto případě se jedná o akustické panely Woody Queen, Woody Puzzle Tower a Woody Wavy od společnosti Ekustik. Do tabulky je nutné zadat ekvivalentní pohltivou plochu panelů vypočítanou pomocí vzorce (1.6) a počet kusů, který se vkládá do sledované místnosti. Vynásobením ekvivalentní pohltivé plochy akustického panelu konkrétního typu s počtem vložených kusů je získána ekvivalentní pohltivá plocha všech panelů vložených do prostoru. Následně součtem ekvivalentních pohltivých ploch včetně plochy A_0 a výpočtem doby dozvuku pomocí Sabinova vzorce (1.7) je získána výsledná doba dozvuku místnosti.

V případě, že se mění počet kusů jednotlivých produktů v tabulce, mění se také výsledná doba dozvuku v místnosti v celém frekvenčním pásmu. To, jakou měrou se doba dozvuku v místnosti změní, ovlivňuje činitel zvukové pohltivosti produktů. Šířku sledovaného frekvenčního pásma pro změnu doby dozvuku ovlivňuje též parametr činitele zvukové pohltivosti produktů. Graf srovnání dob dozvuku měřených i simulovaných v programech EASE a Excel před úpravou i po úpravě společně s hranicemi tolerančního pásma je možné vidět na obr. 3.23. Celý kalkulátor vytvořený v programu Microsoft Excel je vložený do Příloha B - Seznam elektronických příloh.



Obr. 3.23: Graf porovnání dob dozvuku po navržených úpravách simulací EASE a Excel

3.6 Měření doby dozvuku po úpravě

Jakmile byla provedena instalace akustických panelů do sledovaného prostoru podle návrhu a odůvodnění v kapitole 3.4, bylo možné započít měření doby dozvuku po akustické úpravě. Způsob měření se téměř nelišil od původního měření doby dozvuku před úpravou. Opět byl pro toto měření použitý všesměrový zdroj a všesměrový mikrofon. V průběhu měření byly pořízeny hodnoty z celkových šestnácti pozic mikrofonu metodou přerušného šumu v třetinooktávových pásmech. Pozice mikrofonu označené písmeny M1 – M8 jsou znázorněny na obrázku 3.3 a přesné pozice jsou definovány v tabulce v příloze A.9. Měření bylo provedeno taktéž pro dvě pozice zdroje Z1 a Z2. Po ukončení buzení místnosti širokopásmovým náhodným šumem a po poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB jsou získány hodnoty doby dozvuku. Hodnoty doby dozvuku v třetinooktávových pásmech po úpravě prostoru jsou vloženy do tabulky a přiloženy do přílohy Příloha B - Seznam elektronických příloh. Ze všech šestnácti měření byla vypočítána průměrná doba dozvuku v třetinooktávových pásmech a ta je zobrazena v tab. 3.2.

Tab. 3.2: Průměrná doba dozvuku v třetinooktávových pásmech po úpravě

Frekvence (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000
Doba dozvuku (s)	0,641	0,642	0,604	0,488	0,481	0,464	0,481	0,477	0,472	0,474	0,481
Frekvence (Hz)	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000	6 300	8 000	10 000	
Doba dozvuku (s)	0,478	0,491	0,510	0,530	0,486	0,478	0,469	0,423	0,421	0,409	

Z tabulky 3.2 je zřejmé, že doba dozvuku klesla na hodnotu v průměru 0,495 s a v porovnání s dobou dozvuku měřenou před akustickými úpravami klesla na všech frekvencích v rozsahu od 25 Hz do 20 000 Hz. Srovnání dob dozvuku měřených před úpravou i po úpravě je možné sledovat na obr. 3.26. Největší pokles doby dozvuku je zaznamenán na frekvenci 2 500 Hz. Zde se doba dozvuku snížila o 0,314 s. Oproti tomu nejmenší pokles doby dozvuku činí 0,059 s na frekvenci 25 Hz. I v tomto případě platí, že odchylka měření se se vzrůstajícím kmitočtem snižuje.

Výsledná doba dozvuku po akustických úpravách ve všech frekvenčních pásmech vyhovuje rozmezí tolerančního pásma a také je velmi blízká optimální době dozvuku pro daný účel místnosti. Od kmitočtu 200 Hz výše je doba dozvuku téměř vyrovnaná. Výjimku tvoří kmitočty 2000 Hz, 2500 Hz a kmitočty pod 200 Hz, které přesahují hodnotu 0,5 s.

