



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 PRO HUDEBNÍ PRODUKCI

DESIGN AND REALIZATION OF ACOUSTIC TREATMENTS OF ACOUCTIC SPACE FOR MUSICAL
PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Skvaril

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Šimon Skvaril

ID: 195761

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace akustických úprav prostoru pro hudební produkci

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V aplikaci SketchUp vytvořte geometrický model vybraného prostoru určeného pro hudební produkci a provedte simulaci rozložení akustického tlaku v tomto prostoru pomocí software EASE. Provedte 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. Následně navržené akustické úpravy realizujte a výsledek opět ověřte měřením doby dozvuku v třetinooktávových intervalech. Vytvořte laboratorní návod pro tvorbu geometrického modelu prostoru v aplikaci SketchUp a návod pro jeho simulaci v aplikaci EASE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2, vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s. ISBN 0451480.
- [2] COC, 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: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

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

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

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.

Anotace

Tato práce se zaměřuje na akustické vlastnosti prostoru určeného k hudební produkci a reprodukci. Věnuje se postupům, které se používají při zjišťování akustických parametrů místnosti včetně virtuální modelace a simulace akustických vlastností daného prostoru. Následovně jsou navrženy různé typy akustických prvků, sestrojených tak, aby došlo ke zlepšení situace v určitých frekvenčních pásmech, a které by měly vylepšit kvalitu poslechu v problémovém prostoru. Na konec je provedena jejich konstrukce a jejich funkčnost je ověřena opětovným změřením akustických vlastností.

Klíčová slova

Absorbér; doba dozvuku; difuzer; měření doby dozvuku, modelování prostoru; prostorová akustika

Abstract

Subject of this thesis are acoustical properties of space which is used for musical production and reproduction. It covers procedures, which are used for finding out acoustical parameters of chosen space, including virtual modeling and software simulation. Next, there are calculations and design of acoustical elements, which should help to improve quality of music listening. At the end those elements are created and applicated with their functionality verified by measuring acoustical properties

Keywords

Absorber; diffuser; reverberance time; room acoustics; measurement of reverberance time; space modeling;

SKVARIL, Šimon. *Návrh a realizace akustických úprav prostoru pro hudební produkci*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/118124>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh a realizace akustických úprav prostoru pro hudební produkci“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

OBSAH

Seznam obrázků	8
Úvod	9
1. Prostorová akustika	10
1.1 Dozvuk.....	10
1.2 Dozvuk a frekvence	11
1.3 Výpočet doby dozvuku	12
1.3.1 Koeficient pohltivosti	12
1.3.2 Výpočet doby dozvuku podle Sabina	12
1.3.3 Výpočet podle Eyringa	13
1.3.4 Výpočet podle Millingtona	13
2. Měření doby dozvuku.....	14
2.1 Vybavení.....	14
2.2 Umístění.....	14
2.3 Metoda přerušovaného šumu	15
2.4 Metoda integrované impulzové odezvy.....	15
2.5 Výsledky měření poslechového prostoru studentského klubu Yacht.....	16
2.6 Optimální doba dozvuku pro zvolený prostor.....	17
2.7 Simulace akustických vlastností před úpravami prostoru	19
3. Návrh akustických prvků pro úpravu prostoru klubu Yacht.....	20
3.1 Absorbéry	20
3.1.1 Porézní absorbéry	20
3.1.2 Rezonující absorbéry	20
3.2 Difusory	21
3.2.1 Schroederovy difusory	21
3.3 Návrh akustických prvků pro studentský klub Yacht	22
3.3.1 Návrh absorbéru č.1.....	22
3.3.2 Návrh absorbéru č.2.....	23
3.3.3 Návrh difusoru.....	23
3.4 Rozmístění akustických prvků	25
3.5 Simulace akustických vlastností po úpravách prostoru	26
4. Výsledky měření délky doby dozvuku po aplikaci akustických prvků	28

5. Závěr	30
Seznam použitých symbolů veličin a zkratk:	31
Seznam použité literatury:	32
Seznam příloh.....	33
A Práce s modelovacím a simulačním softwarem.....	34
A.1 Modelovací software Google SketchUp	34
A.1.1 Základní informace.....	34
A.1.2 Přístup k softwaru Google SketchUp	35
A.1.3 Základní operace	35
A.1.4 Vytvoření modelu.....	36
A.2 Návod na simulaci v softwaru EASE	40
A.1.2 Import modelu	40
A.2.3 Kontrola modelu	40
A.2.4 Vytvoření vlastního materiálu.....	40
A.2.5 Přiřazení materiálu k jednotlivým plochám	41
A.2.6 Poslechová plocha.....	42
A.2.7 Reprodukory	43
A.2.8 Simulace	44
B Náhledy studentského klubu yacht v obou použitých softwarech	46
C Materiály použité pro simulaci	48
D Výsledky simulací.....	50
E Návrhy akustických obkladů.....	56
F Přílohy na CD	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Diagram časového průběhu dozvuku.....	10
Obr. 1.2: Ukázky šíření zvuku u jednotlivých typů módů, 1-axiální, 2-tangenciální, 3-šikmé [1]	11
Obr. 1.3: Ilustrace hladiny akustického tlaku při stojatém vlnění mezi dvěma rovnoběžnými stěnami [1]	12
Obr. 2.1: Diagram poklesu hlasitosti dozvuku o 60 dB	14
Obr. 2.2: Mapa rozmístění mikrofonů pro obě pozice reproduktoru	16
Obr. 2.3: Výsledky měření doby dozvuku - průměrné hodnoty.....	16
Obr. 2.4: Graf optimální doby dozvuku pro kmitočty 1000 Hz v závislosti na objemu.....	17
Obr. 2.5: Naměřené délky doby dozvuku v poměru k ideálním délkám doby dozvuku v závislosti na frekvenci.....	18
Obr. 2.6: Prostorové zobrazení veličiny clarity C80 v prostoru pro 1250 Hz	19
Obr. 2.7: Nasimulovaná frekvenční charakteristika délky doby dozvuku klubu Yacht podle Eyringova vzorce	19
Obr. 3.1: Porovnání odrazů od absorbéru, hladkého povrchu a difusoru [2].....	21
Obr. 3.2: Průřez děrovaným absorbérem [2].....	22
Obr. 3.3: Průřez 1d QRD difusorem	24
Obr. 3.4: Náhled na rozmístění akustických prvků č.1.....	25
Obr. 3.5: Náhled na rozmístění akustických obkladů č.2	25
Obr. 3.6: Porovnání simulace délky doby dozvuku před (modře) a po akustických úpravách (červeně)	26
Obr. 3.7: Simulace prostorového rozložení hodnoty C80 po aplikaci akustických prvků	27
Obr. 4.1: Porovnání frekvenční závislosti délky doby dozvuku před a po aplikaci akustických obkladů.....	28
Obr. 4.2: Porovnání T/T0 před a po aplikaci úprav (šedě je znázorněna hodnota před, černě po aplikaci)	29

ÚVOD

Každý nějakým způsobem uzavřený prostor má určité akustické vlastnosti, které se ovšem různě liší. Tyto vlastnosti mají velký dopad na to, jak vnímáme zvuk v daném prostoru. Pokud jde o prostor určený k poslechu hudby, nebo mluveného slova, je často nutné, aby byl tento prostor nějak akusticky vylepšen tak, aby nedocházelo k příliš velkému zkreslení a ztrátě srozumitelnosti. Mezi takové prostory se dají zařadit i hudební kluby, jejichž majitelé bohužel velmi často na takové úpravy buďto zapomínají, nebo je bez základních znalostí akustiky provedou špatně, což může snadno vést ještě ke zhoršení situace. Proto je poměrně častý jev, že hudba je v takových hudebních klubech nesrozumitelná a „zahuhlaná“. Majitelé se tento nedostatek pak snaží vyřešit tím, že pouze zvýší hlasitost, což má za následek pouze ten, že akorát hrozí snadnější poškození sluchu návštěvníků.

Proto je v této práci předmětem popis zkoumání samotných akustických vlastností studentského klubu Yacht, který není nikterak akusticky vylepšen. Jeden z důvodů, proč tomu tak není, je mimo jiné také to, že výrobky, které účinně fungují pro daný problém, se často pohybují ve vysokých cenových kategoriích, které pro studentský klub nejsou snadno dosažitelné. Proto se také práce zabývá, za použití odborné literatury, návrhem takových prvků, které je možné sestavit za pomoci běžně dostupných materiálů a nářadí. Tyto prvky jsou poté vytvořeny a použity, přičemž jejich funkčnost je ověřena porovnáním měření délky doby dozvuku, kdy jedno je provedeno před a druhé po použití těchto obkladů.

1. PROSTOROVÁ AKUSTIKA

Prostorová akustika je odvětvím vědy, které se zabývá zkoumáním a následnou kontrolou šíření zvukového vlnění především v uzavřených prostorách. V prostorách, které jsou primárně určeny k poslechu, jak mluveného slova, tak i živé či reprodukováné hudby, hraje jednu z největších rolí dozvuk a jeho doba trvání.

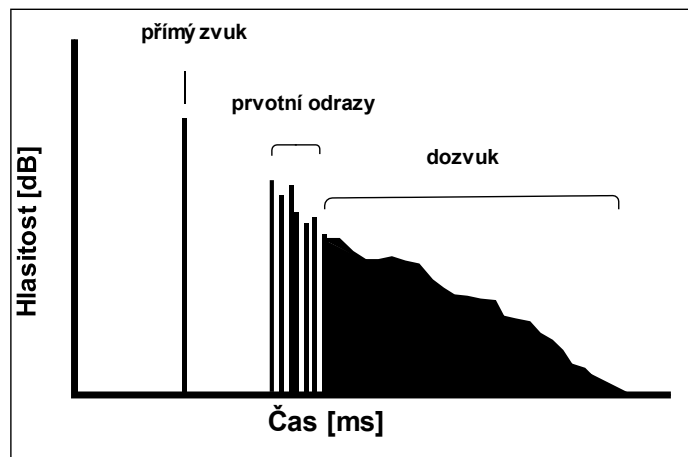
1.1 Dozvuk

Z důvodu relativně nízké rychlosti šíření zvukových vln ve vzduchu, která se pohybuje kolem 340 ms^{-1} , se již reálně projeví zpoždění odražených vln, které musí k posluchači urazit delší vzdálenost nežli vlny přímé. Tyto odražené zvukové vlny poté my jakožto posluchači vnímáme jako dozvuk. Množství, intenzita a směrovost těchto sekundárních vln pak určuje jeho vlastnosti.

Dobou trvání dozvuku lze částečně manipulovat za použití správných prostředků. Nejčastější je použití vhodných porézních materiálů, které způsobí pohlcení zvukové energie (takzvané absorbéry) nebo členitých úprav povrchů, takže se zvuková vlna rozloží a odrazí do více směrů současně (takzvané difusory). Tato práce se těmito prvky věnuje více dopodrobna v kapitole Akustické obklady.

Obecně se jeho délka trvání zjišťuje buďto výpočtem nebo změřením a všeobecně je brána jako pokles hladiny akustického tlaku o 60 dB od vypnutí zdroje zvuku. Výpočty jsou ovšem pouze orientační a bez skutečného proměření za pomoci vhodné techniky se tak v reálných případech neobejdeme.

Samotný dozvuk by se dal rozdělit na několik částí podle jeho časového průběhu. Nejprve k nám dorazí samotný přímý zvuk od zdroje, poté následuje krátká časová pauza, která je způsobena právě delší trasou, kterou první odražené zvukové vlny musí urazit k posluchači. Po ní následují takzvané „prvotní odrazy“ po nichž následuje jednolitý sled samotného dozvuku. Grafické znázornění lze vidět na obr. 1.1:



Obr. 1.1: Diagram časového průběhu dozvuku

1.2 Dozvuk a frekvence

Lidské ucho je schopno zpracovat zvuky v relativně širokém pásmovém spektru, jehož šířka se obvykle udává od 20 Hz do 20 000 kHz. Za použití vzorce (1.1) [1]:

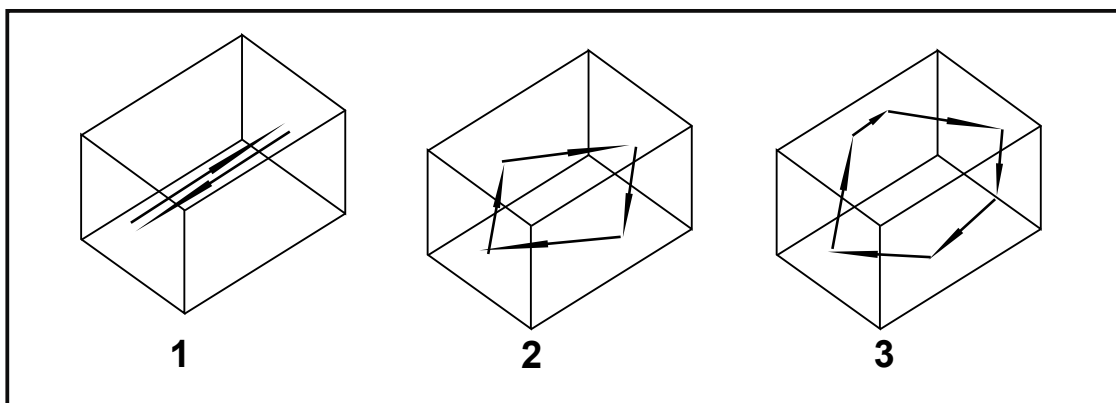
$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

kde λ značí vlnovou délku v metrech, c rychlost v ms^{-1} a f frekvenci v Hz, lze snadno vypočítat, že vlnové délky se pohybují v rozpětí od 17 metrů pro nejhlubší, basové frekvence až po 1,7 centimetru pro ty nejvyšší. Tento fakt má ten následek, že při kolizi zvukové vlny a překážky se různé vlnové délky zachovávají rozdílně, záleží především na velikosti (hloubky) překážky v poměru k vlnové délce dopadající zvukové vlny.

Toto velké rozpětí délek má mimo jiné ten následek, že u basových frekvencí se začnou projevovat takzvané módy místnosti, což jsou kmitočty, které svými vlnovými délkami odpovídají poměrům rozměrů místnosti (nejčastěji délce, šířce, výšce, které nazýváme axiálními módy, ještě existují tangenciální a šikmé, viz. obr. 1.2.), které svými rozměry odpovídají vlnové délce některých frekvencí. Přesnou frekvenci módů můžeme zjistit za pomoci výpočtu (1.2) [1], který dostaneme řešením vlnové rovnice.

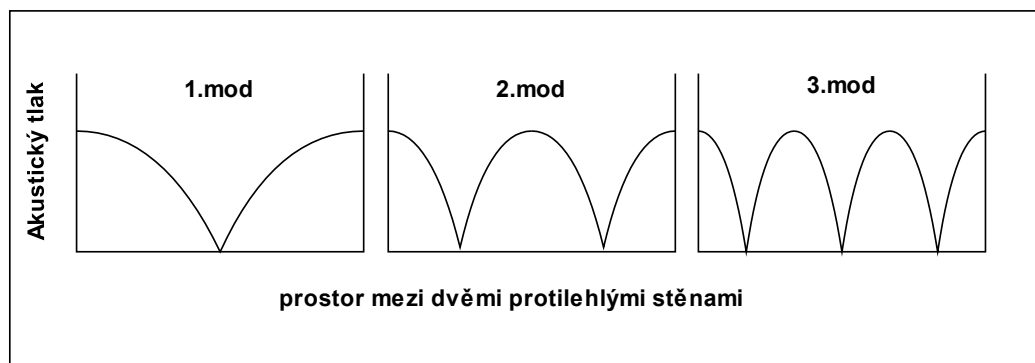
$$f = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}, \quad (1.2)$$

kde hodnoty p, q, r představují celá čísla (pokud bude pouze jedno nenulové číslo, zjistíme axiální módy, dvě pak tangenciální a tři nám dají šikmé) a L, W, H představují rozměry místnosti v metrech.



Obr. 1.2: Ukázky šíření zvuku u jednotlivých typů módů, 1-axiální, 2-tangenciální, 3-šikmé [1]

To způsobí, že mezi dvěma rovnoběžnými stěnami se zvuková vlna začne odrážet tam a zpět. Protože odražená vlna je vždy v opačné fázi s vlnou příchozí, způsobí nám tento fakt v místnosti stojaté vlnění.



Obr. 1.3: Ilustrace hladiny akustického tlaku při stojatém vlnění mezi dvěma rovnoběžnými stěnami [1]

V jeho případě se pak v místě kmiten vlny sčítají a v bodech uzlů naopak odečtou, takže při pohybu v místnosti s tímto problémem můžeme střídavě slyšet nabývání a ubývání hlasitosti těchto frekvencí (viz. obr. 1.3). Tento problém se dá částečně vyřešit konstrukcí speciálně navržených pro absorpci problémových frekvencí, v praxi je takovýmto prvkem Helmholtzův rezonátor. [1]

1.3 Výpočet doby dozvuku

1.3.1 Koeficient pohltivosti

K velké části výpočtů a později i simulací se používá vlastnost materiálů zvaná *koeficient pohltivosti* [1]. Jeho hodnoty reálně nabývají hodnot od 0, která znamená, že daný materiál odrazí 100 % přicházejícího zvuku, do 1, což znamená naprosté pohlcení zvukových vln a nulový odraz. Tato hodnota závisí na materiálu, z jakého je daná plocha vyrobena. Běžně platí fakt, že porézní materiály (např. Minerální vlna, molitan) mají vysoké koeficienty pohltivosti a naopak ty tvrdé (např. kámen, beton) mají velmi nízké. [2] Koeficient pohltivosti navíc není pro daný materiál stejný v celé šířce akustického spektra a této problematice se tato práce více věnuje v pozdější kapitole.

1.3.2 Výpočet doby dozvuku podle Sabina

Doba dozvuku je dle Sabina definována takto (1.3)[1]:

$$T_{60} = \frac{55,3V}{c \sum_{i=1}^N (S_i \alpha_i)}, \quad (1.3)$$

kde T_{60} je doba dozvuku [s], V je objem místnosti [m^3], c je rychlost zvuku [ms^{-1}], S_i je plocha i -tého povrchu [m^2], α_i je koeficient pohltivosti i -tého povrchu, N je celé kladné číslo, které indikuje počet různých ploch, které místnost obsahuje.

Tato rovnice bohužel funguje pouze pro jednoduché místnosti s malými absorpčními koeficienty a pro komplexnější prostory nám nedá správné výsledky. Jako následek tedy vzniklo několik dalších rovnic, z nichž nejběžnější je ta podle Eyringa.

1.3.3 Výpočet podle Eyringa

Doba dozvuku dle Eyringa definována takto (1.4) [1]:

$$T_{60} = \frac{55,3V}{-cS \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (1.4)$$

Zde \ln vyjadřuje přirozený logaritmus a $\bar{\alpha}$ je průměrný koeficient pohltivosti celé místnosti.

