



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

**Vliv jemnosti modelování prostorové akustiky sálu na korelaci
s výsledky měření**

**Influence of Particularity Degree of the Room Acoustics
Modelling on the Correlation with the Measurement Results**

Diplomová práce

Studijní program: **Elektronika a komunikace**

Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

Vedoucí práce: **Dr. Ing. Libor Husník**

Bc. Eugeniu Berdan

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Berdan** Jméno: **Eugeniu** Osobní číslo: **434718**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv jemnosti modelování prostorové akustiky sálu na korelaci s výsledky měření

Název diplomové práce anglicky:

Influence of Particularity Degree of the Room Acoustics Modelling on the Correlation with the Measurement Results

Pokyny pro vypracování:

V programu EASE namodelujte prostorovou akustiku vybraného prostoru v různých stupních jemnosti. Vždy spočítejte relevantní akustické parametry a porovnejte je s naměřenými parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, Praha SNTL/Alfa 1980
- [2] Ease software User's guide, dostupné na ease.afmg.eu
- [3] Kuttruff, H.: Room Acoustics, Spon Press, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Dr. Ing. Libor Husník
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

Datum: 15.5.2019

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce, Dr. Ing. Liboru Husníkovi, za návrh tohoto zajímavého tématu, trpělivé a ochotné vedení, za odborné připomínky a cenné rady při vypracovávání této práce i za pomoc při realizaci praktické části. Rád bych také poděkoval mé rodině, všem blízkým přátelům a především mé snoubence za neustálou podporu, obrovskou trpělivost, vstřícnost a pochopení, motivaci a povzbuzování za všech okolností nejen během vypracování této práce, ale po celé mé studium na ČVUT.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je akustika uzavřených prostorů a simulace akustiky v modelech reálných místností. Modelování je v dnešní době velmi používaným aspektem při řešení prostorové i stavební akustiky, kdy umožňuje mnohem komplexnější analýzu dané místnosti a zvukového pole v ní a také usnadňuje práci při výpočtech, návrhu i úpravách pro zlepšení akustiky v místnosti. Úkolem v této práci je sestavení modelů daných místností v různých úrovních přesnosti provedení a také srovnat akustiku s naměřenými daty v reálné místnosti dle objektivního kritéria, v daném případě doby dozvuku. Kromě principů prostorové akustiky je v této práci popsáno vlastní modelování a simulace akustiky v softwaru EASE. V praktické části se pak sestaví modely, provedou akustická měření ve vybraných místnostech a nakonec se výsledky z modelů a samotných místností porovnají a vyhodnotí v diskusi.

Klíčová slova

modelování, prostorová akustika, dozvuk, doba dozvuku, pohlcování zvuku, činitel zvukové pohltivosti, posluchárna, EASE

Abstract

The topic of this diploma thesis is the acoustics of enclosed spaces and the acoustic simulation in models of real rooms. Modelling is a broadly used aspect in room and building acoustics these days. It brings much more complex analysis of a room as well as the sound field inside and it makes the calculations, the design and the modifications for better acoustics easier. The task is to create some models of given rooms with different levels of design particularity and to compare the model acoustics with real data extracted from the measurement of the real room considering a objective criterion, in this case reverberation time. Besides the principles of room acoustics the modelling and the simulation of acoustics in EASE software is described in this thesis. In the practical part, the models and the acoustics measurement in selected rooms are made. Finally, the results from the models and the rooms are compared and evaluated in the discussion.

Keywords

modelling, room acoustics, reverberation, reverberation time, sound absorption, sound absorption coefficient, lecture room, EASE