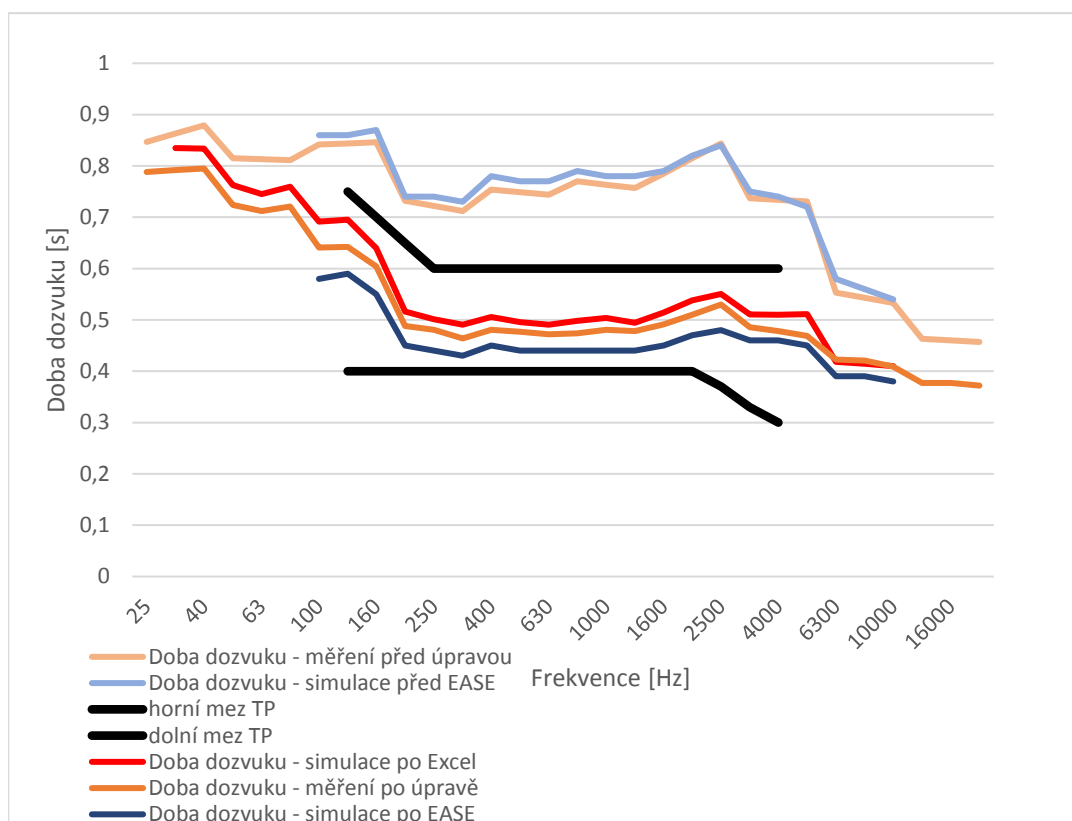
Měření doby dozvuku po úpravě potvrdilo simulace provedené v programech EASE a Microsoft Excel. Při těchto podmínkách je možné prostor využívat za účelem mixážní haly pro vícekanálový záznam zvuku nebo za účelem televizní obrazové hlasatelny podle tabulky v příloze A.1.



Obr. 3.24: Sledovaný prostor po úpravě – část 1a)



Obr. 3.25: Sledovaný prostor po úpravě – část 1b)



Obr. 3.26: Graf porovnání dob dozvuku měřených i simulovaných

4. DODATEČNÝ NÁVRH ÚPRAV

Tato část bakalářské práce čerpá převážně z literatury [1][16][17].

Po vyhodnocení doby dozvuku měřené po provedení akustických úprav, kterou je možno vidět na obr. 3.26, lze soudit, že akustické úpravy v prostoru jsou účinné a dostačující k účelu dané místnosti. Ovšem od kmitočtu 200 Hz níže doba dozvuku strmě stoupá k hodnotě téměř 0,8 s. V takovém případě může při poslechu nastat mírné převažování nízkých frekvencí. Jelikož je požadována kmitočtově vyrovnaná doba dozvuku, byl pro tento případ vytvořený dodatečný návrh akustických úprav. Touto úpravou je možno zmírnit růst doby dozvuku na nízkých frekvencích a celkovou hodnotu ještě více snížit. K této dodatečné úpravě jsou využity obklady založené na principu rezonance, přesněji Helmholtzovy rezonátory.