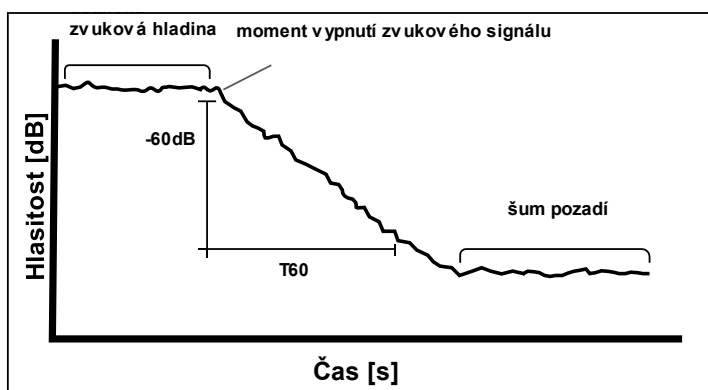
1.3.4 Výpočet podle Millingtona

Ačkoliv je tento vzorec nejpřesnější, není příliš využíván. Důvod je ten, že reálné místnosti obsahují mnoho různých povrchů s různými povrchy pohltivosti, a tak je tato rovnice velmi složitá na výpočet (1.5) [1].

$$T_{60} = \frac{55,3V}{-c \sum S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (1.5)$$

2. MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU

Většinu informací pro tuto kapitolu jsem čerpal z norem ISO 3382-1,2 [3] [4] a ČSN 73 0525, 73 0527 [5] [6], důvod je ten, že věc jako je měření má přesně daný postup a metody. Měření se provádí způsobem, že se měří časový úsek, za který hladina akustické intenzity poklesne 60 dB od vypnutí originálního zdroje zvuku (viz grafické znázornění na obr. 2.1) Přičemž v případě přerušovaného šumu by zdroj měl zůstat zapnutý po dostatečně dlouhou dobu, aby došlo k plnému vybuzení místnosti. Pokud nelze změřit pokles o 60 dB, což se může stát velice snadno, například kvůli vysokému ruchu pozadí, měří se pokles o 30 dB, případně o 20 dB, který se následně vynásobí dvěma, případně třemi [4]. Není přesně dána jeho ideální doba, protože ta se mění v závislosti na prostoru, ve kterém se nacházíme. Pro představu, nahrávací studio potřebuje diametrálně jinou dobu dozvuku než kostel s varhany, které by bez mnohasekundového doznívání ztratily svou veškerou imponantnost. Jeho doporučené délky trvání a předepsané hodnoty lze také v těchto normách nalézt.



Obr. 2.1: Diagram poklesu hlasitosti dozvuku o 60 dB

2.1 Vybavení

Vybavení, které bude použito k měření, by mělo splňovat určité požadavky. Reprodukter by měl být všesměrový, k tomuto často slouží speciální dvanácti-stěn, osazený dvanácti reproduktory. Tato varianta je v současnosti asi nejbližší kulovému zdroji zvuku, který je v reálných podmínkách nesestrojitelný. Zároveň by měl být schopný vybudit zvuk o dostatečně vysoké hlasitosti, aby bylo možné změřit onen pokles o 60 nebo 30 dB. Mikrofon by měl být taktéž všesměrový, s membránou o průměru maximálně 13 mm. V žádném moment v průběhu měření samozřejmě nesmí dojít k přebuzení. [3]

2.2 Umístění

Pro zdroj zvuku, který budeme používat při měření, by se měla zvolit alespoň dvě místa v oblasti námi měřeného prostoru, ideálně v místech, kde se budou přirozeně vyskytovat zdroje zvuku. Akustický střed by se měl nalézat 1,5 m nad podlahou.

Pro mikrofon by se umístění mělo volit, podobně jako u reproduktoru, v oblasti kde se budou vyskytovat posluchači. Od zdroje by měl být umístěn dostatečně daleko, aby se zabránilo příliš vysokému vlivu přímého zvuku. Podle [3] se minimální vzdálenost mikrofonu od zdroje vypočítá vzorcem (2.1):

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (2.1)$$

kde V je objem místnosti (m^3), c je rychlost zvuku (ms^{-1}), T předpokládaná doba dozvuku (s).

Vzdálenost od nejbližšího odrazujícího povrchu (stěny, strop, podlaha atd.) by měla být alespoň 1 m, přičemž doporučený rozestup mezi jednotlivými pozicemi mikrofону je alespoň 2 m. Nad zemí by se měl nalézat přibližně ve výšce hlav posluchačů. Počet umístění se poté liší podle toho, zda jde o metodu orientační, inženýrskou nebo přesnou. Rozdíly mezi nimi jsou vypsány v následující tab. 2.1 převzaté z [3].

Tab. 2.1: Minimální počty míst a měření v závislosti na metodě [3]

	Orientační	inženýrské	Přesné
Kombinace zdroj – mikrofon	2	6	12
Místa zdroje	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Místa mikrofónu	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Počet poklesů v každém místě	1	2	3

2.3 Metoda přerušovaného šumu

Při této metodě se musí použít reproduktor a do něho musí být přiváděn signál, který je odvozený z širokopásmového náhodného nebo pseudonáhodného šumu. V případě pseudonáhodného šumu, musí být zdroj vypínán zcela náhodně a nesmí se opakovat stejný úsek. Reproduktor musí být dostatečně hlasitý, aby křivka poklesu začínala nejméně 35 dB nad hlukem pozadí. Pokud se měří T_{30} tak je třeba překonat hranici 45 dB nad hladinou pozadí.

Pokud se měří v oktákových pásmech, musí být šířka pásma signálu alespoň stejně široká jako právě jedna oktáva, při měření v třetinooktákových pásmech jako alespoň třetina oktávy [3]. V pásmu, ve kterém se bude vykonávat měření, je potřeba aby byl šum dostatečně plochý. Také lze použít variantu takovou, že spektrum bude tvarováno tak, že poskytne růžové spektrum ustáleného odraženého zvuku v uzavřeném prostoru od 88 Hz do 5657 Hz s tím, že kmitočtový rozsah třetinooktákových pásem bude se středními kmitočty od 100 Hz do 5 kHz. V případě oktákových pásem jsou pak střední kmitočty 125 Hz až 4 kHz [3].

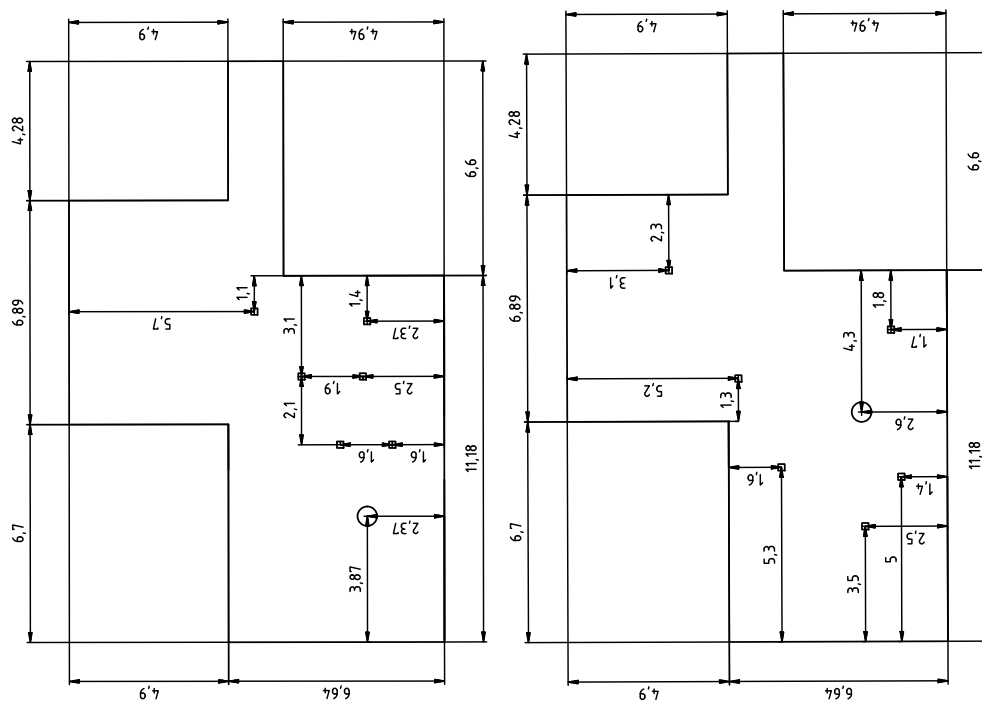
Při měření podle inženýrské nebo přesné metody je nutné, aby doba buzení prostoru byla dostatečně dlouhá, aby se zvukové pole dostalo do ustáleného stavu, což bývá běžně minimálně polovina očekávané doby dozvuku.

2.4 Metoda integrované impulzové odezvy

U této metody se jako zdroj signálu používá impulz, který je dostatečně krátký, avšak dostatečně hlasitý, aby se dostal nad požadovanou hranici 35 dB (nebo 45 dB v případě měření T_{30}), který sám nijak nedoznívá jako je například výstřel z pistole. Pro velké prostory se dokonce občas používají malá děla [1], což má navíc svou výhodu ve větším rozsahu co se týče spodních frekvencí. Základní nedostatek této metody je, že k dostatečně hlasitému impulzu, který by v dostatečné míře obsahoval frekvence pod 250 Hz, by skutečně byla potřeba téměř až nevhodná technika. Lze také použít jiné zdroje zvuku např. šumové pulzy, spojitě přeladovaný tón nebo pseudonáhodné binární sekvence maximální délky (MLS).

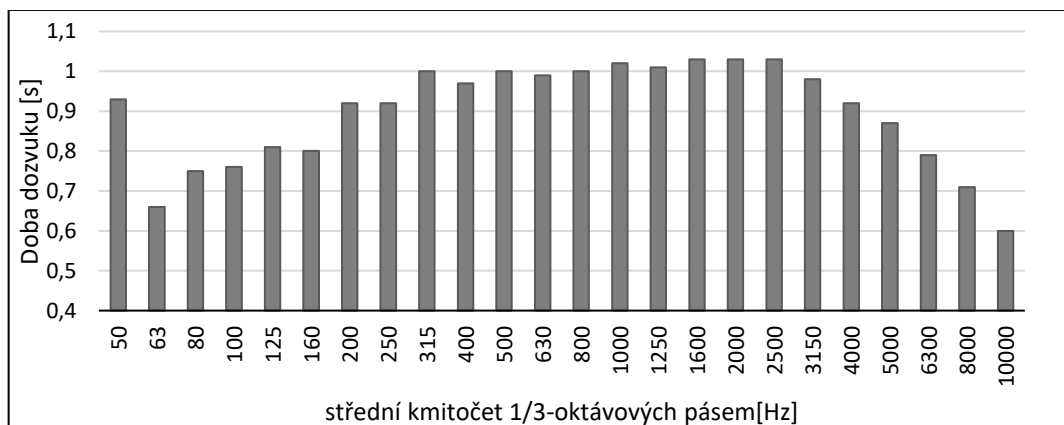
2.5 Výsledky měření poslechového prostoru studentského klubu Yacht

Pro měření jsem zvolil inženýrskou metodu, přesněji dvě různé polohy umístění reproduktoru, přičemž pro každou polohu jsem zvolil šest různých pozic mikrofonu. Přesnou mapu jednotlivých rozmístění lze vidět na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Mapa rozmístění mikrofonů pro obě polohy reproduktoru

Technika mi byla zapůjčena školou a jednalo se o všesměrový zdroj zvuku v kombinaci se subwooferem značky Event. Zesilovač byl vyroben firmou Bittner. Měření proběhlo měřicím přístrojem NTi Audio XL2, ke kterému byl připojen měřicí mikrofon na stativu ve výšce 160 cm.

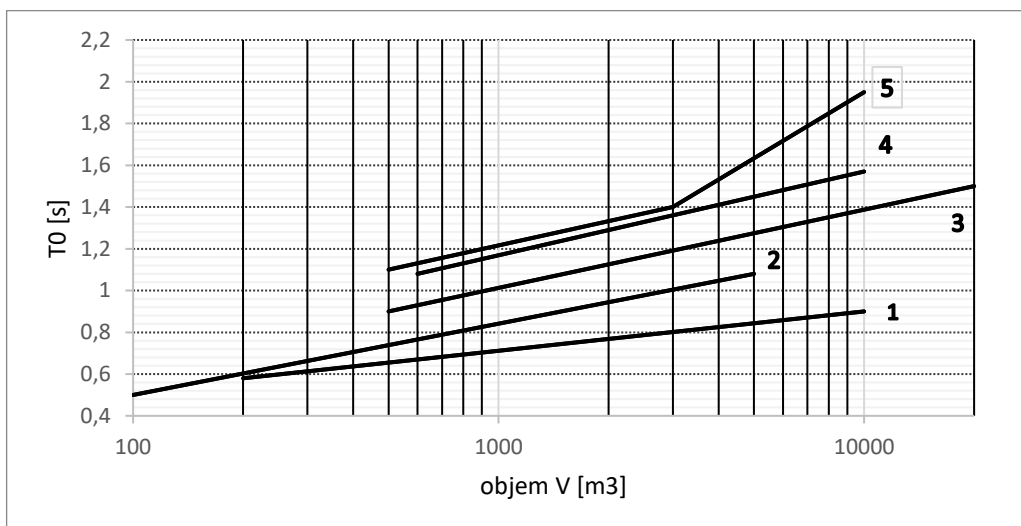


Obr. 2.3: Výsledky měření doby dozvuku - průměrné hodnoty

Když se podíváme na graf na obr. 2.3, tak lze celkem jasně vidět, že doba dozvuku je v celém frekvenčním spektru vyrovnaná a bylo by ideální, kdyby se následujícími kroky podařilo snížit délku doby dozvuku pro střední kmitočty. V oblasti nízkých kmitočtů jsou výsledky celkem zavádějící, protože pro tak velké vlnové délky se již uplatňují již zmíněné módy. Navíc se v průběhu jednotlivých měření v docela velké míře lišily naměřené hodnoty. To může mít na svědomí silnice, která vede kolem objektu – není nepředstavitelné, že by v momentu měření projížděl kolem automobil nebo autobus, ale stejně tak může jít o důsledek módů, proto by bylo potřeba pro nízké frekvence provést ještě jedno přesnější měření.

2.6 Optimální doba dozvuku pro zvolený prostor

Stanovit optimální dobu dozvuku pro tento prostor je poměrně komplikované, neboť dostupné normy uvádějí ideální dobu do zvuku pouze pro prostory, které se nějakým způsobem podílejí na tvorbě zvukových nahrávek (nahrávací studia, mixážní haly atd.), prostorům určeným živé, povětšinou vážné hudbě (orchestr, opera, komorní hudba), nebo mluvenému slovu (různé typy divadel). V tomto prostoru ale nejčastěji dochází pouze k reprodukci hudby u diskžokejů, nebo k živým koncertům kapel rockového formátu. Navíc jeho celkový objem, který se pohybuje kolem 300 m^3 , je poměrně blízko minimálních rozměrů v těchto normách uvedených. Tyto doporučené hodnoty lze vidět na následujícím grafu na obr. 2.4 [5]:

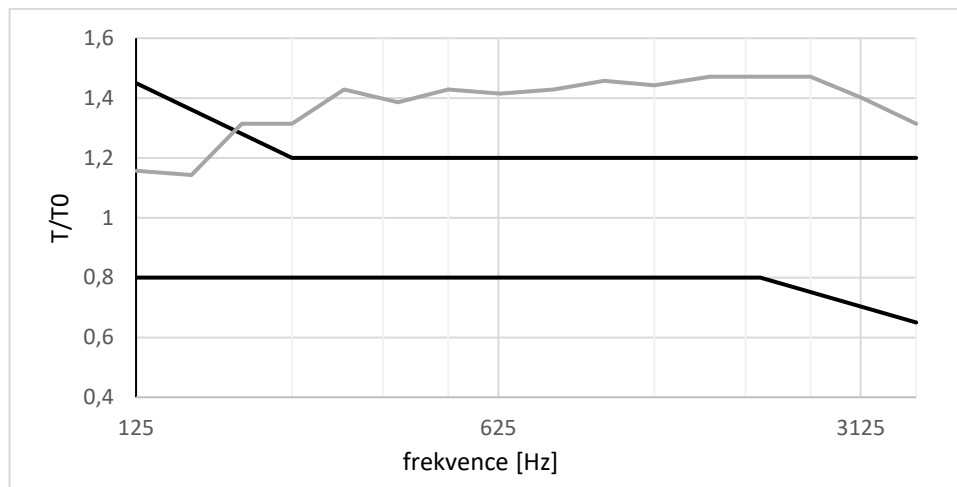


Obr. 2.4: Graf optimální doby dozvuku pro kmitočet 1000 Hz v závislosti na objemu

(1 - kino s jednonálovým zvukovým zařízením; 2 - činoherní divadlo, posluchárna; 3 - víceúčelový sál, zkušebna orchestru; 4 - opera, hudební divadlo; 5 - tělocvična) [5]

Pokud z tohoto grafu budeme vycházet, tak pro prostor našeho objemu by teoreticky mohly platit parametry pro kino nebo pro činoherní divadlo a tím pádem se můžeme pokusit dosáhnout délky doby dozvuku přibližně 0,6 – 0,7 sekund v obsazeném stavu. Pokud bude bráno v potaz to, že jak kino, tak divadlo je i v prázdném stavu vybaveno pravděpodobně polstrovanými sedačkami, které poměrně efektivně působí jako absorpčně-difusní prvky a hudební klub nikoliv, dala by se tato hodnota brát jako cílová. Bohužel přesné stanovení ideální doby dozvuku pro hudební kluby není v žádných normách stanoveno, takže takovýto odhad je vše, co je k dispozici.

Pokud tedy námi naměřené hodnoty vydělíme těmi, kterých chceme dosáhnout a dosadíme je do hranic, které jsou převzaty z [5], vznikne nám obr. 2.5:



Obr. 2.5: Naměřené délky doby dozvuku v poměru k ideálním délkám doby dozvuku v závislosti na frekvenci

Z tohoto grafu lze dobře vyčíst, že bude potřeba snížit dobu dozvuku prakticky na všech kmitočtech od 200 Hz do 4000 Hz. Schroederův, nebo také kritický kmitočet místnosti, se určí podle (2.2). Tato frekvence byla v tomto případě stanovena na 106,4 Hz. Výpočet této frekvence je důležitý, protože určuje, od jaké hranice je již zvukové pole difuzní, pod ní jsou ještě jednotlivé módy místnosti diskrétní, což způsobuje nerovnoměrnost rozložení akustického tlaku v daných pásmech [2].

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (2.2)$$

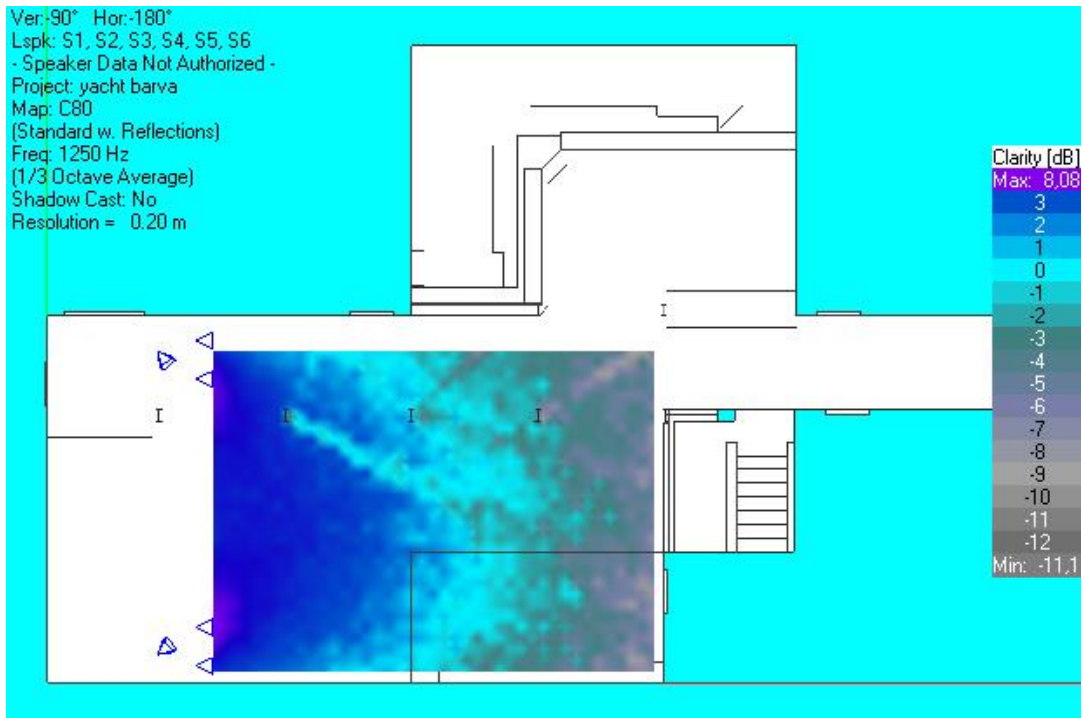
kde T_{60} značí průměrnou dobu dozvuku (s), V objem místnosti v (m^3).