Obsah

Úvod.....	13
1 Prostorová akustika.....	15
1.1 Geometrická akustika.....	15
1.2 Vlnová akustika.....	16
1.3 Statistická akustika.....	17
2 Parametry pro prostorovou akustiku.....	19
2.1 Bilance zvukové energie na překážce a činitel zvukové pohltivosti.....	19
2.1.1 Pohlcování zvuku jako přeměna zvukové energie.....	20
2.2 Dozvuk a doba dozvuku.....	22
2.2.1 Doba dozvuku – Sabinův vzorec.....	23
2.2.2 Doba dozvuku – Eyringův vzorec.....	24
2.2.3 Doba dozvuku – Millingtonův vzorec.....	24
2.2.4 Vliv prostředí na dobu dozvuku.....	25
3 Modelování pomocí EASE.....	26
4 Praktická část.....	31
4.1 Měření doby dozvuku.....	31
4.1.1 Metoda MLS.....	32
4.1.2 Určení doby dozvuku z impulzní odezvy.....	33
4.1.3 Realizace měření.....	35
4.2 Místnosti vybrané pro modelování a měření.....	35
4.2.1 Učebna 554.....	35
4.3 Posluchárna D3-309.....	40
4.3.1 Modely D3-309.....	43
Model 1 – shoebox.....	43
Model 2 – hrubý tvar (základ).....	45
Model 3 – hrubý tvar (pokročilé).....	46
Model 4 - prázdná místnost bez přilehlých prostorů a sloupů.....	48
Model 5 - prázdná místnost bez přilehlých prostorů se sloupy.....	50
Model 6 – úplný model bez sedaček.....	52
Model 7 – Úplný model.....	53
4.3.2 Měření posluchárny 309.....	56
4.3.3 Srovnání modelů a reálné místnosti.....	58

5	Závěr.....	64
6	Použitá literatura.....	67
7	Seznam obrázků a tabulek	69
8	Přílohy	71

Úvod

Tato práce se zabývá prostorovou akustikou, oborem, který řeší šíření zvuku v uzavřených prostorech a jeho vnímání. Oproti šíření zvukových vln ve volném prostoru jsou v prostorové akustice (nebo také akustice uzavřených prostor) klíčové odrazy, rozptyl a pohlcování zvuku na rozhraní a překážkách. Problematika této oblasti akustiky je poměrně komplexní, neboť zahrnuje nejen samotnou analýzu šíření zvuku, ale také především objektivní posuzování akustické kvality místnosti a potřebné úpravy pro zlepšení akustických podmínek. Kvalitu akustiky dané místnosti je nezbytné řešit již od jejího návrhu a výstavby, neboť akustika je ovlivněna jak rozměry místnosti, tak i jejím tvarem a použitými materiály. Stejně tak je nutné přihlížet i k účelu místnosti, kdy podle určení dané prostory se především vybírají vhodné materiály pro výstavbu i úpravu interiéru k dosažení optimálních akustických podmínek dle vybraných parametrů a norem. Prostorová akustika spojuje obory jako psychoakustika, architektura, stavebnictví, interiérový design ale i materiálové inženýrství, a to jen dokazuje její komplexitu, přestože je často tato oblast akustiky širokou veřejností podceňována a zanedbávána.

V dnešní době se v akustické branži s rozvojem počítačové techniky a technologie čím dál častěji přiklání k modelování prostor a simulace zvuku v nich. To může pomoci lépe a s větší přesností analyzovat místnost a také poskytnout možnost snadněji a především úsporněji navrhovat změny a úpravy pro zkvalitnění akustiky, kdy můžeme hned sledovat vliv daných úprav a následně je korigovat pro dosažení co nejlepších výsledků. Mnohdy takové simulace nekončí pouze u výstupních tabulek a číselných výsledků, ale také dají možnost si pomocí tzv. auralizace hned poslechnout například řeč nebo hudební skladbu tak, jak by zněla v modelované místnosti. Modelování a simulace jsou tedy mocným nástrojem moderní akustiky.