K úpravě jsou navrženy dva Helmholtzovy rezonátory, jejichž parametry byly vypočítány ze vzorců v kapitole 1.2.2. První z rezonátorů pracuje v kmitočtovém rozsahu od 36,78 Hz do 49,54 Hz. Druhý z rezonátorů je laděný pro kmitočtový rozsah od 79,59 Hz do 103,74 Hz. Všechny parametry obou navržených Helmholtzových rezonátorů jsou shrnuty v příložené tab. 4.1.

Pro výrobu Helmholtzových rezonátorů jsou kromě parametrů navrženy také materiály, ze kterých by měly být pro jejich správné fungování vyrobeny. Hlavní konstrukci je možné sestavit z tzv. „dřevotřískového“ materiálu. Konkrétně lze využít MDF desky, jejichž materiál je pevný a má optimální rozložení hustoty. Celou konstrukci je nutné kvalitně spojit k sobě tak, aby odolala vnějším vlivům při běžném užívání místnosti a aby bylo docíleno naprosté vzduchotěsnosti rezonátoru. Pro pevné spojení mohou být využity šrouby. Pro zaručení vzduchotěsnosti je doporučeno utěsnění lepidlem na bázi MS polymeru. Dovnitř rezonátoru je možné vložit čedičovou vatu např. značky Isover, která se oboustranně připevní geotextilií.

Do sledovaného prostoru by měly být oba Helmholtzovy rezonátory přiražené ke stěně, před níž je umístěna pohovka, viz obr. 3.25.

Tab. 4.1: Navržené parametry pro výrobu Helmholtzových rezonátorů

	Výška (m)	Šířka (m)	Hloubka (m)	Objem (l)	Délka dutiny (m)	Průměr dutiny (m)	Kmitočtový rozsah (Hz)
Rezonátor č.1	1,20	0,45	0,26	140,40	0,01	0,10	36,78 - 49,54
Rezonátor č.2	0,40	0,20	0,26	20,80	0,01	0,07	79,59 - 103,74

5. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na návrh akustických úprav prostoru. Cílem bylo změřit dobu dozvuku ve sledované místnosti a upravit ji takovým způsobem, aby daná místnost vyhovovala účelu a aby byla doba dozvuku kmitočtově vyrovnaná. Konkrétně byla místnost předurčená pro poslech hudby.

Nejprve bylo provedeno měření doby dozvuku v třetinooktávových pásmech v daném prostoru. Průměrné hodnoty doby dozvuku dosahovaly téměř 0,75 s a pro účely místnosti nebyly optimální. Následně byl vytvořen 3D model místnosti v programu EASE, kde byla provedena simulace doby dozvuku s hodnotami upravenými dle hodnot z měření. Do programu EASE byly vloženy vlastní materiály, které simulují akustické absorbéry vyráběné společností Ekusik.

Jelikož je doba dozvuku v daném prostoru nevyhovující, byly pro její zkrácení navrženy akustické úpravy. Vložené akustické absorbéry byly namodelovány do prostoru takovým způsobem, aby pohltily maximální počet přímých i odražených zvukových vln šířících se od zdroje primárně v hlavní poslechové části místnosti. Po úpravě modelu s vloženými absorpčními prvky byla provedena opět simulace doby dozvuku.

Výsledky simulace v místnosti s akustickými úpravami ukazují, že se doba dozvuku podstatně sníží, a to pod hodnotu 0,5 s. Funkčnost navržených úprav dále potvrzuje simulace vytvořená v programu Microsoft Excel.

Následně byl návrh akustických úprav realizován a bylo provedeno měření doby dozvuku v třetinooktávových pásmech. Toto měření potvrdilo předchozí simulace a doba dozvuku se podařila snížit na optimální úroveň. V porovnání výsledné doby dozvuku s tolerančním pásmem pro daný účel místnosti bylo zjištěno, že sledovanou místnost je možné využívat jako mixážní halu pro vícekanálový záznam zvuku, kde optimální doba dozvuku dosahuje hodnoty 0,5 s.

Na závěr byl vytvořen dodatečný návrh úprav pomocí Helmholtzových rezonátorů, který v případě realizace pomůže snížit a vyrovnat dobu dozvuku na nízkých kmitočtech.