Norma [6] se dále zmiňuje o kritériu tzv. míry jasnosti C80, která vyjadřuje, jak snadno lze rozlišit tóny a pasáže, které za sebou následují v rychlém sledu. V případě tohoto prostoru bude v pozdější části této práce nasimulována.

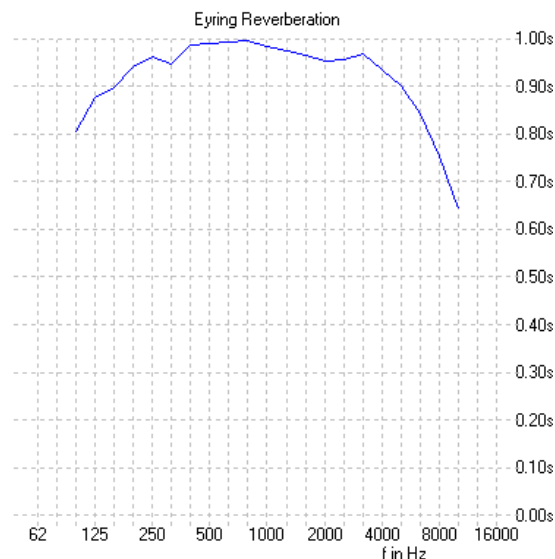
Následující simulace byly pořízeny podle postupu, který je popsán v příloze A. Jediný rozdíl je ten, že místo funkce “standart mapping” byla použita funkce “standart mapping with reflections”, která sice zabere výpočetně déle času, ale je prostorově mnohem přesnější, protože počítá s odraženými vlnami. V této kapitole budou vloženy pouze hlavní grafy délky doby dozvuku a prostorová zobrazení veličiny C80, která vyjadřuje rozlišitelnost jednotlivých tónů při jejich rychlém střídání. Celý komplet simulací je obsažen v příloze D.

2.7 Simulace akustických vlastností před úpravami prostoru

Nasimulované hodnoty C80 a doby dozvuku lze vidět na obr. 2.6 a 2.7. Z těchto obrázků lze vyčíst, že rozlišitelnost jednotlivých tónů C80 není příliš dobrá, především kvůli dlouhé délce doby dozvuku na středních kmitočtech (obr. 2.7). Zde ve většině poslechové plochy nabývá hodnoty kolem 0 dB, přičemž ideální hodnoty by se měly pohybovat kolem 3-5 dB. Také lze vidět efekt ocelových nosníků, které vytvářejí akustický stín (malé černé struktury na obr. 2.6).



Obr. 2.6: Prostorové zobrazení veličiny clarity C80 v prostoru pro 1250 Hz



Obr. 2.7: Nasimulovaná frekvenční charakteristika délky doby dozvuku klubu Yacht podle Eyringova vzorce

3. NÁVRH AKUSTICKÝCH PRVKŮ PRO ÚPRAVU PROSTORU KLUBU YACHT

3.1 Absorbéry

3.1.1 Porézní absorbéry

Asi nejčastějším prvkem, který se používá k úpravě doby dozvuku, jsou akustické porézní absorbéry. V podstatě fungují na principu toho, že zvuková vlna vstoupí do porézního materiálu, kde díky tření přichází o svou energii, která je přeměněna na energii tepelnou. Jsou často používány, protože poskytují na první pohled velice snadné a efektivní úpravy doby dozvuku a přesně to je také problém.

Mezní frekvence, od které jsou porézní absorbéry účinné, je přímo spojená s jejich tloušťkou. Poměrně obecné pravidlo tvrdí, že aby docházelo alespoň k nějaké absorpci, je třeba, aby byl materiál tlustý alespoň 1/10 vlnové délky a ideálně $\frac{1}{4}$, aby pohltil všechen dopadající zvuk [2]. Příčinou je to, že pohlcování zvuku probíhá nejefektivněji tam, kde mají pohybující se částice nejvyšší rychlost, která je tedy přímo u zdi nejnižší. Často se stává, že prostor je přetlumen na vysokých frekvencích, ale na nižších středech a basech je doba dozvuku prakticky nezměněná, protože třeba takový koberec, který má absorpční koeficient 0,6 pro frekvenci 4000 Hz, má pro frekvenci 125 Hz hodnotu pouhých 0,05 [1]. Z toho tedy vyplývá, že celkově pro nízká frekvence (dejme tomu pod 200 Hz) jsou porézní absorbéry neefektivní.

3.1.2 Rezonující absorbéry

Hlavními typy rezonujících absorbérů jsou takzvané Helmholtzovy (někdy také nazývány dutinové) rezonátory a membránové absorbéry. Na rozdíl od porézních absorbérů se dají navrhnout tak, že pohlcují i nízké frekvence, navíc jejich absorpční charakteristiky nemají tvar horní propusti (tak jako porézní absorbéry) ale vždy se pohybují kolem určitého rezonančního kmitočtu. Což může být v některých situacích žádoucí, aby nedošlo k přetlumení prostoru na vysokých kmitočtech.

Fungují v podstatě na principu přetváření zvukové energie na mechanickou rozkmitáním mechanických částí. Tyto kmity jsou následně tlumeny a opět dochází k přeměně na tepelnou energii.

Helmholtzovy rezonátory

U Helmholtzových rezonátorů je rozkmitáván vzduch ve štěrbinách. Asi nejběžnějšími rezonátory tohoto typu jsou skleněné lahve. Každý asi ví, že při fouknutí do prázdné lahve, vznikne tón o jasně dané frekvenci. Přesně to, co slyšíme, je rezonanční frekvence vybrané skleněné lahve.

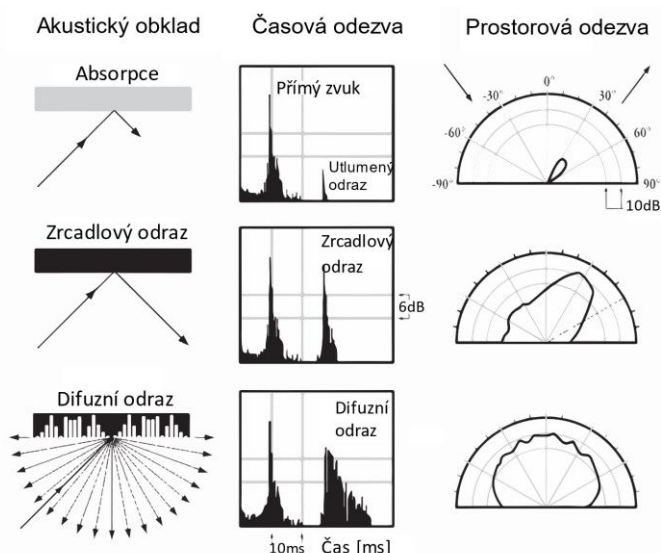
Princip je ten, že vzduch v dutině funguje jako pružina a vzduch ve štěrbině zase funguje jako píst. Příchozí zvuk rozkmitá vzduch ve štěrbině a vzduch z dutiny působí silou proti němu, čímž způsobuje onen útlum. Velikost tohoto útlumu je teoreticky 100 %, ale jeho křivka má příliš vysokou strmost, ta závisí na tření celého tohoto řetězce, kterou však můžeme ovlivnit tlumící výplní. [1]

Membránové absorbéry

U membránových absorbérů je kmitajícím prvkem membrána, která je vzdálena určitou vzdáleností od zadní stěny, což je většinou zed'. Prostor za membránou je uzavřen a rezonanční kmitočty je u tohoto typu prvků určen vzdáleností membrány od zadní stěny a plošnou hmotností dané membrány [1].

3.2 Difusory

Difusory na rozdíl od absorbérů zvukové vlny nepohlcují, ale pouze „rozbíjejí“. Jsou to tedy členité ale odrazivé úpravy plochy. Rozbití zvukové vlny často probíhá na dvou úrovních. První je fázové zkreslení, které je způsobeno různou hloubkou materiálu, takže dojde k vzájemnému fázovému posuvu jednotlivých odrazů a v druhé řadě rozbijí vlnu prostorově, což znamená že při dopadu na difusor se zvuková vlna odrazí do více směrů současně ale o to s menší intenzitou. [2] Perfektní ilustraci, kde je vidět rozdíl mezi absorbérem, hladkým povrchem a difusorem lze vidět na obr.3.1 který je převzat z [2].



Obr. 3.1: Porovnání odrazů od absorbéru, hladkého povrchu a difusoru [2]

Důvodem aplikace těchto prvků je, že neodstraňují energii z prostoru, tak jako absorbéry, ale pouze ji rovnoměrně rozkládají a snaží se tak celkový dozvuk v místnosti přiblížit ideálnímu difuznímu poli. Difusory jsou proto vhodné k potlačení tzv. třepotavých ozvěn a k celkovému odstranění příliš výrazných prvotních odrazů [2].

3.2.1 Schroederovy difusory

Jsou to jedny z nejčastěji se vyskytujících. Fungují na principu obkladu z odrazivého materiálu (nejčastěji ze dřeva), který obsahuje šachty o s tejně šířce, ale jejich hloubky jsou rozdílné, avšak předem vypočítané. K výpočtům se používají matematické řady, přičemž podle použité řady se tento typ difusorů pojmenovává. Nejčastější jsou tyto 3 typy:

MLS – z anglického „Maximum Length Sequence“,

QRD – z anglického „Quadratic Residue Diffuser“

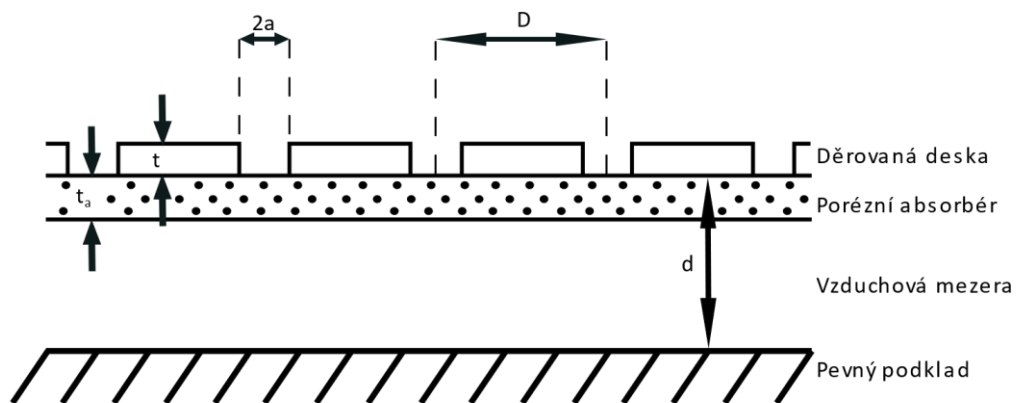
PRD – z anglického „Primitive Root Diffuser“

3.3 Návrh akustických prvků pro studentský klub Yacht

3.3.1 Návrh absorbéru č.1

Jak je vidět na výsledcích z měření z kapitoly 2, bude nutné navrhnout takové akustické prvky, které pohltí především střední frekvenční pásmo. Teoreticky by mělo být možné vyrobit takový absorbér, který bude zároveň fungovat jako Helmholtzův rezonátor. Jako absorpční materiál je zvolena minerální vata, neboť má vynikající výsledky v pohlcování akustické energie [1], [2].

Průřez takovýmto děrovaným absorbérem lze vidět na obr.3.2.



Obr. 3.2: Průřez děrovaným absorbérem [2]

kde t značí tloušťku děrované desky, t_a tloušťku porézního absorbéru, a je poloměr jednotlivých děr, D rozestup mezi děrami, d vzdálenost děrované desky od zadní stěny.

Za předpokladu, že deska je děrována rovnoměrně a že rozestup děr je velký v poměru k jejich průměru, vypočítá se rezonanční frekvence touto rovnicí (rov. 3.1) [2]

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{t'd}} \quad (3.1)$$

Zde ε vyjadřuje hustotu proděravění tedy podíl děrované plochy k celku, t' délku díry se započítanými koncovými korekcemi, V objem jedné buňky, který se dostane výpočtem $D \cdot D \cdot d$. t' je délka díry s přičteným korekčním činitelem, jenž je vypočítán (rov. 3.2) [2]

$$\delta = 0,8(1 - 1,4\sqrt{\varepsilon}) \quad (3.2)$$

Tedy t' se zjistí z výpočtu (rov 3.3) [1]:

$$t' = t_a + (\delta \cdot 2a) \quad (3.3)$$

Protože představa je taková, že čelní děrovaný panel bude poměrně tenký, pouze tak, aby odrazil vysoké frekvence a ty nižší skrze něj prošly. Proto při dosazování parametrů do rovnic bylo důležité vycházet ze dvou skutečností: Na zeď jde z důvodů prostoru umístit obklad maximálně o tloušťce 15 cm, čelní panel by měl být tlustý maximálně 3 mm, aby nebyl příliš odrazivý. V následující tabulce (tab. 3.1) je vypsáno několik různých teoretických Helmholtzových rezonátorů a jejich vypočítaných rezonančních frekvencí:

Tab. 3.1: Průřez děrovaným absorbérem [2]

ϵ	a (m)	$2a$ (m)	D (m)	t (m)	d (m)	δ	t' (m)	f_0
0,1257	0,0050	0,0100	0,0250	0,0100	0,1500	0,4030	0,0140	3231
0,0314	0,0040	0,0080	0,0400	0,0020	0,1500	0,6015	0,0068	1664
0,0559	0,0040	0,0080	0,0300	0,0300	0,1400	0,5353	0,0343	630
0,0113	0,0030	0,0060	0,0500	0,0030	0,1500	0,6809	0,0071	576
0,1963	0,0025	0,0050	0,0100	0,0063	0,0500	0,3037	0,0078	27179
0,0113	0,0030	0,0060	0,0500	0,0020	0,1500	0,6809	0,0061	671
0,0177	0,0030	0,0060	0,0400	0,0030	0,1500	0,6511	0,0066	965

Zvýrazněné jsou ty, které by mohly v reálném použití splňovat předem zadaná kritéria.

Při konstrukci bude vata zabalena do igelitové folie a následně do netkané textilie, to by mělo zajistit, že se nebudou uvolňovat do ovzduší pro člověka jinak škodlivá vlákna. Čelní děrovaná stěna bude vyhotovena z překližky. 3D model takového Helmholtzova rezonátoru – absorbéru je přiložen v příloze E

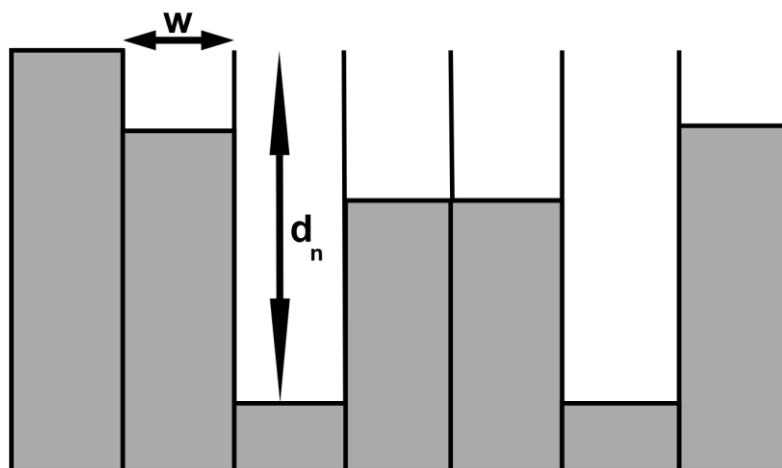
3.3.2 Návrh absorbéru č.2

Tento typ absorbéru postrádá hybridní vlastnosti absorbéru č.1, ale naopak vyniká vyšší výdrží proti nechtěnému poškození ze strany návštěvníků. Je zkonstruován podle typu absorpčních panelů od firmy Novatop, typ Marilyne. [7] Další výhodou je, že tyto absorbéry mají zveřejněné frekvenční závislosti absorpčního koeficientu a není potřeba je zjišťovat nebo odhadovat.

Tento typ je složen ze dvou vrstev. Blíže ke zdi je absorpční, která zajišťuje pohltivé vlastnosti. Ta je překryta druhou vrstvou složenou z tenkých latí s tenkými rozestupy, tím se docílí odrazivosti na vyšších kmitočtech, což je pro tento případ žádoucí. Celkově tato konstelace odpovídá 20% perforace. Náhled, včetně rozměrů je přiložen v příloze E.

3.3.3 Návrh difusoru

Pro tento prostor mi jak z estetického hlediska, tak z funkčního, přijde vhodné umístit nástěnný difusor na čelní stěnu taneční plochy. Pro tento účel jsem zvolil 1D QRD difusor, protože je poměrně funkční a zároveň je v lidských silách ho vyrobit. Zároveň se tento difusor bude periodicky opakovat „sám v sobě“ takže bude tvořit výrobek, který je na internetu dohledatelný pod názvem „diffractal“. Pokusy ukázaly, že toto opakování má pozitivní vliv na celkové difuzní vlastnosti.



Obr. 3.3: Průřez 1d QRD difusorem

Zde w značí šířku šachet a d_n hloubku nejhlubší šachty. Podle vzorce (3.4) [2] se vypočítá horní frekvence, pro kterou tento difusor bude fungovat. Není to tak, že by nad touto frekvencí difusor nefungoval, pouze jsou výpočty příliš složité, takže se těžko zjišťují přesné hodnoty [2].

$$w = \frac{\lambda_{max}}{2} \quad (3.4)$$

Zde λ_{max} vyjadřuje vlnovou délku horní hraniční frekvence. Nejnižší a také cílová frekvence, nebo spíše její vlnová délka, pro kterou bude difusor pracovat, se dá zjistit ze vzorce (3.5) [2]:

$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (3.5)$$

kde d_n značí hloubku n -té šachty; λ_0 je vlnová délka cílové frekvence; N je zvolené prvočíslo, ze kterého se vypočítává sekvenční číslo pro n -tou šachtu, přičemž se vypočítá podle vzorce (3.6) [2]:

$$s_n = n^2 \text{ modulo } N \quad (3.6)$$

Pro vybrané prvočíslo „7“ nám při dosazení do rovnice (5.6) vznikne řada $s_n = [0, 1, 4, 2, 2, 4, 1]$, toto číslo bylo zvoleno s tím ohledem, že nabízí největší rozsah s ohledem na potřebnou hloubku. Jako cílová frekvence byla zvolena hodnota 400 Hz a po dosazení do rovnic ((3.4) (3.5) (3.6) vyjdou parametry tohoto QRD takto: (tab. 3.2):

Tab. 3.2: Tabulka vypočítaných hloubek pro jednotlivé šachty

n	s_n	d_n (m)
0	0	0
1	1	0,061
2	4	0,243
3	2	0,122
4	2	0,122
5	4	0,243
6	1	0,061

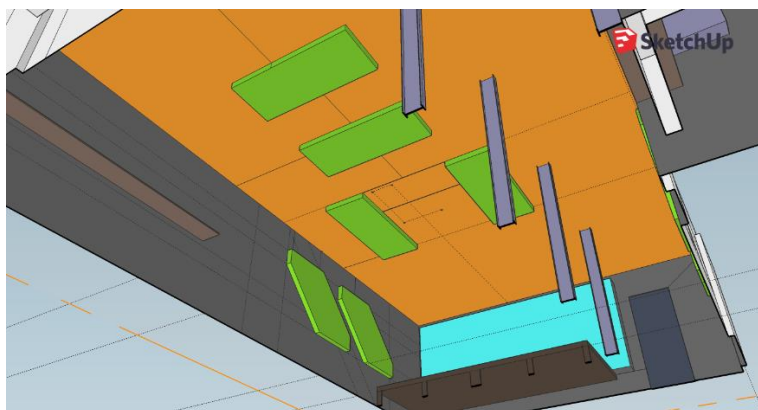
W je zvoleno 10 cm, takže horní hranice vychází na 1700 Hz., zároveň se celá tato kombinace bude 7x opakovat vedle sebe, s tím rozdílem, že jako celek vytvoří jeden difraktál, který tak bude mít šířku jedné šachty 70 cm a hloubku nejhlubší šachty 10 cm. Přičemž zároveň budou modulovány podle tzv. Barkerovy sekvence, což jsou konečné řady čísel sestávající pouze z hodnot „1“ a „-1“. Pro číslo „7“ Barkerova sekvence nabývá hodnot [1; 1; 1; -1; -1; 1; -1]. Tato řada znamená, že difusor bude proveden, tak jak nám vyšel ze vzorců (pro hodnoty „1“) a kdy bude inverzní (pro hodnoty „-1“). Inverzní znamená, že tam kde při výpočtech $s_n=0$, se dosadí $s_n=7$, „1“ se změní na „6“, „2“ na „4“ a tak dále. [2]

Poslední, ale již teoretická úprava by ještě mohla být, že by se do každé z menších šachet umístil další stupeň N5 QRD, takže by každá šachtička měla šířku 2 cm, ale pravděpodobně by to bylo až moc náročné na výrobu.