Cílem této práce je tak namodelovat místnosti a odsimulovat akustiku v nich s důrazem na konkrétní objektivní parametry. Dílčím úkolem bylo nejprve si vyzkoušet modelování jednoduché místnosti společně se simulací akustiky a následně porovnat výsledky s parametry dané reálné místnosti. Hlavním úkolem však po seznámení s modelovacím softwarem bylo namodelovat poměrně složitější místnost, a to v různých stupních přesnosti modelu, a opět porovnat výsledky simulace s akustickými parametry reálné místnosti. Práce je rozdělena na 5 kapitol. V prvních dvou kapitolách stručně seznámí čtenáře s problematikou prostorové akustiky, popisuje její hlavní přístupy a některé parametry k jejímu především objektivnímu posouzení. V další kapitole bude

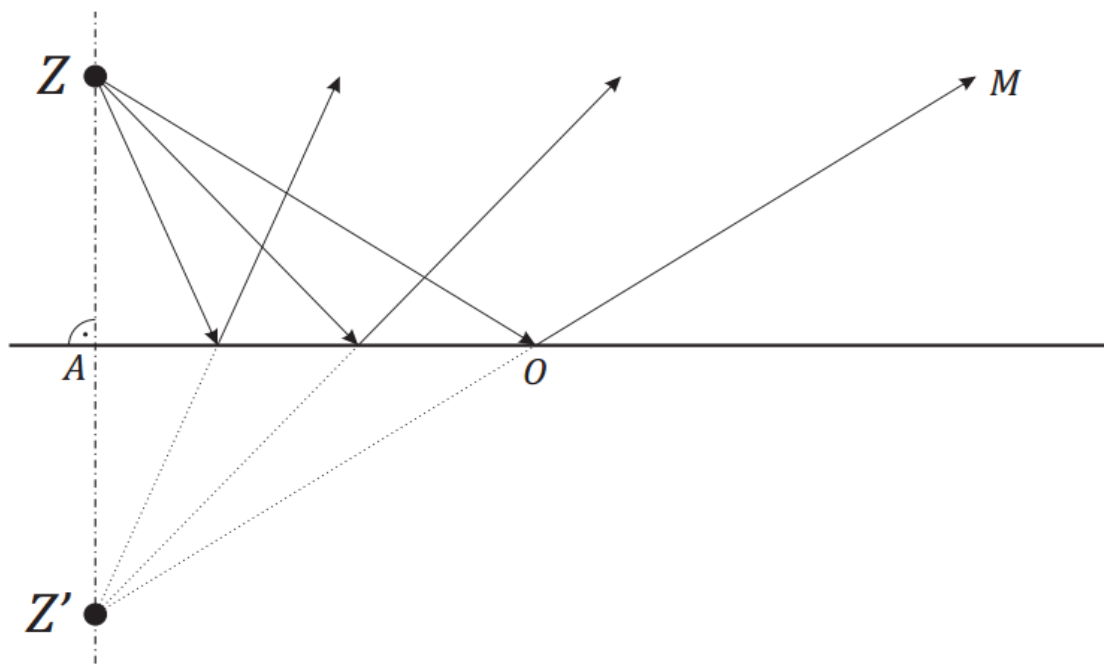
popsán modelovací software EASE včetně základu modelování v něm. V praktické části jsou popsány modelovací místnosti včetně modelů a jejich specifik, a nakonec jsou prezentovány výsledky simulace a měření společně s jejich porovnáním.

1 Prostorová akustika

Prostorová akustika nahlíží na problematiku pomocí tří přístupů – geometrická, vlnová a statistická akustika. Každý z přístupů popisuje šíření zvuku v místnosti pro jiné kmitočtové pásmo a za různých podmínek.

1.1 Geometrická akustika

První z přístupů počítá s vyššími kmitočty zvukových vln. Na vysokých frekvencích jsou odrazné plochy větší než zvukové vlny, můžeme tak vyloučit ohyb vlny za překážkou a uvažujeme především odraz vlny od překážky. Metoda zjednodušuje šíření vlny zvuku na zvukový paprsek, který má směr normály k vlnoploše a sleduje pohyb paprsku od zdroje. Analogicky jako v optice bude platit zákon o úhlu dopadu a odrazu. Důležité je počítat nikoli jen s rovnými odrazovými plochami, ale i s vypuklými nebo vydutými (konvexní a konkávní plochy). Vypuklé plochy zvukové vlny rozptýlí, kdežto vyduté soustřeďují, obdobně jako v optice. Těchto účinků se využívá k dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení zvukové energie v místnosti. S rostoucími rozměry překážky, a tedy plochy odrazu, se chování zvukové vlny více blíží k chování světelných paprsků. Při odrazu paprsku na překážce uvažujeme pomyslný zrcadlově symetrický zdroj za překážkou, od kterého by se šířil odražený paprsek. Při odrazu se také skokově mění energie zvukové vlny.