LITERATURA

- [1] *Acoustic Modelling* [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <http://www.acousticmodelling.com/helmholtz.php>
- [2] *Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_02.pdf
- [3] ANTEK, M., VONDRÁŠEK, M. *Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů* [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <http://poseidon2.feld.cvut.cz/AES/schuze2004/vondrasek.pdf>
- [4] ČSN 73 0525 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. 1998.
- [5] ČSN 73 0526 *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku*. 1998.
- [6] ČSN 73 0527 *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. 2005.
- [7] ČSN EN 12354-6 *Stavební akustika - Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků - Část 6: Zvuková pohltivost v uzavřených prostorech*. 2004.
- [8] ČSN EN ISO 3382-1 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. 2009.
- [9] ČSN EN ISO 3382-2 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. 2009.
- [10] ČSN EN ISO 5577 *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení ultrazvukem - Slovník*. 2018.
- [11] ČSN ISO 3382 *Akustika - Měření doby dozvuku místností a sálů s uvedením jiných akustických parametrů*. 1999.
- [12] DONAŤÁKOVÁ, Dagmar. *STAVEBNÍ AKUSTIKA A DENNÍ OSVĚTLENÍ: Modul 01 Stavební akustika*. FAST VUT v Brně, 2010.
- [13] *EASE - Enhanced Acoustic Simulator for Engineers* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.afmg.eu/en/ease-enhanced-acoustic-simulator-engineers>
- [14] *Ekustik: Produkty* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: www.ekustik.cz
- [15] *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1202-vlnova-akustika>
- [16] *Gear Space: The no.1 website for Pro Audio* [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://gearspace.com/board/studio-building-acoustics/665657-diy-helmholtz-resonator-made-easy.html>
- [17] *Helmholtz Resonator*. Mh-audio [online]. 2019 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <http://www.mh-audio.nl/Acoustics/HHReso.html>
- [18] HRŮZA, Vojtěch. *Rekonstrukce kulturně-vzdělávacího centra*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dagmar Donaťáková.

- [19] KOLMER, F., KYNCL, J. *Prostorová akustika*. 2. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982. ISBN 0451480.
- [20] *RDacoustic: High End audio* [online]. [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://rdacoustic.cz/cs/blog/2019/03/30/akustika-mistnosti/>
- [21] *VOSE: Monte Carlo Simulation a Simple Guide* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.vosesoftware.com/Monte-Carlo-simulation.php>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ČSN	České technické normy
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

A	ekvivalentní pohltivá plocha
I	intenzita zvuku
M	plošná hmotnost desky
N	počet vlastních kmitů
P	výkon
P_s	stupeň dojmu prostorovosti
S	plocha
S_n	různé plochy stěn
T	doba dozvuku
T_E	doba dozvuku podle Eyringa
T_M	doba dozvuku podle Millingtona
T_s	doba dozvuku podle Sabina
V	objem
a	rozměr
b	rozměr
c_0	rychlost šíření zvuku ve vzduchu
d	tloušťka
e	základ přirozených logaritmů
f	kmitočet
f_n	vlastní kmitočet
f_k	kritický kmitočet
f_r	rezonanční kmitočet
j	imaginární jednotka
l	délka hrdla rezonátoru
m	činitel útlumu
t	čas
w	hustota zvukové energie
$2\Delta l$	korekce otvoru
Φ	rychlostní potenciál jako funkce souřadnic a času
α	činitel zvukové pohltivosti
α_E	Eyringův činitel zvukové pohltivosti
α_n	různé činitele zvukové pohltivosti
π	3,14...
ρ	hustota vzduchu

SEZNAM PŘÍLOH

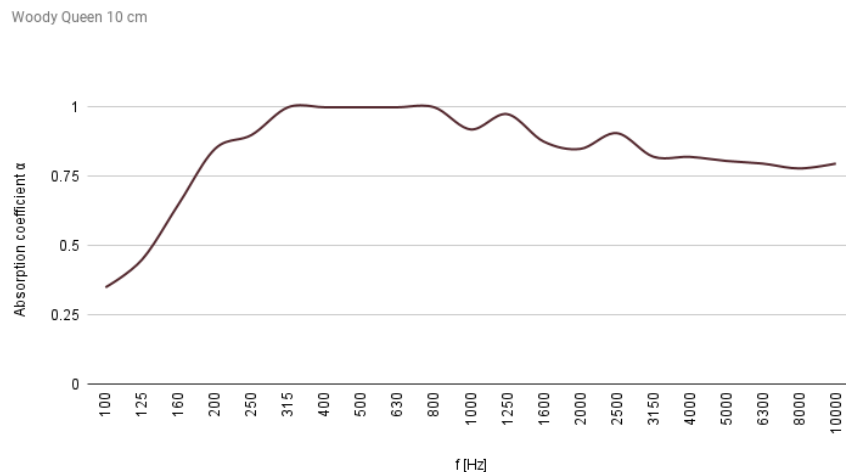
PŘÍLOHA A - UPŘESŇUJÍCÍ DOKUMENTY	54
PŘÍLOHA B - SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH	59