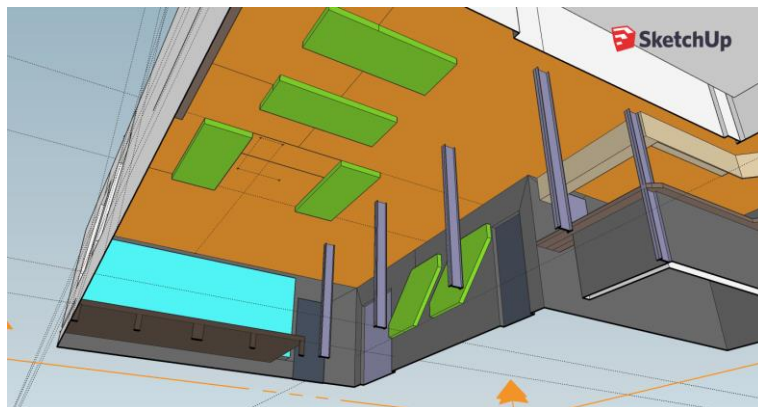
Náhled na 3D model tohoto difusoru i s jeho rozměry je vložen v příloze D.

3.4 Rozmístění akustických prvků

Reproduktory použité pro ozvučení klubu mají poměrně široký vyzařovací úhel a kvůli jejich umístění blízko stěn a stropu jde velká část vyzářené energie do těchto odrazivých ploch. Proto většina absorpčních prvků bude umístěna na tato místa, čímž se eliminují nejsilnější prvotní odrazy. Na přední stěnu je umístěn difusor, který nebude energii pohlcovat, pouze ji rovnoměrně rozptylovat, čímž se zabrání třepotavé ozvěně mezi přední a zadní stěnou. Toto rozmístění lze vidět na obr. 3.4 a obr. 3.5., kde jsou absorbéry vyznačené zeleně a difusor modře.



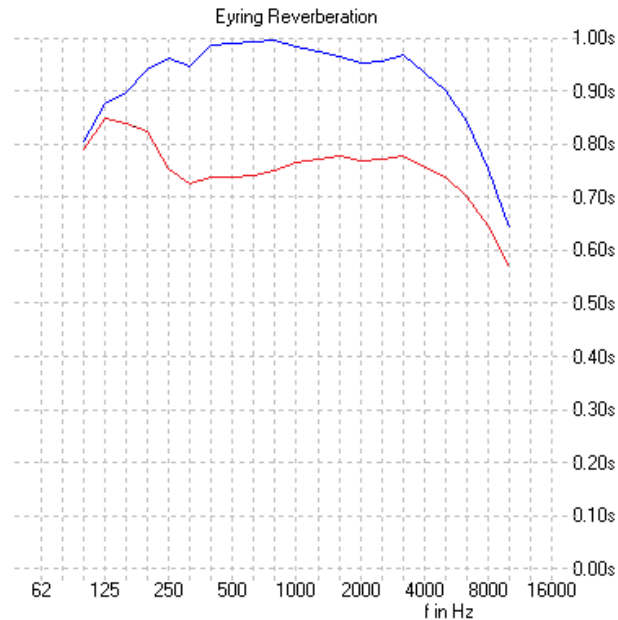
Obr. 3.4: Náhled na rozmístění akustických prvků č.1



Obr. 3.5: Náhled na rozmístění akustických obkladů č.2

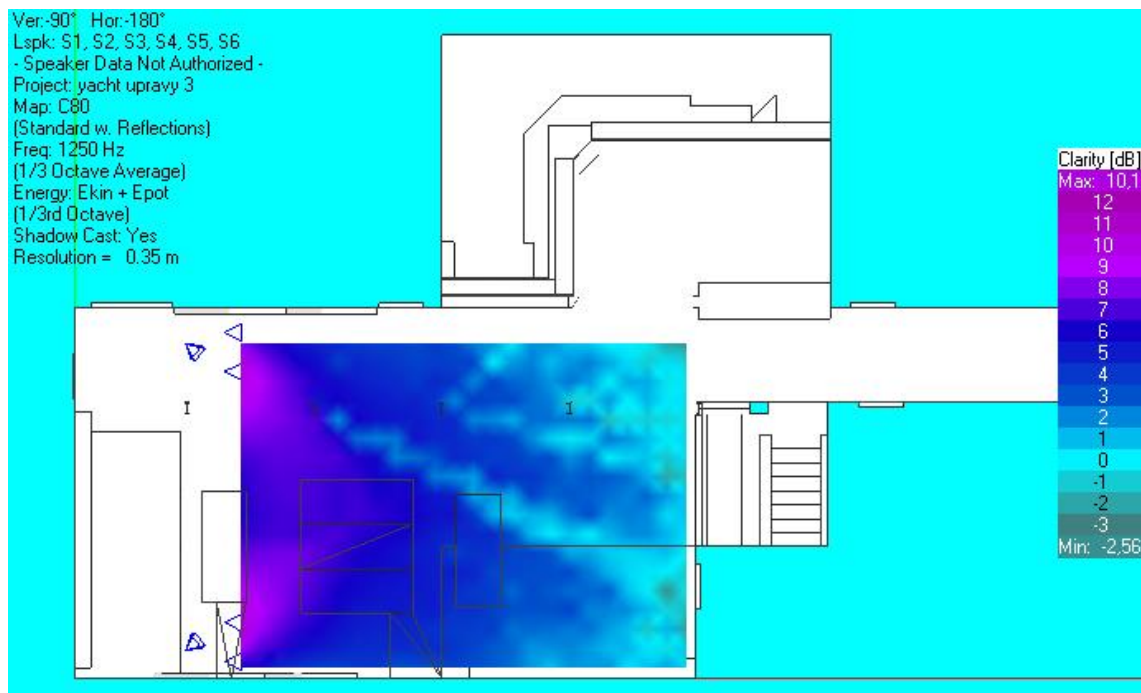
3.5 Simulace akustických vlastností po úpravách prostoru

Následné simulace byly provedeny na modelu, který byl doplněn o panely odpovídající akustickým vlastnostem a tvaru tak, aby co nejvíce odpovídaly realizaci prvků z kapitoly 4.3. Na následujícím obrázku (obr. 3.6) lze vidět, že došlo k poměrně efektivnímu snížení délky doby dozvuku v požadovaném pásmu, a to v průměru o 0,2 s.



Obr. 3.6: Porovnání simulace délky doby dozvuku před (modře) a po akustických úpravách (červeně)

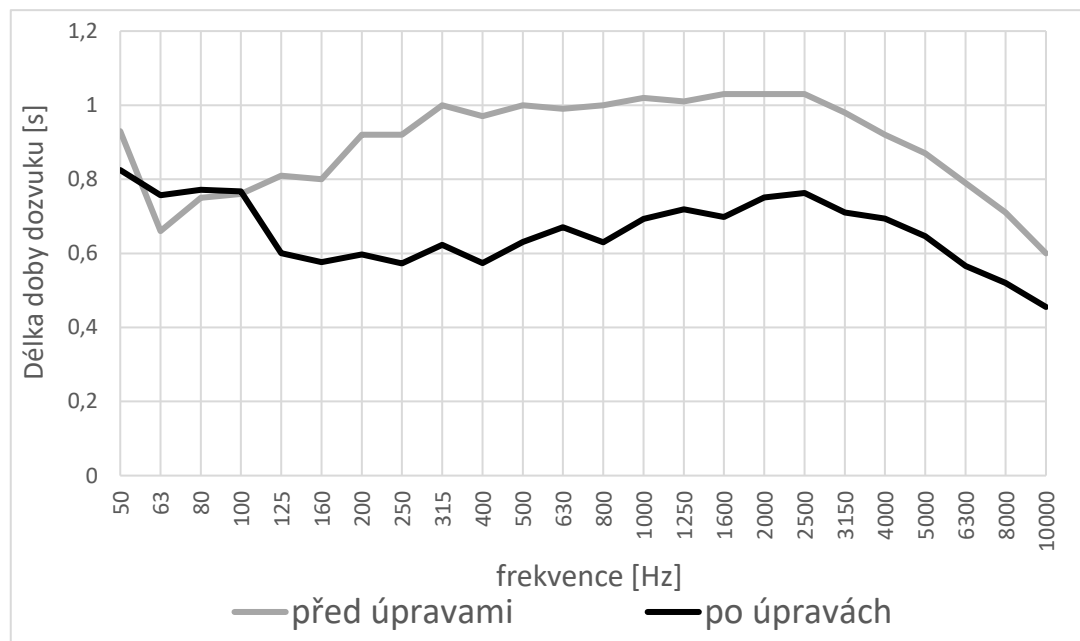
Na dalším obrázku (obr. 3.4) je vyobrazena simulace rozložení parametru C80 po úpravách. V porovnání s předchozí simulací (obr. 2.6) lze pozorovat významné zlepšení v celém poslechovém prostoru v průměru o 3 dB, čímž by se situace měla dostat do vhodné hladiny.



Obr. 3.7: Simulace prostorového rozložení hodnoty C80 po aplikaci akustických prvků

4. VÝSLEDKY MĚŘENÍ DÉLKY DOBY DOZVUKU PO APLIKACI AKUSTICKÝCH PRVKŮ

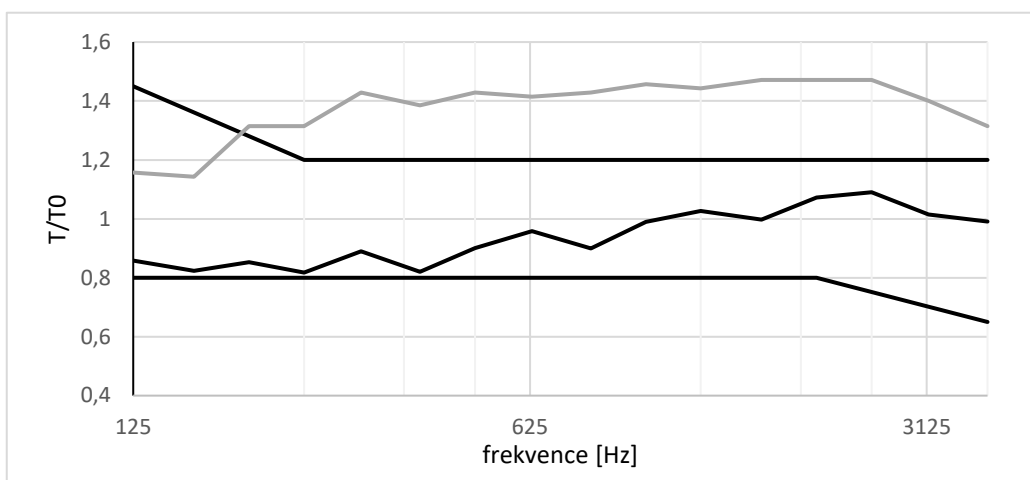
Po úspěšném vytvoření a následné instalaci akustických obkladů zmíněných v kapitole 4.3 proběhlo konečné měření délky doby dozvuku, které bylo provedeno stejným způsobem a stejnou technikou jako měření před úpravami (kapitola 2.5), jehož zprůměrované výsledky můžete vidět na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Porovnání frekvenční závislosti délky doby dozvuku před a po aplikaci akustických obkladů

Z těchto hodnot lze velice dobře vyčíst, že došlo k výraznému zlepšení v požadované oblasti od 200 Hz do 4000 Hz. Nejznamenitější je pokles v oblasti kolem 400 Hz, kde došlo ke snížení o 0,4 s, což je téměř polovina původní hodnoty.

Pokud tyto naměřené hodnoty dosadíme do stejných mezí, které byly zvoleny v kapitole 2.5, jde velice dobře vidět, že se podařilo snížit délku doby dozvuku do požadovaného rozhraní v celém frekvenčním pásmu. (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Porovnání T/T_0 před a po aplikaci úprav (šedě je znázorněna hodnota před, černě po aplikaci)

5. ZÁVĚR

Cílů této bakalářské práce bylo několik. Prvním bylo provést měření doby dozvuku studentského klubu Yacht. Toto měření bylo provedeno podle doporučení [3], [4], [5] a [6] a dopadla relativně podle očekávání, neboť se ukázalo, že doba dozvuku, konkrétně v pásmu od 400 Hz do 4 kHz, je v oblasti středních kmitočtů příliš vysoká. (viz obr. 2.3) Bohužel pro přesnější výsledky pro frekvence pod 125 Hz by bylo potřeba učinit ještě další přesnější měření, protože takto nízké frekvence jsou příliš ovlivňovány módy místnosti a jednotlivá měření obsahují příliš vysoké odchylky. Stanovit přesnou ideální dobu dozvuku, která by mohla být cílem úprav bylo obtížné, neboť pro klubové prostory se zmíněné normy nevztahují, proto byla odvozena hodnota 0,7 s, která byla vyčtena z hodnot pro prostory podobného objemu, ale i tak se jedná o pouhý odhad a až posouzení prostoru s úpravami ukáže, zda jsou vhodné a efektivní.

Tento prostor byl následně vymodelován za pomoci softwaru Google SketchUp tak, aby byl tento model kompatibilní se simulačním softwarem EASE. Zároveň s touto částí byl vytvořen návod, který na příkladu fiktivní místnosti naučí uživatele, jak krok po kroku takovýto model vytvořit a nasimulovat. Výslednou místnost lze vidět na obr. 3.10.

Oba modely byly následně podrobeny simulaci v softwaru EASE, který dodal grafické rozložení parametrů: jasnosti C80, ztráty srozumitelnosti souhlásek ALCons, přímé hladiny akustického tlaku L. Navíc vypočítal teoretickou dobu dozvuku, která se od reality liší v řádech setin sekundy. Největší rozdíl je na frekvenci 160 Hz, kde se hodnoty liší o 0,1 s. Byla provedena i simulace studentského klubu Yacht po aplikaci akustických prvků a ty ukázaly snížení délky doby dozvuku v požadovaném pásmu v průměru o 0,2 s.

V neposlední řadě proběhlo teoretické navržení akustických obkladů tak, aby došlo k pohlcení problémových frekvencí. Konkrétně návrh absorbéru, který by byl krytý tak, že zároveň bude fungovat jako Helmholtzův rezonátor, dále absorbér krytý odstupňovanými latěmi, aby se dosáhlo odrazivých vlastností na vyšších kmitočtech a QRD difusoru, který bude v sekvenci opakován tak, aby se maximalizoval jeho difrakční účinek. Po konzultaci s odborníkem byla vynechána konstrukce absorbéru č.1 z důvodu nejisté efektivity. Tyto prvky byly zkonstruovány a použity v klubu, jenž je předmětem této práce.

Konečné měření ukázalo, že navržené prvky fungují ještě lépe, než ukázaly počítačové simulace, neboť naměřené hodnoty jsou v celé oblasti nižší než v případě těchto simulací. V průměru se podařilo snížit délku doby dozvuku průměrně o 0,35 s a dostat se tak v celém frekvenčním pásmu do vymezených hranic stanovených na začátku této práce.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ VELIČIN A ZKRATEK:

a	poloměr jednotlivých děr (m)
ALCons	parametr ztráty srozumitelnosti souhlásek (%)
C	rychlost zvuku (ms^{-1})
C80	parametr míry jasnosti (dB)
d	vzdálenost děrované desky od zadní stěny (m)
d_{min}	minimální vzdálenost mikrofonu od zdroje zvuku (m)
d_n	hloubka nejhlubší šachty (m)
d_n	hloubka n-té šachty
D	rozestup mezi děrami (m)
F	frekvence (Hz)
L80	přímý akustický tlak (dB)
N	zvolené prvočíslo, ze kterého se vypočítává sekvence délek jednotlivých šachet
N	počet (bez rozměru)
s_n	sekvenční číslo pro n-tou šachtu
S	plocha (m^2)
S_i	plocha i-tého povrchu (m^2)
t	tloušťka děrované desky (m)
t'	efektivní tloušťka panelu se započítaným korekčním členem (m)
t_a	tloušťka porézního absorbéru (m)
T	předpokládaná doba dozvuku (s)
T	naměřená doba dozvuku [s]
T0	ideální doba dozvuku [s]
T_{60}	doba dozvuku (s)
V	objem (m^3)
v	rychlost zvuku (ms^{-1})
w	šířka šachty (m)
α_i	koeficient pohltivosti i-tého povrchu (bez rozměru)
$\bar{\alpha}$	průměrný koeficient pohltivosti (bez rozměru)
λ	vlnová délka (m)
λ_0	vlnová délka cílové frekvence
ε	hustota proděravění (%)
δ	korekční člen (bez rozměru)

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] EVEREST, F. Alton. *The master handbook of acoustics*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2001. ISBN 0-07-139974-7.
- [2] COX, Trevor J a Peter D'ANTONIO. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, c2009. ISBN 0-415-47174-5.
- [3] ČSN EN ISO 3382-1 (730534) A Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky. Část 1, Prostory pro přednes hudby a řeči
- [4] ČSN EN ISO 3382-2 (730534) A Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky. Část 2, Doba dozvuku v běžných prostorech
- [5] ČSN 73 0527 (730527) A Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely
- [6] ČSN 73 0525 (730525) A Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady
- [7] AGROP NOVA a.s. *Novatop acoustic - technická dokumentace, návod k montáži*. Ptenský Dvorek, 2015. Dostupné také z: <https://www.novatop-system.cz/ke-stazeni/soubory-ke-stazeni/>
- [8] How do I create a new EASE 4.x Project from a Sketchup model? - EASE – Enhanced Acoustic Simulator for Engineers. Software – EASE - Enhanced Acoustic Simulator for Engineers [online]. Copyright ©2005 [cit. 14.12.2018]. Dostupné z: <http://ease.afmg.eu/index.php/ea-faq-imex-en/items/how-do-i-create-a-new-ease-4x-project-from-a-sketchup-model.html>

SEZNAM PŘÍLOH

A Práce s modelačním a simulačním softwarem	33
B Náhledy studentského klubu yacht v obou použitých softwarech	45
C Materiály použité pro simulaci	47
D Výsledky simulací	49
E Návrhy akustických obkladů	55

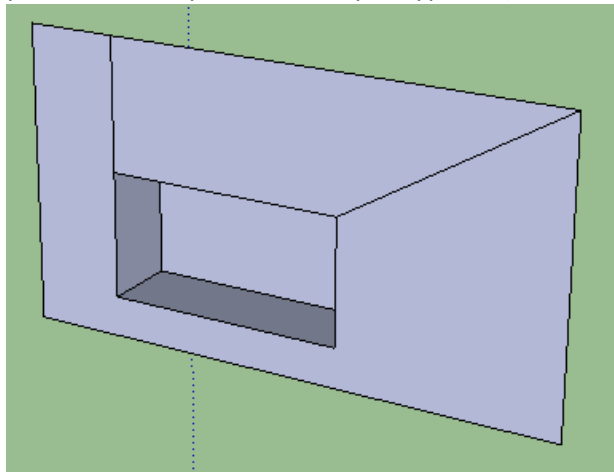
A PRÁCE S MODELOVACÍM A SIMULAČNÍM SOFTWAREM

A.1 Modelovací software Google SketchUp

A.1.1 Základní informace

Měření většinou není jediný způsob, kterým se zjišťují akustické parametry prostoru, velmi často se ještě k naměřeným hodnotám přidávají hodnoty, které jsou produktem různých simulací. Tato práce se bude zabírat simulačním programem EASE. Pro vypočítání těchto simulací je potřeba vytvořit počítačový 3D model zkoumaného prostoru. Software EASE vytvoření takového modelu umožňuje, ale je to pro běžného nezkušeného uživatele opravdu náročné. Naštěstí EASE umožňuje import souborů vytvořených mimo jiné i za pomoci softwaru Google SketchUp, jehož používání je mnohem příjemnější a intuitivnější. Tento model však musí splňovat určitá kritéria, kvůli tomu, jakým způsobem EASE vypočítává simulaci daného prostoru. Tato kritéria jsou:

- Všechny povrchy musí být orientovány svou vnější stranou směrem ven, tato strana má v původním nastavení světle šedou barvu. Vnitřní strany jsou zbarveny světle modře. [7]
- Pokud nějaká plocha obsahuje prohlubeň nebo výduť, je třeba, aby okraje tohoto útvaru byli spojeny čarou s nějakou hranou plochy. V opačném případě by software EASE objem výdutě nezakomponoval do svých výpočtů (viz. obr. A.1). [7]



Obr. A.1: Spojení výdutě s hranou

- Model musí obsahovat pouze ty plochy, které jsou uvnitř modelu, žádné nesmí být mimo. [7]
- Čáry nebo plochy se nesmí překrývat, ačkoliv to ve SketchUpu může působit jako jedna čára/plocha, EASE to vyhodnotí jako chybu, a proto je třeba si vždy dát pozor ať přes žádnou plochu nebo čáru NIKDY nevytváříme jinou.