Obrázek 1: Princip zrcadlení zdroje

Limitace této metody však spočívá jak v náročnosti výpočtu, kdy s časem roste hustota odrazů kvadraticky a od určité chvíle nejde počítat všechny odrazy, tak i ve frekvenčním omezení předpokladu ohybu vlny totiž že ohyb nemůžeme vyloučit pro vlnové délky větší než plocha odrazu překážky.

1.2 Vlnová akustika

Modelováním zvukového pole především v oblasti nižších frekvencí a pro pravidelné kvádrové místnosti (často nazývaných taky „krabice od bot“ podle podobnosti tvaru) se zabývá vlnová akustika, která vychází z řešení vlnové rovnice. Právě pro náročnost výpočtu se omezuje hlavně na místnosti s pravidelnými tvary a protilehlými stěnami typu kvádr. Předpokládá se odraz vln od tuhých stěn, kdy dochází ke stojatému vlnění. Kmitny i uzly tohoto vlnění (maxima a minima amplitudy součtu přímé a odražené vlny) deformují zvukové pole a ovlivňují jeho difuznost, neboť na frekvencích shodných s vlastními kmity místnosti dochází k rezonanci. Úlohou metody je nalézt tyto vlastní kmity (módy místnosti):

$$f_N = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

kde c rychlost šíření zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 l_x, l_y, l_z rozměry místnosti (délky hran kvádru) [m]
 n_x, n_y, n_z celá čísla.

Pro kvalitní přenos zvuku musíme zajistit co největší hustotu vlastních kmitů v poslechovém kmitočtovém pásmu a dostatečné tlumení vlastních kmitů. Pro rovnoměrné zvukové pole požadujeme, aby kmitočtová vzdálenost sousedních módů byla co nejmenší. To ale není splněno na nízkých frekvencích, kde zvukové pole není vyrovnané, protože vlastní módy jsou ve spektru hodně vzdáleny a na daných kmitočtech dojde díky rezonanci ke zvýraznění. Oblast, kde je zvukové pole nevyrovnané můžeme určit pomocí **Schroederova kritického kmitočtu**:

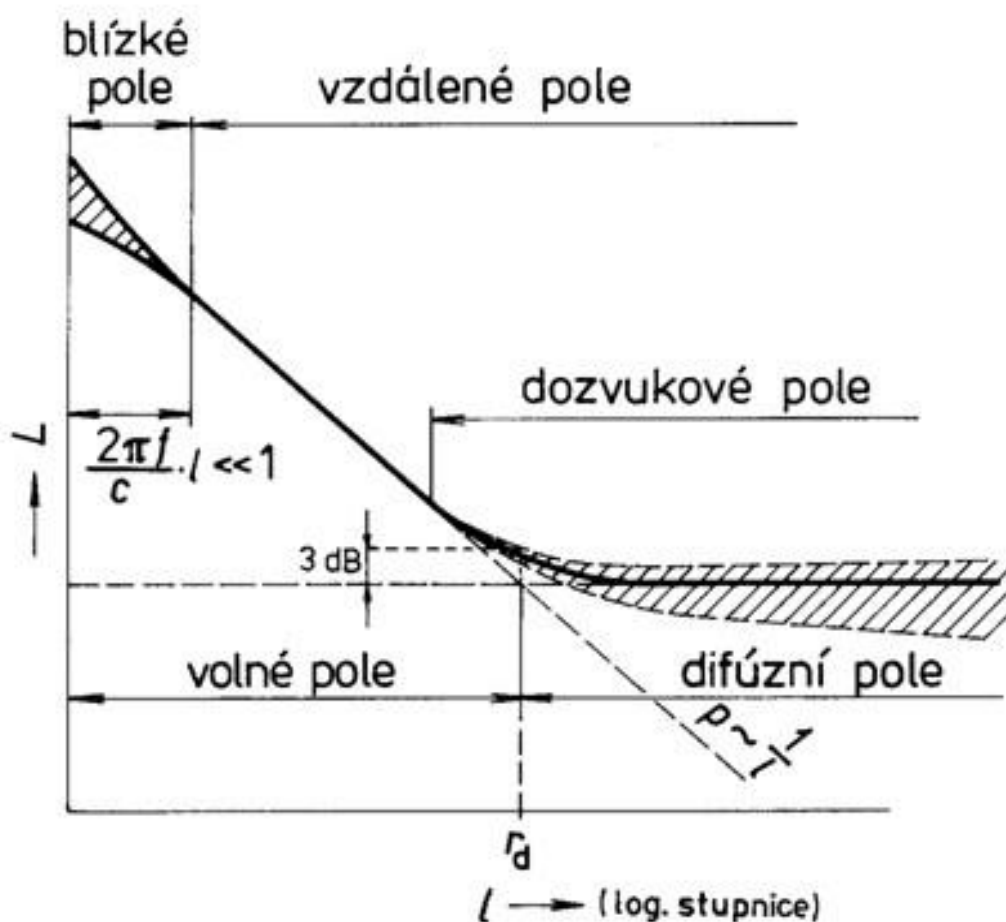
$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