Příloha A - Upřesňující dokumenty

A.1 Tabulka optimální doby dozvuku pro daný účel, ČSN 73 0526 [5]

Typ místnosti	V_0 (m ³)	T_0 (s)	Hluk pozadí (tab.1)
Hlasatelská kabina, hlasatelna mimo obraz	30	0,3	1
Hlasatelna, dabingové studio	90	0,3	1
Malé činoherní studio, televizní obrazová hlasatelna	180	0,4	1
Střední činoherní studio	500	0,5	1
Velké činoherní studio	1000	0,8	1
Malé hudební studio	1500	1,0	1
Střední hudební studio	4000	1,5	2
Velké hudební studio (symfonická, operní hudba)	13000	1,8	2
Malé televizní/filmové studio	5000	0,8	3
Střední televizní/filmové studio	10000	1,1	3
Velké televizní/filmové studio	20000	1,3	3
Režijní místnost	130	0,3	3
Mixážní hala	700	0,7	3
Mixážní hala pro vícekanálový záznam zvuku	700	0,5	3
Technická místnost (přepis, střih apod.)		0,5	4

A.2 Obr. kmitočtové závislosti koeficientu pohltivosti (Woody Queen) [14]



A.3 Obr. Akustický absorbér – Woody Queen [14]

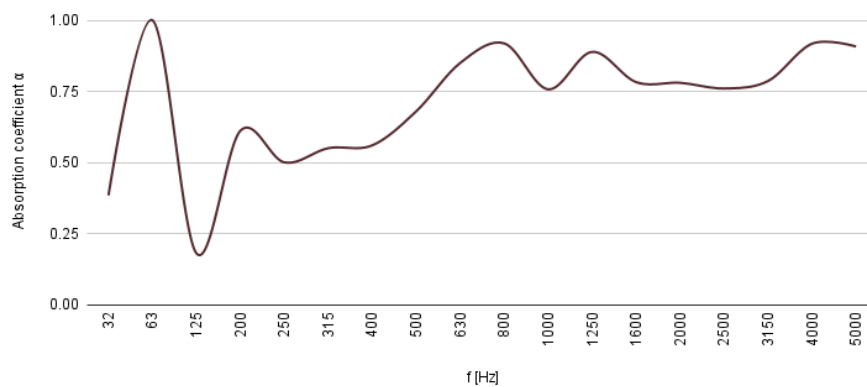


A.4 Obr. Akustický absorbér – Woody Puzzle Tower [14]



A.5 Obr. kmitočtové závislosti koeficientu pohltivosti (Woody Wavy) [14]

Woody Wavy - placement in the corner of the room



A.6 Obr. Akustický absorbér – Woody Wavy [14]



A.7 Tabulka rozsahu tolerančního pásma

Frekvence (Hz)	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz
Hranice HTP (s)	0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Hranice DTP (s)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Frekvence (Hz)	800 Hz	1 000 Hz	1 250 Hz	1 600 Hz	2 000 Hz	2 500 Hz	3 150 Hz	4 000 Hz
Hranice HTP (s)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Hranice DTP (s)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,37	0,33	0,30

A.8 Tabulka módů místnosti

	Délka	Šířka	Výška
Rozměry místnosti (m)	8,9	5,5	2,88
Základní frekvence (Hz)	19,21	31,09	59,72
První harmonická (Hz)	38,65	62,55	119,44
Druhá harmonická (Hz)	57,98	93,82	179,17
Třetí harmonická (Hz)	77,3	125,09	238,89

A.9 Tabulka pozice přístrojů při měření

Pozice	x (m)	y (m)	z (m)
Zdroj Z1	0,9	2	1,5
Zdroj Z2	4	7	1,5
Mikrofon M1	4,5	1	1,2
Mikrofon M2	1,5	1	1,2
Mikrofon M3	3	2,5	1,2
Mikrofon M4	1,5	3	1,2
Mikrofon M5	4,5	4	1,2
Mikrofon M6	3	5	1,2
Mikrofon M7	4,5	8	1,2
Mikrofon M8	2,5	8	1,2

Příloha B - Seznam elektronických příloh

- 1) Ease – model před úpravou
- 2) Ease – model po úpravě
- 3) Ease – materiály
- 4) Simulace Total SPL
- 5) Simulace Direct SPL
- 6) Simulace C7
- 7) Simulace C50
- 8) Simulace C80
- 9) Simulace DR ratio
- 10) Fotografie, obrázky a grafy
- 11) Kalkulátor Excel, tabulky doby dozvuku