Než jsou započaty práce na modelu, je doporučeno po každém významnějším kroku úprav v průběhu modelování zkusit importování do programu EASE a v něm následnou kontrolu, zda

model neobsahuje žádné chyby. Důvod je ten, že tyto chyby se udělají velmi snadno, a proto je vhodné je rovnou opravit, což je daleko lepší varianta, než je poté hledat v již hotovém modelu, což může být práce na několik hodin. EASE sice také umožňuje opravy a úpravy modelu, je to ale velmi uživatelsky nepřehledné a neintuitivní.

A.1.2 Přístup k softwaru Google SketchUp

V současnosti společnost Google umožňuje používání online softwarové verze, která pracuje přímo v prohlížeči. Tato verze je pro naše účely naprosto dostatečná. Jediná nevýhoda je, že každá verze tohoto softwaru používá trochu jiný formát (který má vždy koncovku .skp) přičemž EASE podporuje pouze verzi 8. Současná online verze nám poskytuje verzi 2018. Jedna možnost je vypracovat projekt rovnou ve SketchUpu 8, který také lze stáhnout online, nebo ho vytvořit ve verzi 2018 a ten následně konvertovat na verzi 8. Tento návod bude pracovat s verzí 8 ale použité metody a nástroje jsou prakticky stejné i pro online verzi 2018.¹

A.1.3 Základní operace

Po otevření samotné aplikace, se otevře stránka prázdného projektu. Pro jistotu je vhodné ze začátku vybrat „template-meters“, který vytvoří projekt, jehož výchozí měřítko je v metrických, a ne v imperiálních jednotkách. Nyní je založen nový projekt, kde je vytvořená postava vedle vyznačených os x, y, z. Tuto figuru je možné celou označit táhnutím myši a smazat, neboť nehraje v následujícím modelu žádnou roli, je zde vložena pouze pro představu o rozměrech.

Pohyb kamerou

Přiblížen/oddálení – rotování kolečkem myši

Rotace kolem bodu – při stisknutí kolečka myši a jejím následným táhnutím rotujeme kolem některého bodu modelu. Možný je pohyb jak do stran tak nahoru nebo dolů.

Posouvání bez rotace – stisknutí kolečka myši při stisknutí klávese shift umožňuje posouvání kamery, která zůstává namířená stejným směrem

¹ Verze 2018 je dostupná na webových stránkách www.sketchup.com

V případě verze 8, stačí do vyhledavače Google zadat „Google Sketchup 8“ a ten již sám vede na stránku, ze které lze stáhnout instalační soubor.

Modelovací nástroje

Na horní straně obrazovky je umístěn panel nástrojů, které lze používat pro práci s modelem, tento panel vypadá takto (obr. A.2):



Obr. A.2: Panel nástrojů

Z tohoto panelu bude využita pouze první polovina, jednotlivé názvy nástrojů jsou: **Select**, **line**, **rectangle**, **circle**, **arc**, **make component**, **eraser**, **tape measure**, **paint bucket**, **push pull**.

Zvýrazněné položky jsou nástroje, které budou průběžně použity.

Line – umožňuje vytvoření rovné čáry libovolným směrem o libovolné délce. **Select** – slouží jako běžná myš, používá se pouze k označování jednotlivých prvků, při stisknutí klávese shift je možné postupným klikáním označit více prvků současně

Rectangle – umožňuje vytvoření obdélníku v libovolné ze tří výchozích rovin, se stěnami vždy rovnoběžnými s osami

Eraser – slouží k vymazání prvků, dá se nahradit tím, že označené prvky jsou vymazány stiskem klávesy delete

Tape measure – nástroj, jehož pomocí si lze odměřit potřebné vzdálenosti a vyznačit si je v prostoru nehmotnými body, které nejsou součástí modelu.

Paint bucket – po kliknutí na tento nástroj se otevře okno, ve kterém lze vybrat barvu, kterou budou vybarvené vybrané plochy, nejpraktičtější je složka colors. Poté se používá tak, že se kliká na cílové plochy

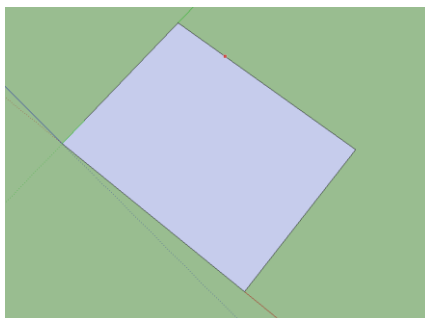
Move – v případě označených prvků je pohnuto pouze těmito prvky libovolným směrem. V případě, že není označen celý model tyto prvky i nadále zůstanou spojeny se zbytkem modelu, takže dochází k deformaci.

Push/pull – v případě označené plochy tento nástroj umožňuje vytáhnutí této plochy do trojrozměrného útvaru kolmo k dané ploše.

A.1.4 Vytvoření modelu

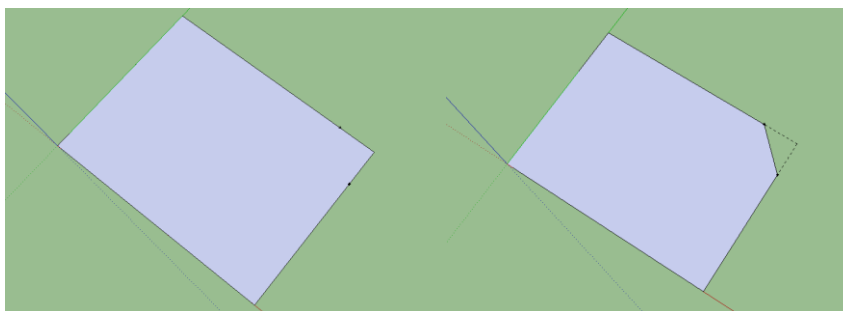
Je vhodné nedávat do názvu modelu ani do složky, ve které bude projekt uložen, žádné háčky nebo čárky, verze easu, která je současně k dispozici, s tím má problémy. Tento model poté bude nasimulován v EASE

Jako první krok bude vytvořen obdélník o rozměrech 6*4,5 m. Zvolením nástroje **rectangle** a kliknutím do počátku souřadnicové plochy bude vytvořen počáteční bod obdélníku a nyní stačí pouze na klávesnici začít psát rozměry (ty se sami automaticky píší do pole vpravo dole) které je třeba zapsat stylem „6;4,5“ Pokud je otevřena seance, která je v metrech, není potřeba připsávat jednotky. První číslo značí délku, další je oddělené středníkem, používá se desetinná čárka. Důležité je v moment psaní rozměrů nepohnout myší, což by mělo za následek jejich vynulování.



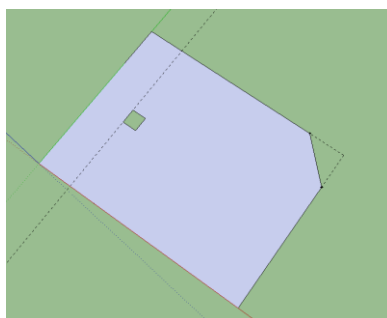
Obr. A.3: Obdélník

Pokud je vše správně, je vytvořen produkt jako na obr. A.3. Nyní je za pomoci nástroj **tape measure** od jednoho rohu odměřena vzdálenost 1 m na obě přilehlé strany (viz. obr. A.4). To vytvoří pomyslné body, které po zvolení nástroje **line**, lze propojit. Nyní je třeba následným zvolením nástroje **Eraser** vymazat „přebytečný“ roh, který vzniknul (viz. Obr. 3.4). Pozor, nestačí vymazat samotnou plochu, je třeba smazat i její hrany.



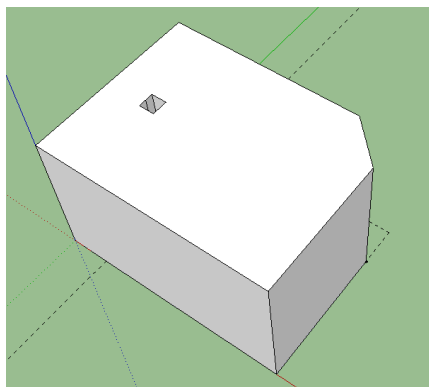
Obr. A.4: Vyznačené body a odstraněný roh

Poté je třeba stejným způsobem vytvořit otvor ve tvaru čtverce o rozměrech $0,4 \times 0,4$ m který je vzdálený 1 m od nezkrácené kratší stěny obdélníku, umístěný v pomyslném středu. V případě, že je zvolen správný postup, výsledek vypadá jako na obr. A.5.



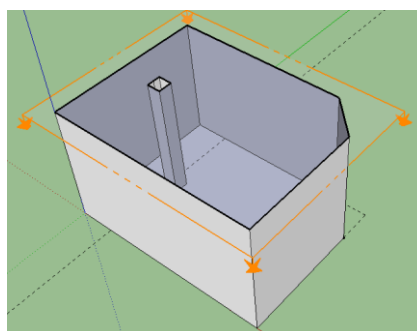
Obr. A.5: Vytvořený otvor

Nyní je za pomoci nástroje **push/pull** a kliknutím na vytvořenou plochu zahájeno její vytáhnutí do trojrozměrného útvaru. Tak jako při vytváření čtverce, stačí na klávesnici napsat „3,5“, což zaručí přesnou vzdálenost vytáhnutí 3,5 m. Po tomto kroku by vzniklý útvar měl vypadat tak jako na obr. A.6.



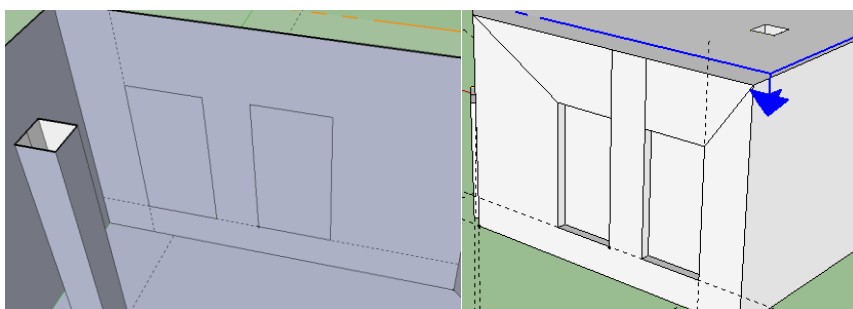
Obr. A.6: Trojrozměrný model

Tento model představuje jednoduchou místnost z venku. Otvor, který byl předtím vytvořen, uvnitř sám vytvaruje sloup. Pro následující práce, které budou vytvářeny zevnitř, je potřeba vytvořit řez, skrze který bude možné nahlédnout dovnitř. Ten se vytvoří tak, že na horním panelu je zvolena položka **tools** -> **section plane**. Tato rovina je umístěna kliknutím na některou z vytvořených stěn, například na strop (viz obr. A.7). V případě potřeby lze tímto řezem hýbat za pomoci nástroje **move**, případně na něj lze kliknout pravým tlačítkem a funkcí **reverse** obrátit směr skrze který je průhledný.



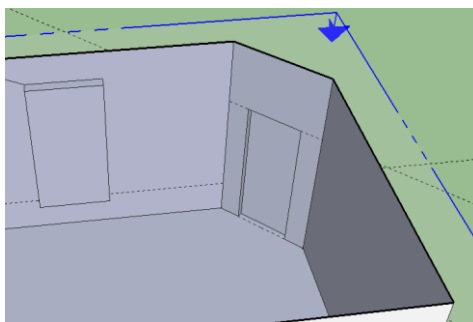
Obr. A.7: Řez modelem

Nyní budou vytvořeny na zkrácené delší stěně dva obdélníky vedle sebe s rozstupem 0,6 m o rozměrech 2 m na výšku a 1 m na šířku, 0,5 m od podlahy přičemž ten blíže ke stěně je od ní vzdálen 0,7 m. Tyto obdélníky poté budou nástrojem **push/pull** vytáhnuty 0,15 m směrem dovnitř. Ty budou představovat pomyslné absorbéry. Důležité je nezapomenout spojit hrany těchto útvarů s nějakou hranou místnosti. (obr. A.8)



Obr. A.8: Vytvoření absorbérů a jejich následné vytážení

Jako předposlední krok budou vytvořeny v místě odstraněného rohu pomyslné dveře. Ty budou mít výšku 1,98 m, šířku 0,8 a budou o 0,08 m „vytlačené“ ven z místnosti (viz obr. A.9), ty spojené být nemusí, protože na hraně už začínají.

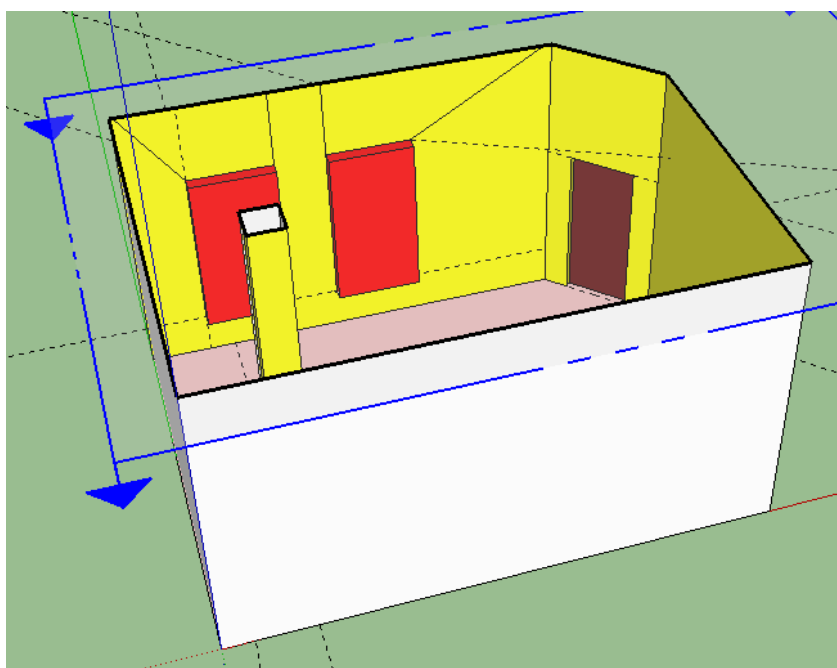


Obr. A.9: Vytvořené dveře

Pokud je vše správně vytvořeno, tak nyní je dobré zkontrolovat, zda jsou všechny plochy správnou stranou dovnitř a že model neobsahuje žádné stěny, které by nepatřily do vnitřního prostoru modelu. Pokud ne, jsou vybarveny jednotlivé plochy za pomoci nástroje **paint bucket**. Barvy nemusí odpovídat, je ale důležité, aby byly snadno rozeznatelné. Plochy by měly být barevně rozděleny takto:

- Barva1 – podlaha
- Barva2 – stěny, strop a sloup
- Barva3 – absorbéry
- Barva4 – dveře

Nyní je vhodné vše uložit, přičemž by model měl vypadat takto (viz. obr. A.10). Pokud je vše uděláno správně, měla by hladce proběhnout jeho importace do program EASE



Obr. A.10: Připravený model fiktivní místnosti

A.2 Návod na simulaci v softwaru EASE

A.1.2 Import modelu

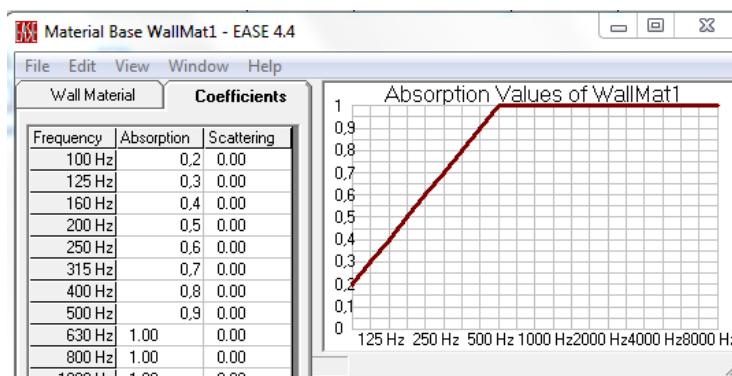
Nyní je spuštěn EASE4.4, a zde je v nabízeném menu vybrána položka **Start Working** -> **Create project** -> **create empty project**. V nabízeném okně je vhodné vyplnit nějaký název a kliknout na **Create**. Nyní bude importován model. To se provede tak, že na horním panelu je vybrána položka **File** -> **Import/Export**. Otevře se okno s názvem EASIMEX ve kterém je zvolena položka **Tools** -> **Import DXF / SKP**. Na otázku "Waste Data of..." je třeba odkliknout "yes". Nyní je třeba najít a načíst vytvořený model. Vyskočená okna stačí odkliknout tlačítka "ok" a "save", přičemž na dotaz "Reopen Import/export Window" dáme "no".

A.2.3 Kontrola modelu

Nyní je třeba ještě model zkontrolovat, zda je pro EASE pochopitelný. To se provede tak, že na horním panelu je vybrána položka **Edit** -> **Check Data**. To otevře nové okno, ve kterém lze vidět vytvořený model v podobě pouhých bodů. Pokud je vše provedeno správně, nemělo by při otvírání tohoto okna vyskočit žádné upozornění. Nyní stačí na horním panelu kliknout na položku **Tools** -> **Check Holes**, přičemž po kliknutí na toto tlačítko by v ideálním případě měla vyskočit zpráva: "Well done!". V opačném případě vyskočí okno, ve kterém jsou vyznačeny chybné body, které EASE „nechápe“ a vyznačí vadné body barevně. V takovém případě je mnohem snadnější opravit model ve Sketchupu než v EASE. Pro jistou kontrolu je doporučeno vybrat v horním panelu položku **Edit** -> **Room data** a zkontrolovat, zdali objem místnosti není záporný nebo nulový. Na konec je vhodné dát **Edit** -> **Check Data**, **Edit** -> **Save data**.