kde T doba dozvuku [s]
 V objem místnosti [m^3].

Od této kritické frekvence je splněna podmínka rovnoměrnosti pole a spektrální vzdálenosti sousedních módů. Pro lepší akustické podmínky se při stavbě pravidelných kvádrových prostor doporučuje, aby rozměry byly v neceločíselném poměru jako například délka : šířka : výška = 2,5:1,5:1. Dobrá difuznost je také zajištěna volbou místnosti s členěním, které umožní nepravidelné odrazy zvuku od stěn. V takovém případě je ale zamezeno vzniku stojatého vlnění a tak není možné použít zmíněný vzorec výpočtu vlastních módů. Přesto je nutné určit kritickou frekvenci.

1.3 Statistická akustika

Zcela jiný přístup přináší statistická akustika. Ta umožňuje nalézt průměrné hodnoty veličin potřebných pro určení akustické kvality daného prostoru. Oproti předchozím metodám používá pro charakterizaci a popis zvukového pole veličiny energetické jako je hustota zvukové energie či intenzita zvuku. Zprůměrování hodnot pak dává lepší přehled o zvukových vlastnostech místnosti.



Obrázek 2: Zvukové pole v uzavřené místnosti (závislost hladiny akustického tlaku L na vzdálenosti od zdroje r_d) [18]

Statistická akustika vychází z následujících předpokladů:

- a) Zvuková energie, resp. její velikost, se uvažuje jako součet středních hodnot energie způsobené odrazy od stěn. Nepočítá se s interferencemi odražených vln, resp. s okamžitými hodnotami energetických veličin v daném bodě. Z toho vyplývá, že se uvažují pouze nezávislé (nekoherentní) zdroje.
- b) Všechny úhly dopadu zvukových vln v daném bodě jsou stejně pravděpodobné.
- c) Nutná podmínka pro statistickou akustiku je stejná hustota zvukové energie v každém bodě prostoru. Uvažujeme pouze pole odražených zvukových vln tedy místa, kde je možné zanedbat působení energie přímých vln (difúzní pole). Jen v takovém případě je hustota zvukové energie konstantní. [1]

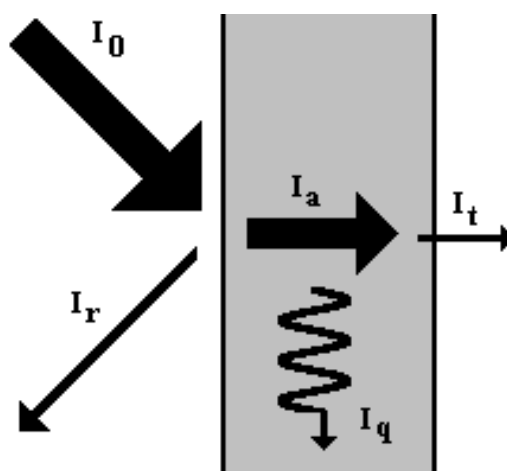
Všechny tyto předpoklady difúzní pole splňuje, neboť vzniká pouze odraženými zvukovými vlnami a hustota zvukové energie je v takovém poli konstantní. Statistickou akustiku můžeme aplikovat od kritické frekvence f_k .