A.2.4 Vytvoření vlastního materiálu

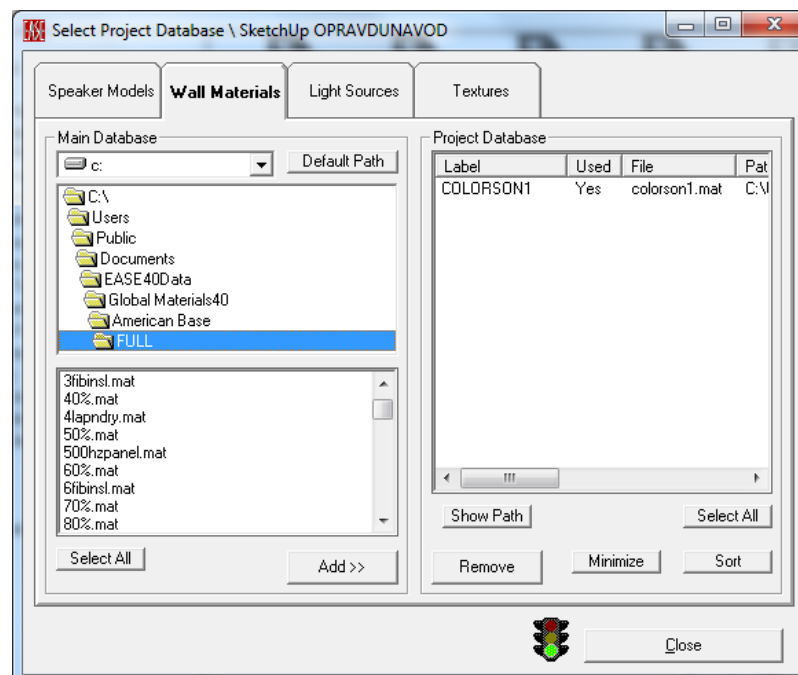
Ease má vlastní bohatou knihovnu různých materiálů, ale občas bude potřeba si vytvořit vlastní. V menu nalevo je vybrána položka **Main Database** a v ní **Add material**. Vyskočí nové okno, ve kterém lze vytvořit nový materiál, který pak bude přiřazen fiktivním absorberům. Opět je doporučeno vymyslet nějaký název a překliknoutna záložku **Coefficients**. Zde je vše nastaveno nativně na hodnotu „1“ Tyto hodnoty lze přepsat. Pro účely tohoto modelu je třeba nechat hodnoty od 630 Hz výš nastavené na „1“ a od 500 Hz níže s každým políčkem ubrat „0,1“ (viz. Obr. A.11). Poté lze kliknutím na položku **File** -> **Save as** materiál uložit někam, kde je snadno dohledatelný.



Obr.A.11: Nastavení absorpčních koeficientů

A.2.5 Přiřazení materiálu k jednotlivým plochám

EASE má funkci, která dokáže stejným barvám automaticky přiřadit stejné materiály, proto je důležité vybarvování při modelaci. Aby bylo možné materiály přiřadit, nejprve je třeba je „vložit“ do projektu a až pak je přiřadit k plochám. V menu na levé straně je vybrána položka **Project database** a následně je z nabídky vybráno **Select Wall Materials**. Otevře se nové okno a v něm průzkumník souborů s nativním začátkem ve složce „Global materials40“, což je EASE knihovna materiálů. Ve složce **American base** -> **Full** (viz. obr. A.12) jsou vybrány materiály s názvy „carptcom“ pro podlahu, „ccllybrick“ pro zdi a strop, „doorhollw“ pro dveře. Tlačítkem „add“ je přidáme do databáze projektu. Po nich je třeba najít složku, kde je uložen vytvořený materiál pro absorbér, který je následně také přidán. Na konci by mělo být v databázi celkem 5 různých materiálů, včetně toho, který EASE přiřadil automaticky při importu. Okno je následně zavřeno tlačítkem „close“.



Obr. A.12: Přiřazování materiálů

Nyní je v menu po levé straně vybrána položka **Edit Tables** (nadsložka: **Room Edit**) a v ní **Edit Faces**. Otevře se okno, kde je seznam jednotlivých ploch, vždy s barevným vzorkem. Na horním panelu je doporučeno vybrat položku **Tools** -> **Color and materiál coupled**. To zajistí, že bude stačit k libovolné ploše přiřadit materiál a všem ostatním plochám stejné barvy se automaticky přiřadí také. To se provede tak, že po kliknutí na název materiálu se v nově otevřeném okně vybere ze seznamu materiálů ten, který je třeba přiřadit. (obr. A.13.)

#	G	Item	Image	Vis	Img	Face Material	Color	2-Fold	Rear Material	Rear Clr.
1		F1	-	Yes	Yes	CARPT COMM	13421823	No		14079702
2		F2	-	Yes	Yes	CARPT COMM	13421823	No		14079702
3		F3	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
4		F4	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
5		F5	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
6		F6	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
7		F7	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
8		F8	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
9		F9	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
10		F10	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
11		F11	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
12		F12	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
13		F13	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
14		F14	-	Yes	Yes	CCLY BRICK	65535	No		14079702
15		F15	-	Yes	Yes	navod absorber	255	No		14079702
16		F16	-	Yes	Yes	navod absorber	255	No		14079702
17		F17	-	Yes	Yes	navod absorber	255	No		14079702
18		F18	-	Yes	Yes	navod absorber	255	No		14079702
19		F19	-	Yes	Yes	navod absorber	255	No		14079702

Obr.A.13: Tabulka materiálů

Pokud je vše přiřazeno, je třeba aplikovat proces “**check data**”, do kterého se dá urychleně dostat stiskem klávesy F5.

A.2.6 Poslechová plocha

Další věc, kterou je třeba vložit před začátkem simulací, je poslechová plocha. Ta je přidána tak, že se v okně **check data** (F5) vybere na horním panelu položka **insert -> Audience area**. Ta se zadává umístěním 4 bodů do prostoru, proto je vhodné ještě na horním panelu vybrat **view -> plan view z**, který přemístí pohled do ptačí perspektivy. 4 kliknutí umístí 4 body, které se po posledním kliknutí automaticky spojí. Poté se automaticky otevře okno s vlastnostmi plochy. Zde lze vidět body pojmenované Pt1 – Pt4 a jejich souřadnice. Je potřeba změnit jejich souřadnice „z“, aby poslechová plocha neležela na zemi. Proto je ideální všechny jejich souřadnice „z“ přepsat na „1.25“ (pozor EASE používá desetinnou tečku ne čárku), což poslechovou plochu umístí do výšky 125 cm. Okno se zavře klepnutím na tlačítko „ok“. Takto vytvořená poslechová plocha je v náhledu vyznačena zeleně. Stiskem klávesy F6 uložíme data. Souřadnice všech bodů lze vidět v tab. A.1.

Tab. A.1: Souřadnice bodů poslechové plochy

	x(m)	y (m)	z (m)
Pt 1	0.3	4.0	1.25
Pt 2	0.3	1.0	1.25
Pt 3	5.0	1.0	1.25
Pt 4	5.0	4.0	1.25

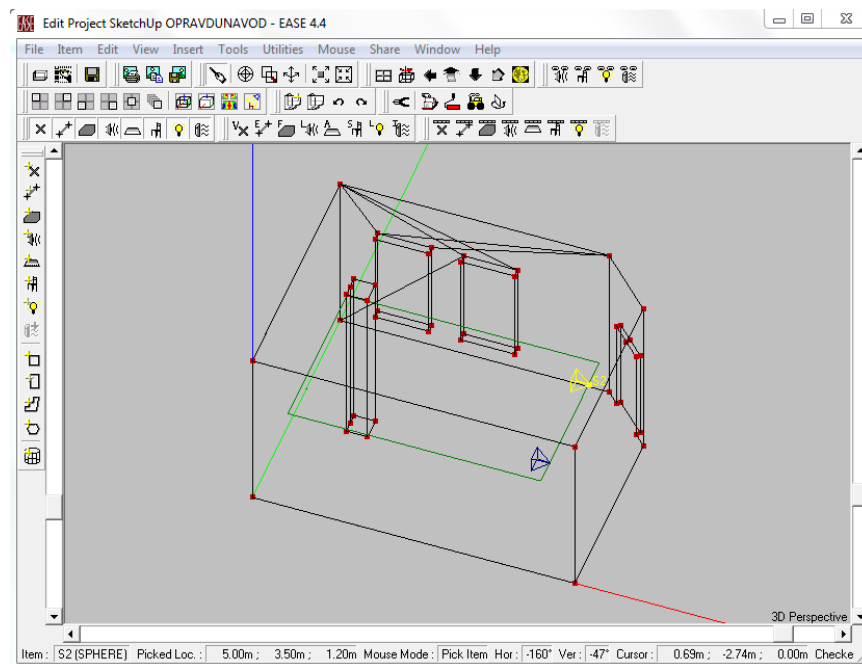
A.2.7 Reproduktry

Jako poslední záležitost je potřeba vložit reproduktory. Tak jako u materiálů, nejdříve se musí vložit reproduktory do projektu a až pak je lze konkrétně umístit. Proto opět **Project database** - > **Select speaker models**, otevře se stejné dialogové okno jako v případě materiálů a z nabízených značek je potřeba najít nějaký pár reproduktorů např. **RCF** -> **RCF art** -> **art312a**. Tlačítkem **add** se reproduktory přidají do databáze projektu a toto okno už je možné zavřít. Stiskem klávesy F5 je opět otevřeno „**check data**“ okno, zde na horním panelu **insert** -> **speaker** a kliknutím se umístí dva reproduktory, které se v náhledu zobrazí jako žluté trojúhelníčky. Nejprve je potřeba na některý z nich kliknout levým tlačítkem, aby byl označen (svítí žlutě) a pak pravým a vybrat položku **properties**. Zde je potřeba parametry **Point of reference** (umístění v prostoru) a **Angles** (úhel natočení) nastavit podle následující tab. A.2. Na závěr stačí zmáčknout klávesu F6 pro uložení dat.

Tab.A.2: Nastavení souřadnic reproduktorů

	x	y	z	hor	ver	rot
Repro 1	5.0	3.5	1.3	-90	0.0	0.0
Repro 2	5.0	1.5	1.3	-90	0.0	0.0

Pokud je vše nastaveno správně, náhled by měl vypadat tak jako na obrázku A.14

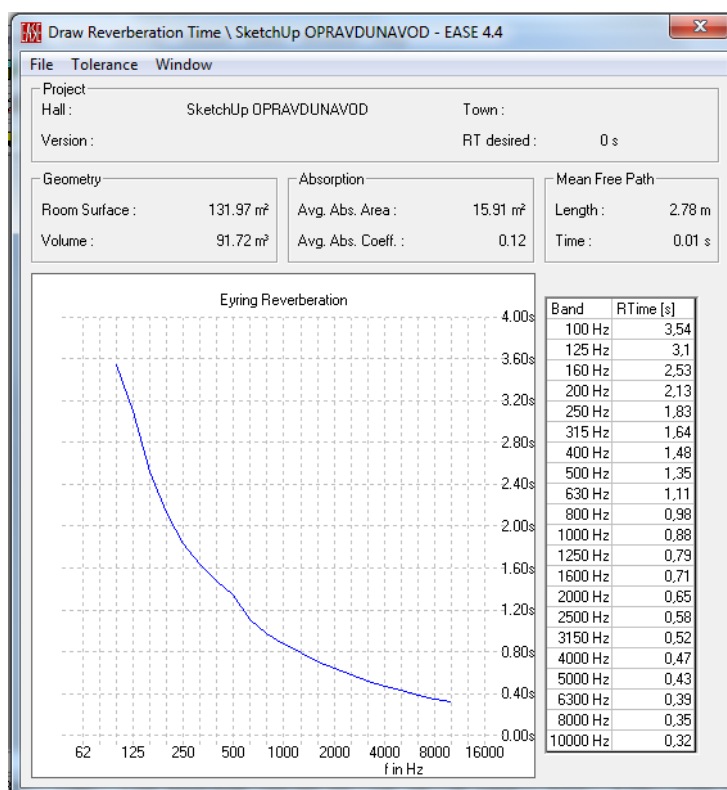


Obr.A.14: Náhled modelu v programu EASE včetně poslechové plochy a reproduktorů

A.2.8 Simulace

Simulace doby dozvuku

Simulace doby dozvuku se provádí snadno. Klávesou F5 se opět otevře okno **project data**, F6 pro **Save project data**. Poté stačí vybrat na horním panelu obrazovky **check data** položku **View** -> **Room RT**. To rovnou otevře okno (viz obr. A.15), ve kterém je vidět graf doby dozvuku, který EASE vypočítal podle Eyringova vzorce.

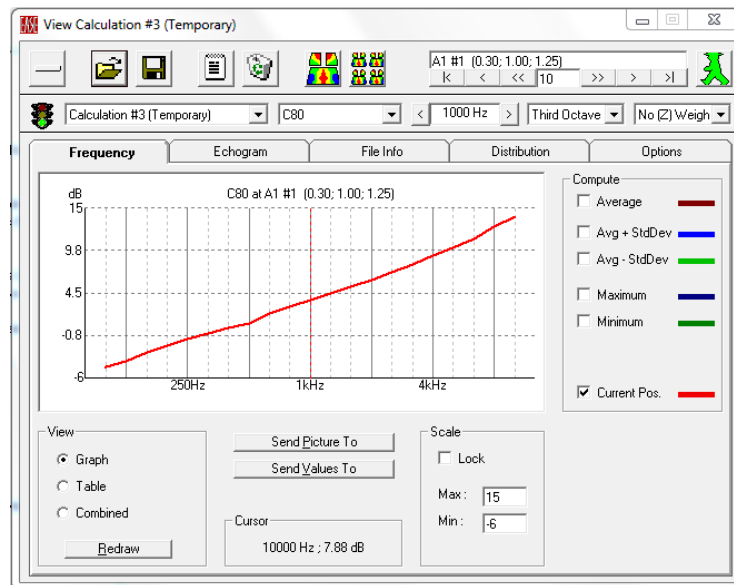


Obr.A.15: Simulace doby dozvuku fiktivní místnosti

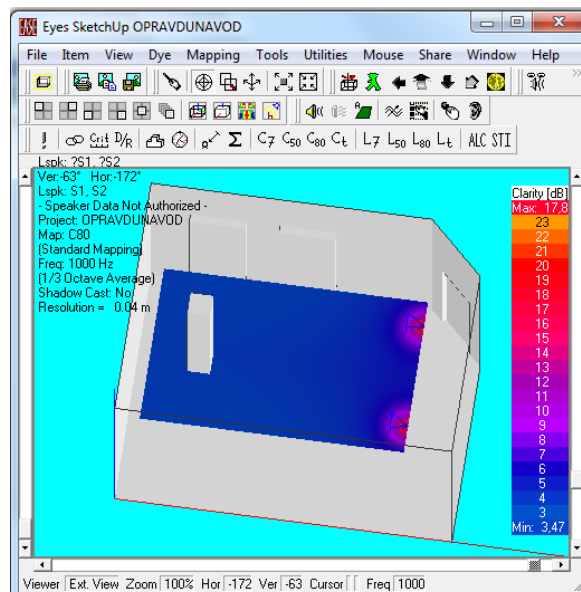
Simulace Clarity C80

C80 vyjadřuje, jak snadno lze rozlišit rychlé střídání tónů. [8]

Na výchozí ploše program EASE v menu po levé straně je vybrána položka **Mapping -> Clarity** a zde položka **C80, 3D**. Otevřou se dvě okna, jedno je náhled modelu a druhé je nastavení parametrů simulace. Zde jde ještě případně změnit typ simulace, případně nastavit pro jakou frekvenci se zobrazí rozložení v prostoru. Důležité je v kolonce **Loudspeakers in use** vybrat zvolené reproduktory, proto je potřeba kliknout na **Lspk Group**, kde je následně vybrána položka **All loudspeakers**, kliknutím na ok jsou vybrány všechny reproduktory, které byli předtím vloženy. Vše ostatní stačí nechat v nativním nastavení. Stejným způsobem se vytvářejí všechny simulace v sekci **Mapping**. Postup je vždy stejný, pouze se mění simulovaná veličina. Po skončení výpočtů bychom měli skončit s okny tak jako na obr. A.16 a A.17.

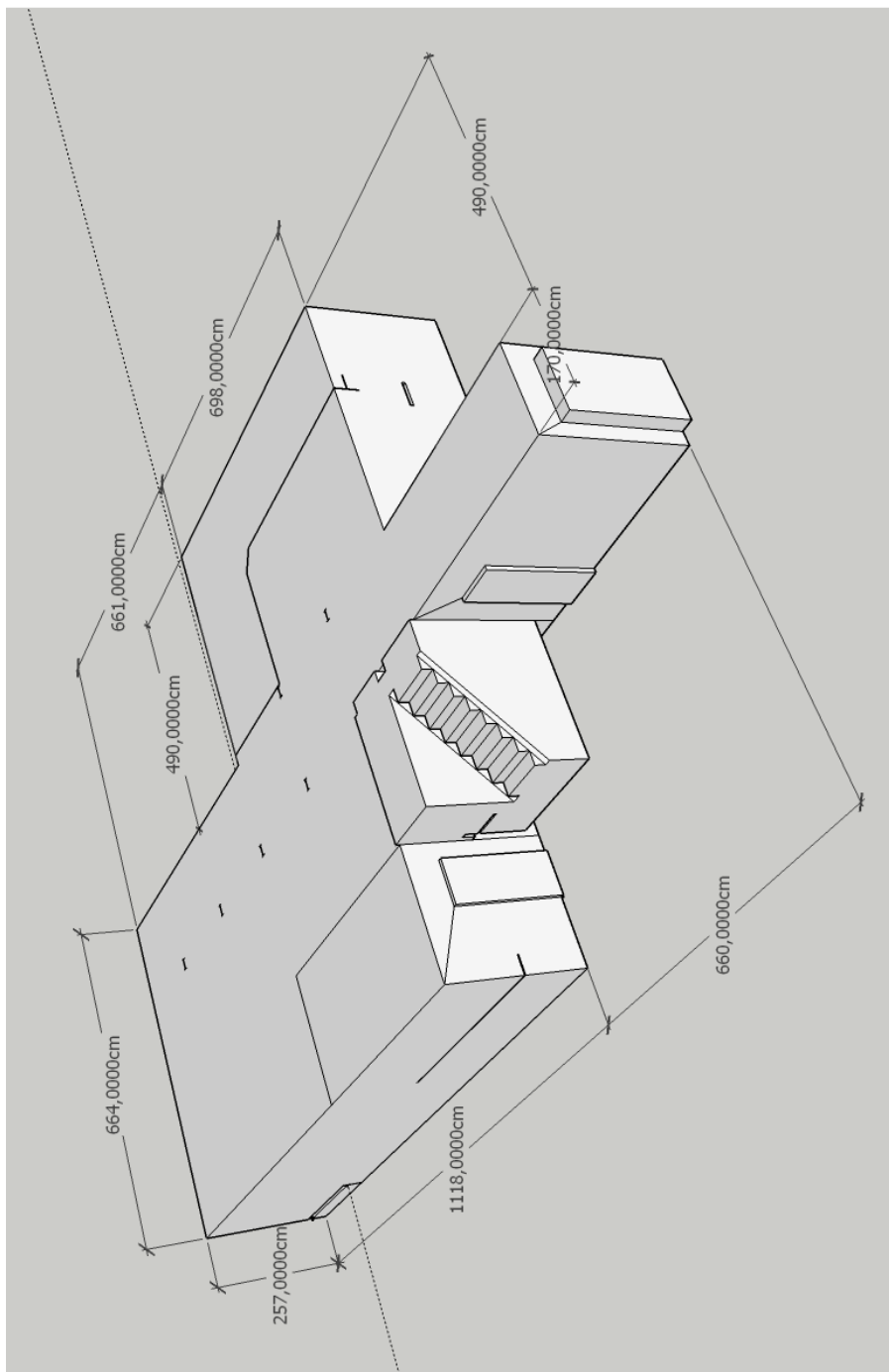


Obr.A.16: Graf frekvenční charakteristiky simulace C80

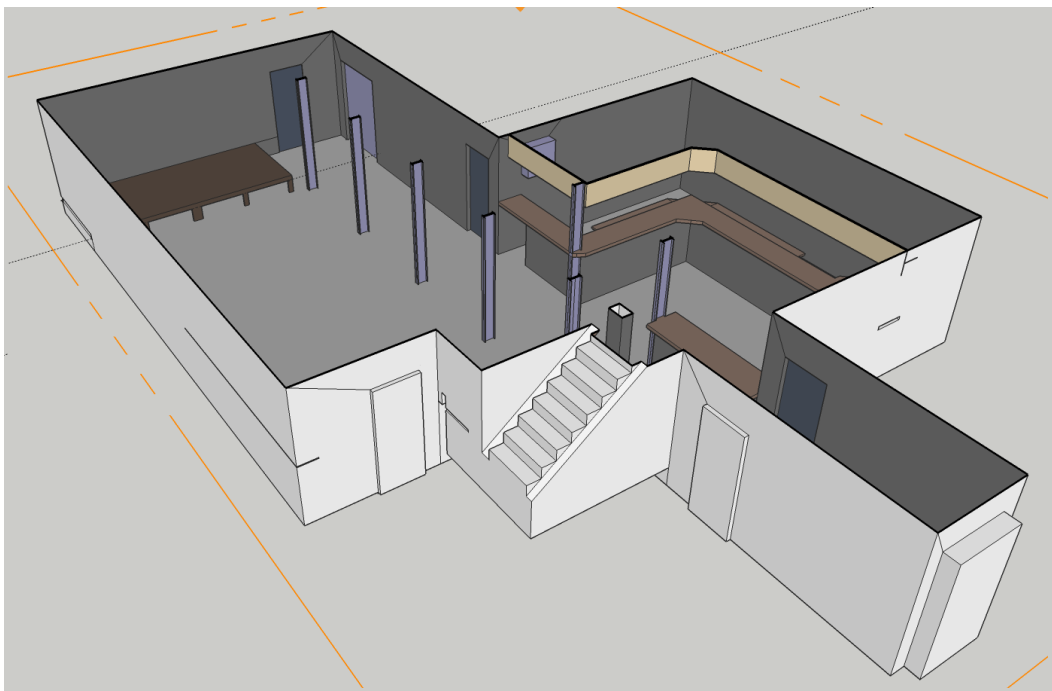


Obr.A.17: Zobrazení parametru C80 v prostoru

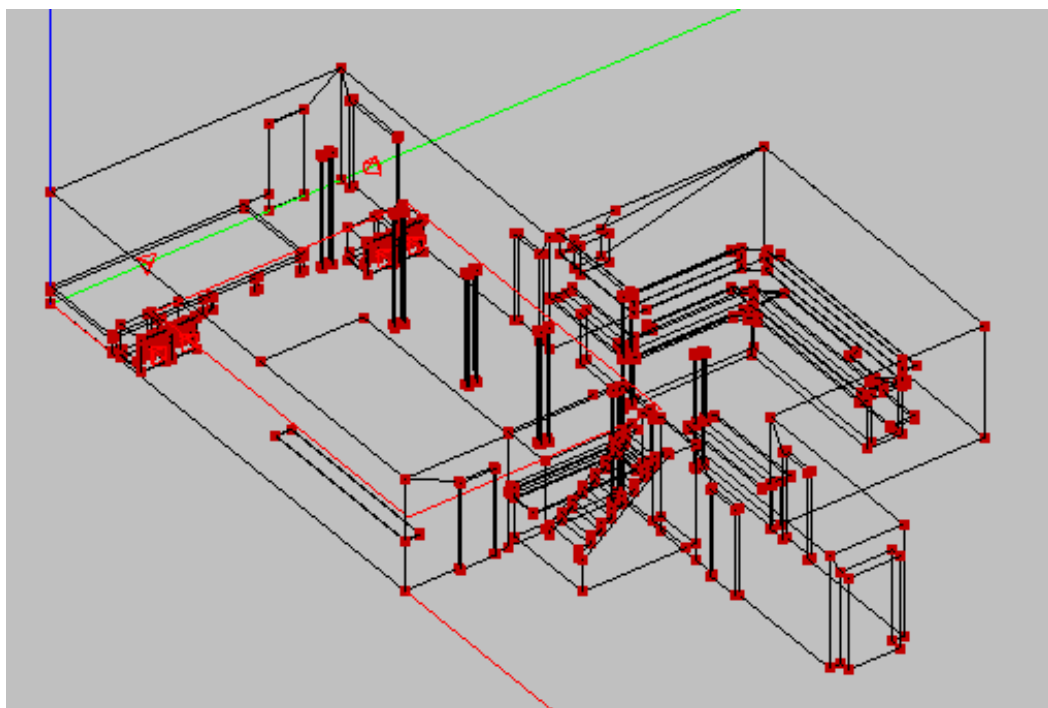
B NÁHLEDY STUDENTSKÉHO KLUBU YACHT V OBOU POUŽITÝCH SOFTWARECH



Obr. B.1: 3D model s vyznačenými hlavními rozměry, SketchUp

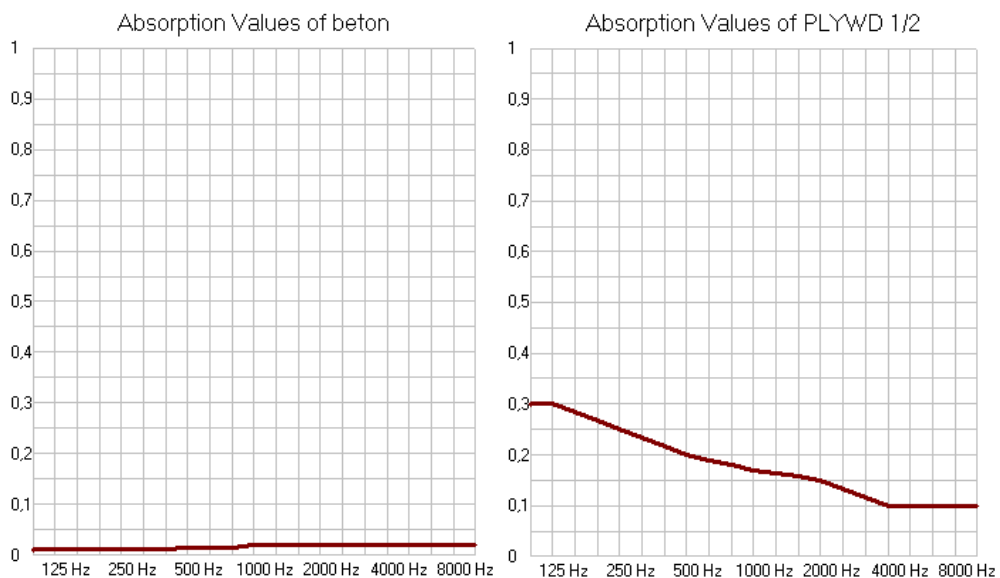


Obr. B.2: Náhled do vytvořeného modelu, SketchUp

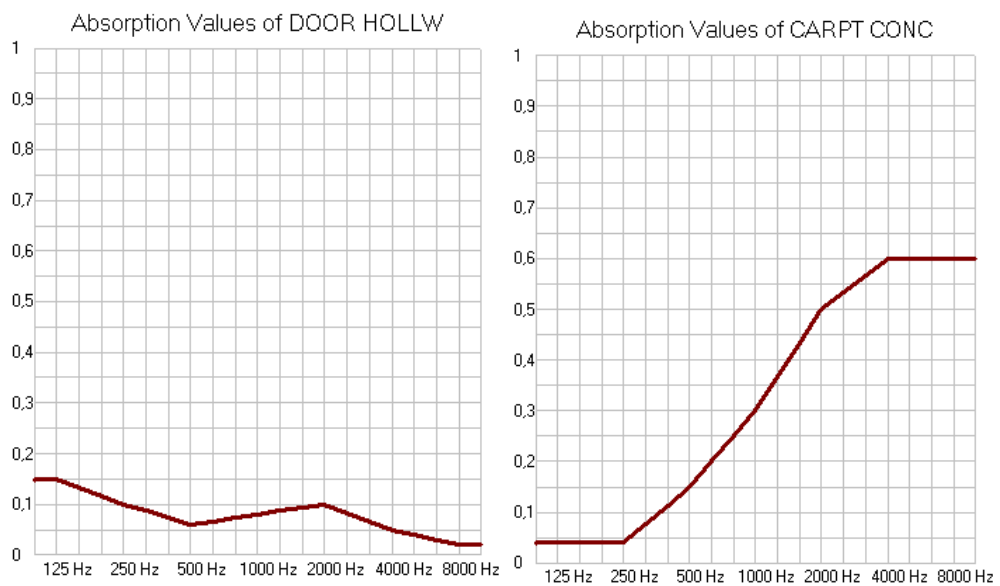


Obr. B.3: Náhled vytvořeného modelu v software EASE

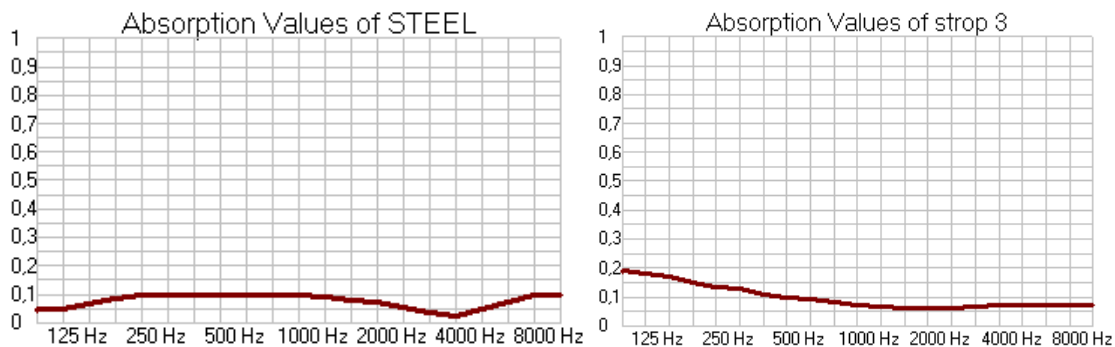
C MATERIÁLY POUŽITÉ PRO SIMULACI



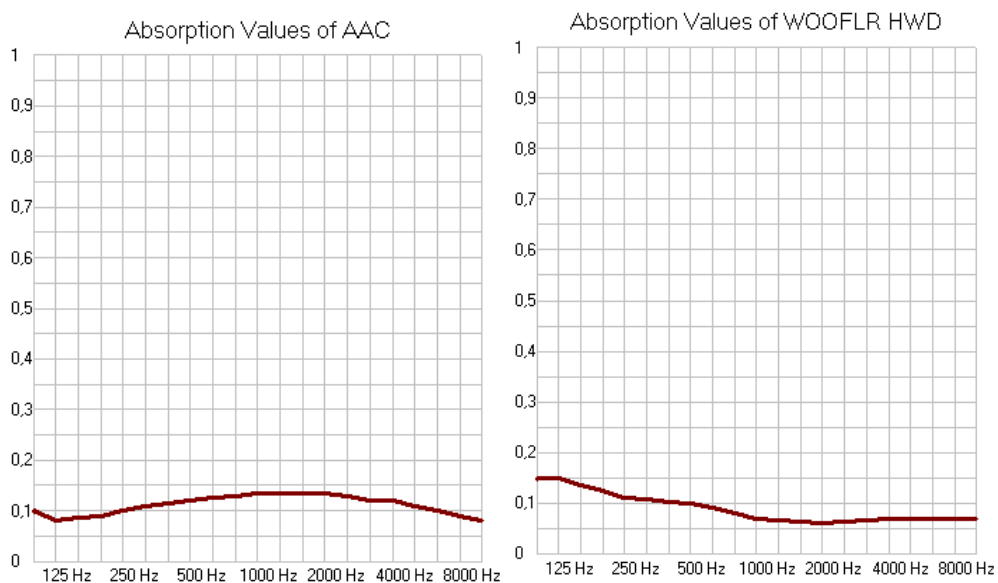
Obr. C.1: Koefficienty pohltivosti betonu (vlevo) a dřevěné překližky (vpravo)



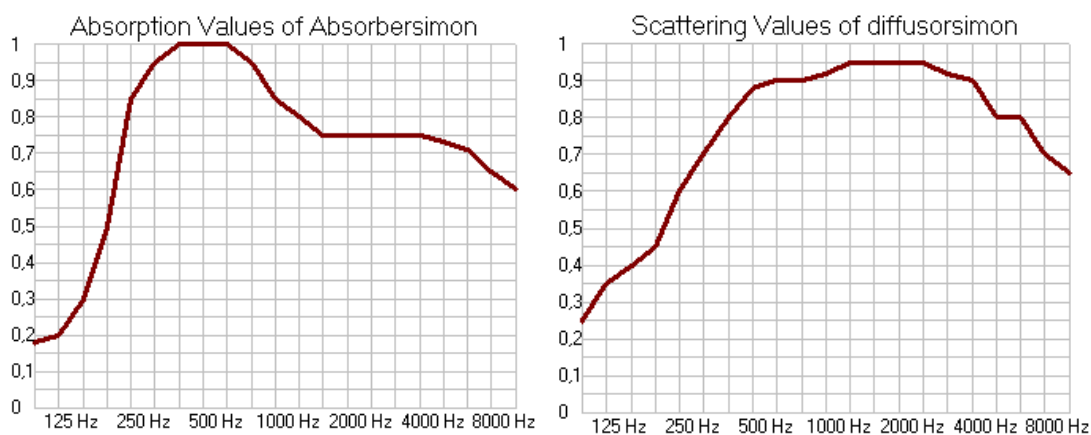
Obr. C.2: Koefficienty pohltivosti zavřených dveří (vlevo) a nástěnného koberce (vpravo)



Obr. C.3: Koeficienty pohltivosti kovových nosníků (vlevo) a dřevěného stropu (vpravo)

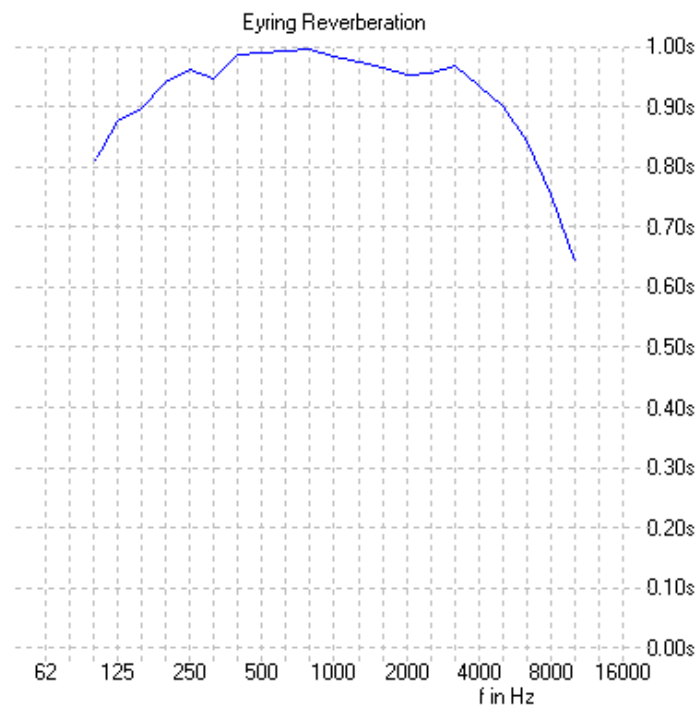


Obr. C.4: Koeficienty pohltivosti natřeného AAC betonu (YTONG – vlevo) a dřevěného podia (vpravo)



Obr. C.5 Koeficienty pohltivosti pro navrhnutý absorbér (vlevo) a difuzní koeficienty pro navrhnutý difusor (vpravo)

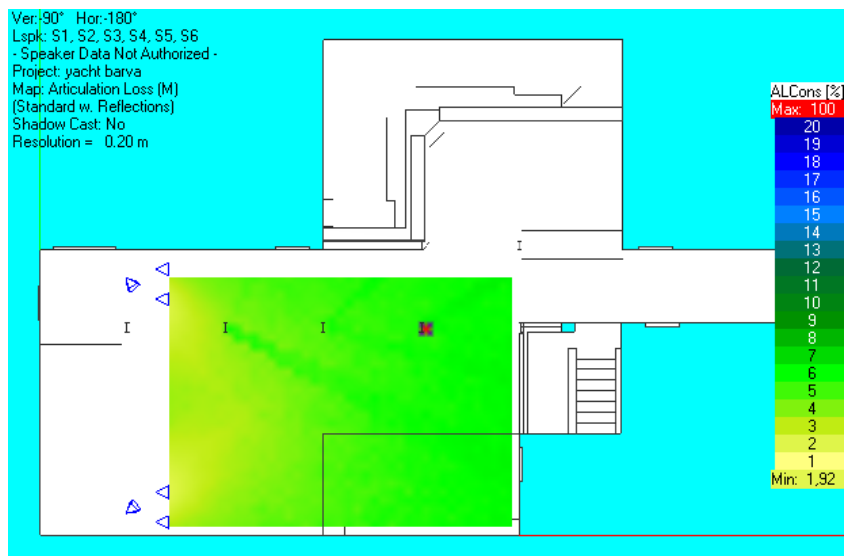
D VÝSLEDKY SIMULACÍ



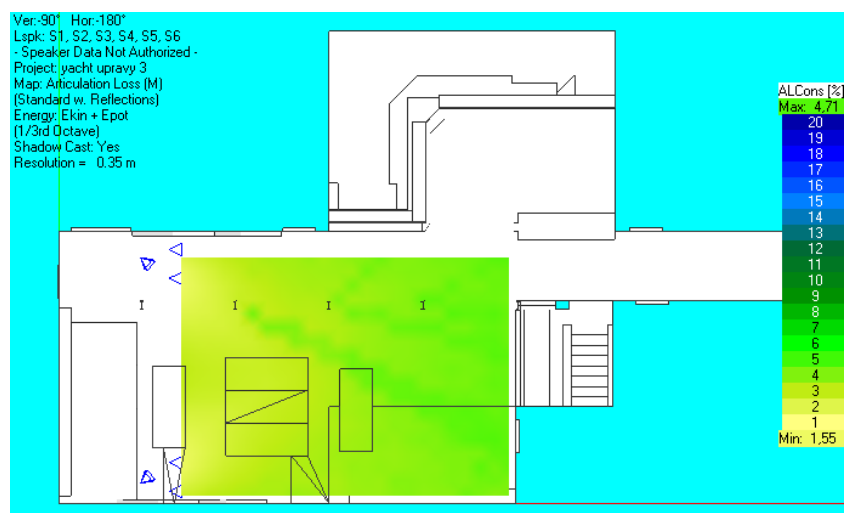
Obr. D.1: Graf nasimulované doby dozvuku před akustickými úpravami



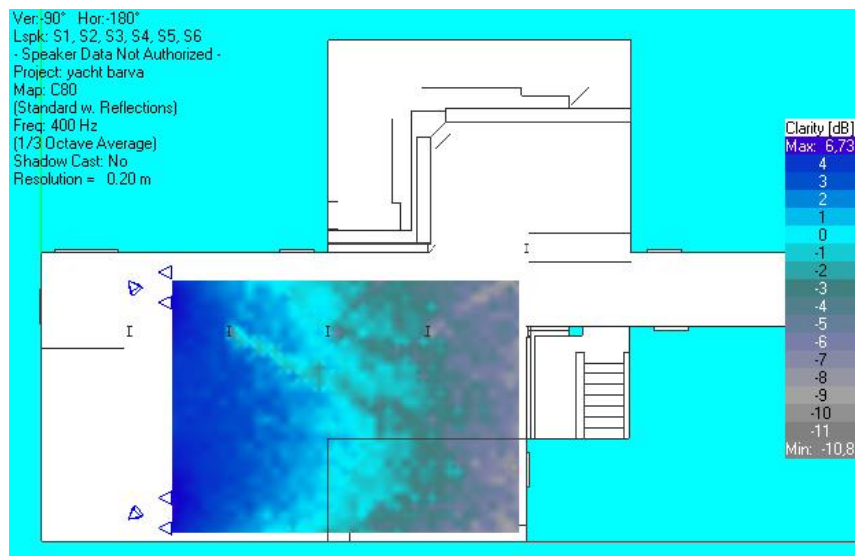
Obr. D.2: Graf nasimulované délky doby dozvuku po úpravách



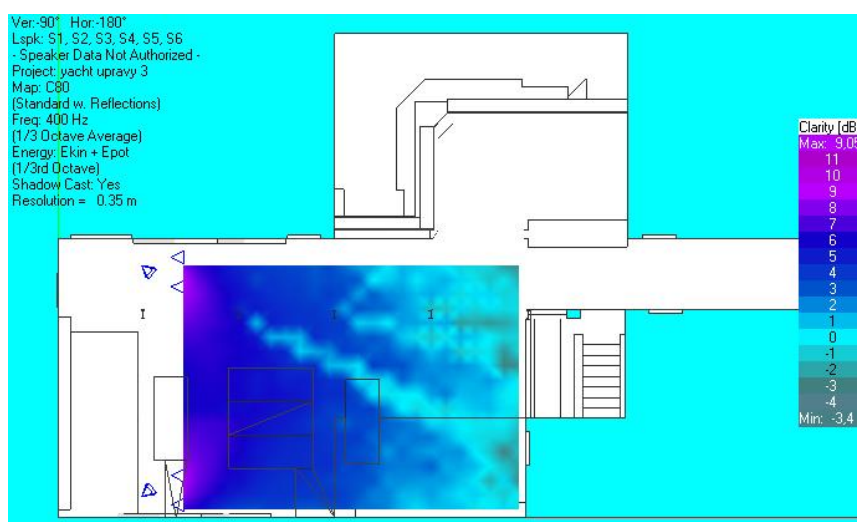
Obr. D.3: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny ALCons před úpravami



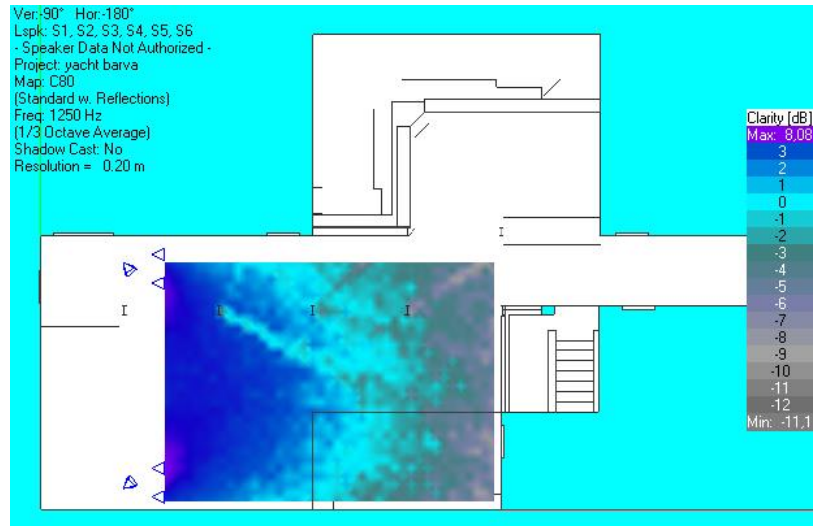
Obr. D.4: : Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny ALCons po úpravách



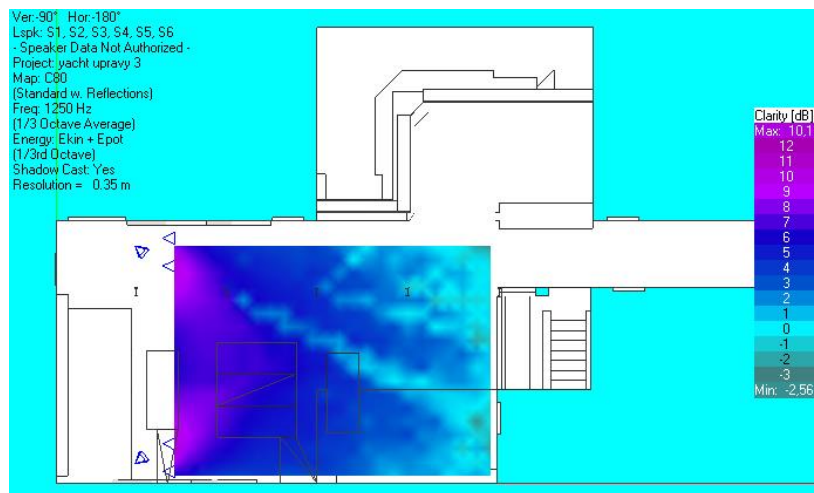
Obr. D.5: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny C80 pro frekvenci 400 Hz před úpravami



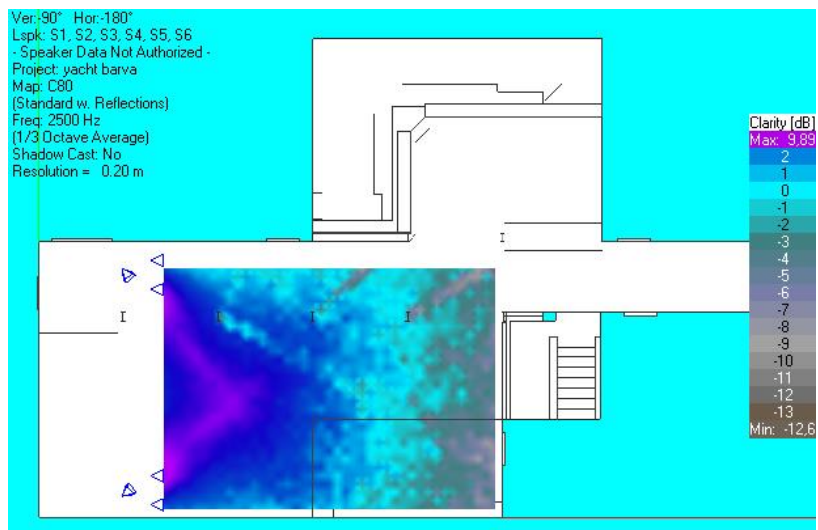
Obr. D.6: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny C80 pro frekvenci 400 Hz po úpravách



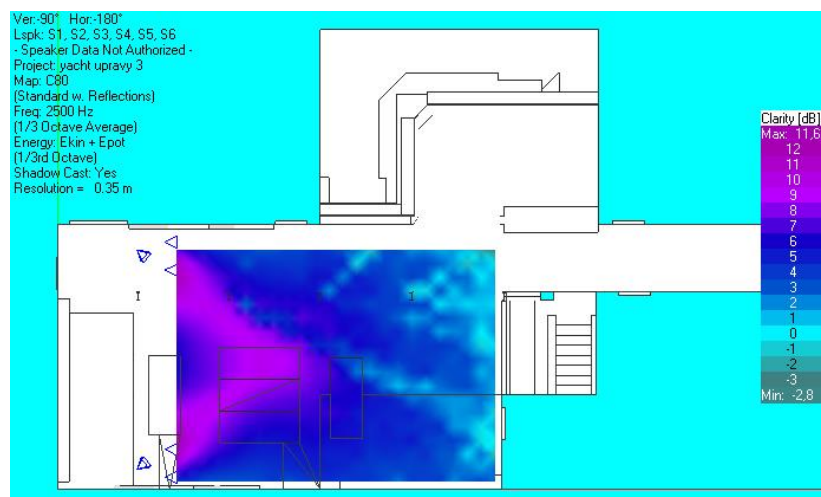
Obr. D.7: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny C80 pro 1250 Hz před úpravami



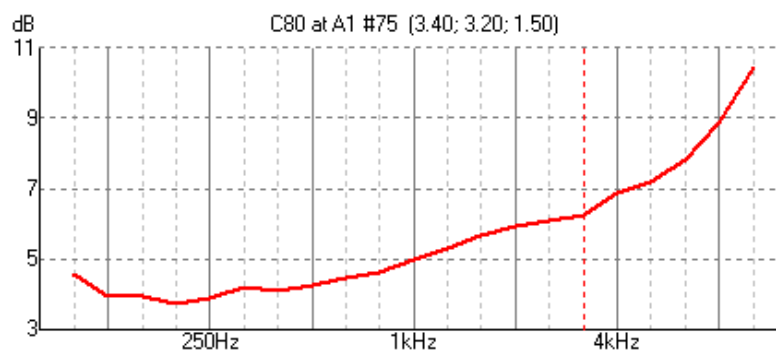
Obr. D.8: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny C80 pro 1250 Hz po úpravách



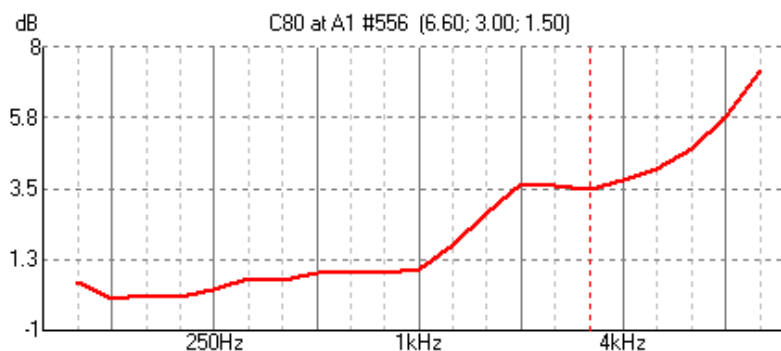
Obr. D.9: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny C80 pro 2500 Hz před úpravami



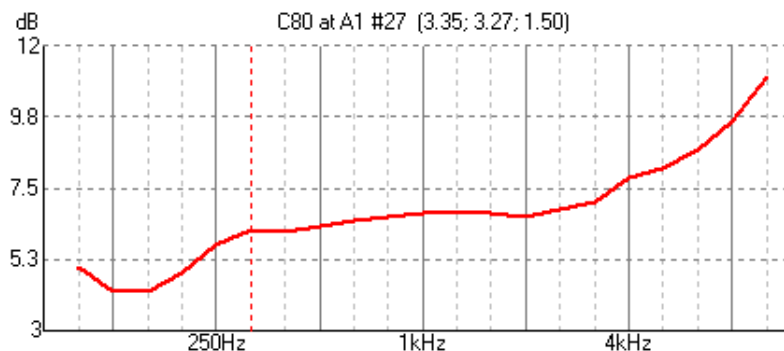
Obr. D.10: Grafické zobrazení prostorového rozložení veličiny C80 pro 2500 Hz po úpravách



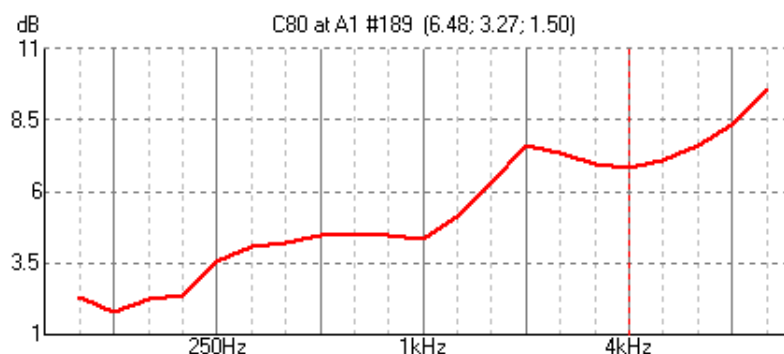
Obr. D.11: Graf C80 pro bod umístěný v přední části poslechové plochy před úpravami



Obr. D.12: Graf C80 pro bod umístěný ve střední části poslechové plochy před úpravami

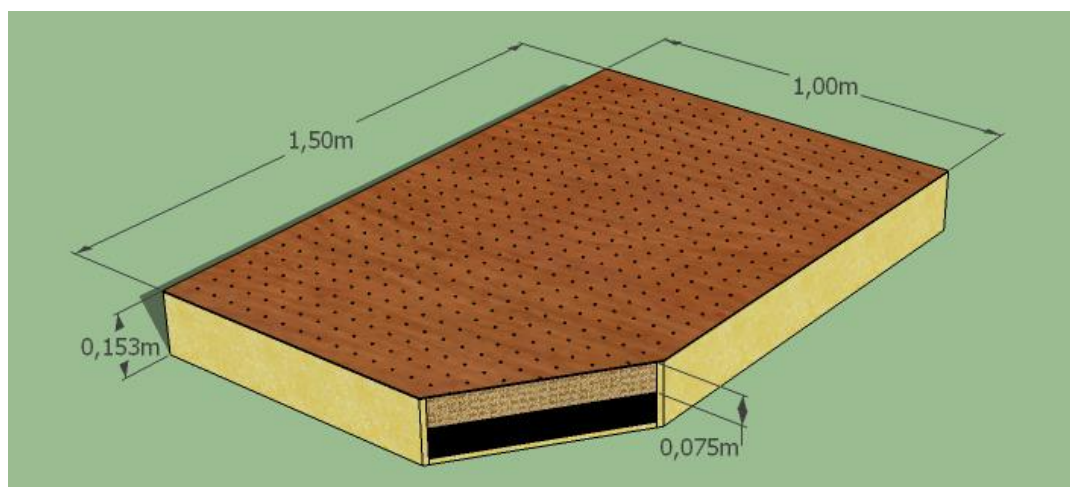


Obr. D.13: Graf hodnoty C80 pro bod umístěný v přední části poslechové plochy po úpravách

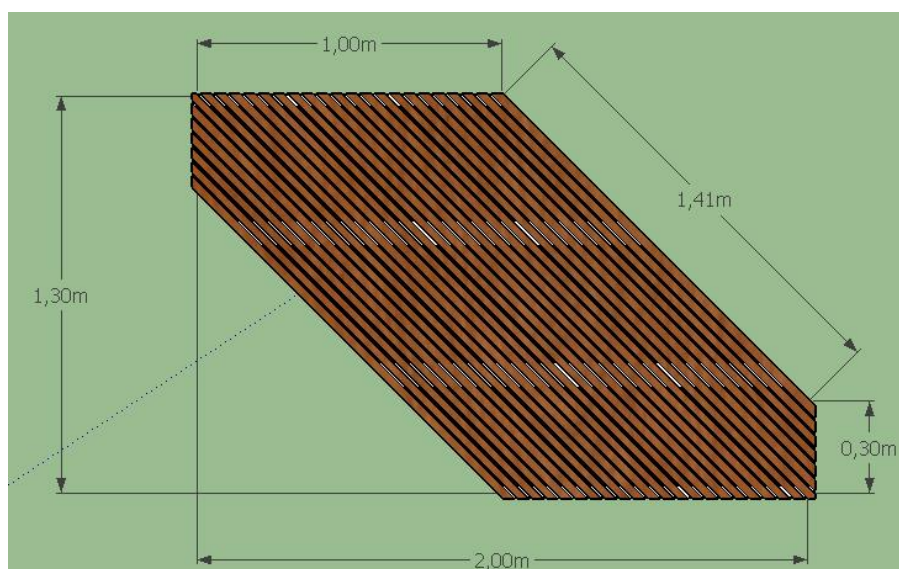


Obr. D.14: Graf hodnoty C80 pro bod umístěný ve středu poslechové plochy po úpravách

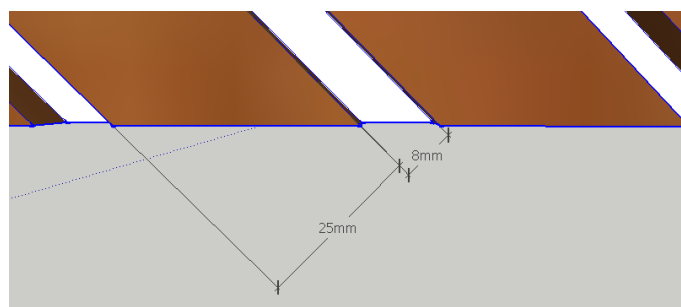
E NÁVRHY AKUSTICKÝCH OBKLADŮ



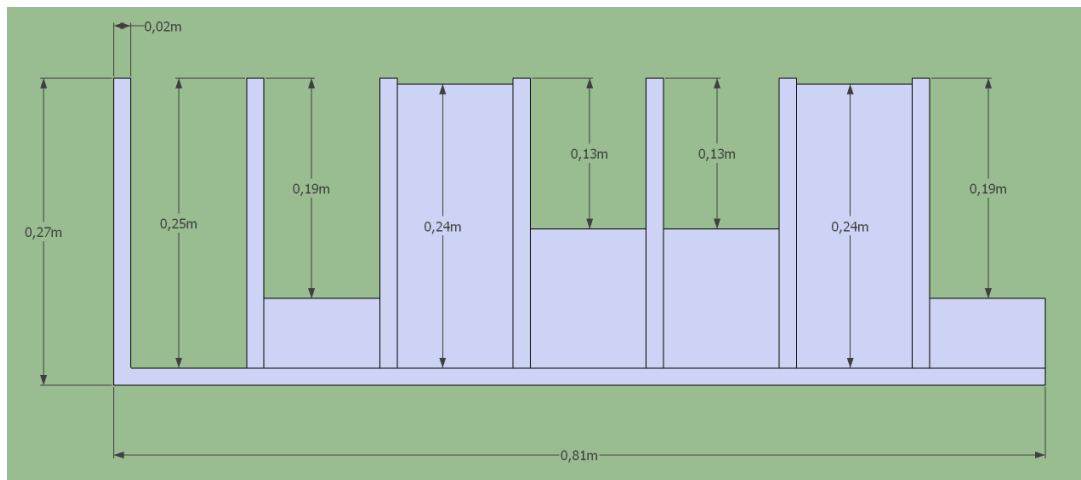
Obr. E.1: 3D model Helmholtzova rezonátoru – absorbéru s rozměry



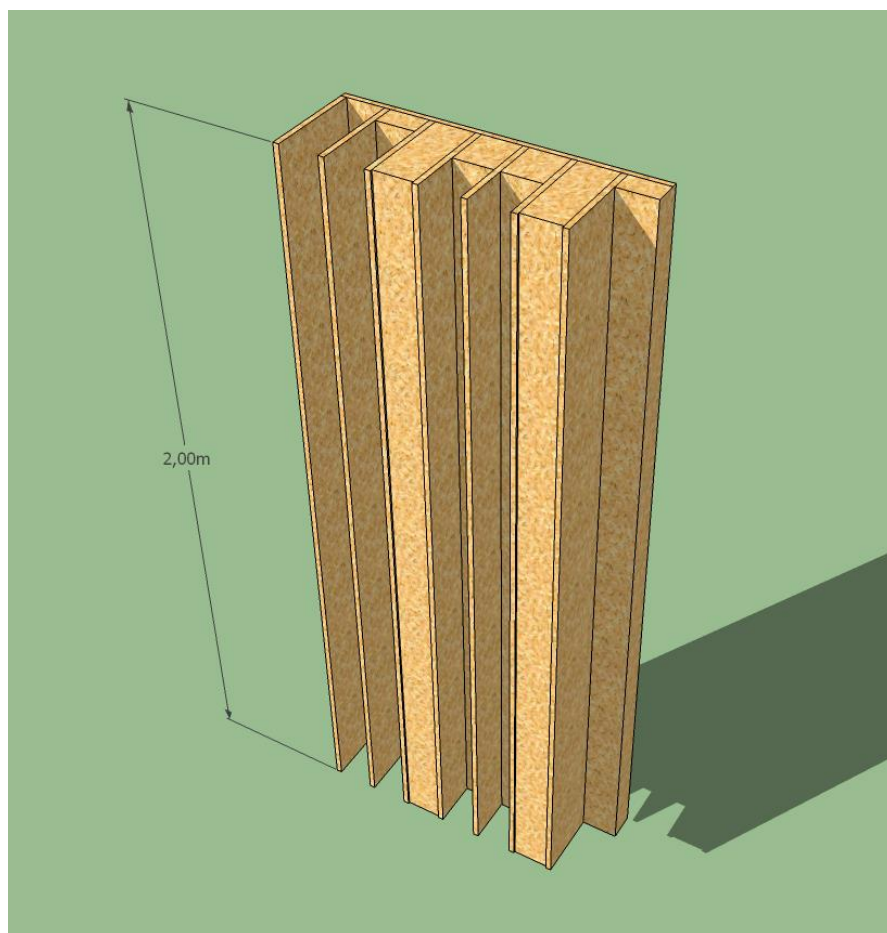
Obr. E.2: Model latěmi krytého absorbéru



Obr. E.3: Detail na velikost a rozestup krycích latí



Obr. E.2: Půdorys QRD difusoru s rozměry



Obr. E.3: 3D model QRD difusoru

F PŘÍLOHY NA CD

F.1 Vytvořené materiály pro program EASE

F.2 Projekt EASE vzorové místnosti

F.3 Projekt EASE studentského klubu yacht před úpravami

F.4 Projekt EASE studentského klubu po úpravách

F.5 SketchUp model klubu po úpravách

F.6 SketchUp model klubu před úpravami

F.7 SketchUp model vzorové místnosti

F.8 SketchUp modely akustických prvků