2 Parametry pro prostorovou akustiky

V návaznosti na přístupy modelování akustických prostor je nezbytné zmínit některé důležité parametry a vlastnosti potřebné k měření i modelování akustického pole v daném prostoru.

2.1 Bilance zvukové energie na překážce a činitel zvukové pohltivosti

Při řešení akustiky v uzavřeném prostoru nesmíme vynechat zákon zachování energie a je potřeba počítat s přeměnami energie. Je zřejmé, že zvuková vlna odražená od stěny má menší energii než vlna, která dopadla na rozhraní. Z toho vyplývá, že část energie je pohlcena nebo projde skrz stěnu.



Obrázek 3: Rozdělení zvukové energie při dopadu vlny na překážku [20]

Na obrázek 3 vidíme rozdělení energie zvukové vlny při dopadu na stěnu. I_0 a I_r je intenzita dopadající vlny, resp. odražené. Absorbovaná část energie I_a se dále rozdělí na složku přeměněnou na teplo I_q a transferovanou I_t (prošlá vlna). Vlastnosti stěny (nebo jiné plochy) z hlediska pohlcování zvuku jsou určeny **činitelem zvukové pohltivosti** α , který je definován jako poměr zvukové energie pohlcené stěnou W_{pohl} ku energii dopadající vlny W_{dopad} .

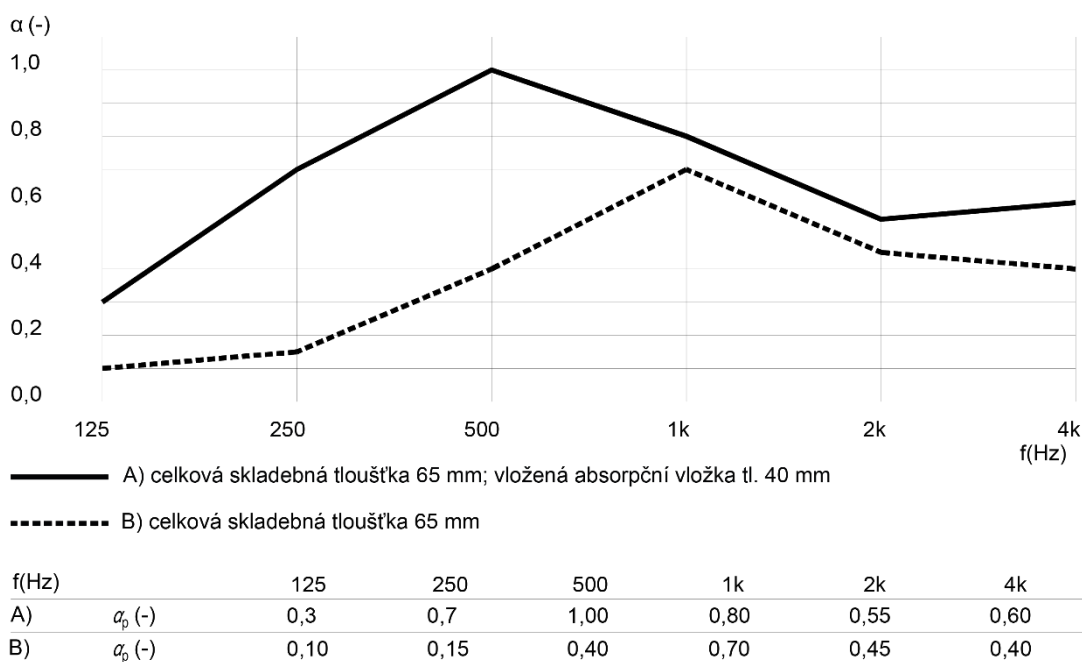
$$\alpha = \frac{W_{pohl}}{W_{dopad}} \quad [-] \quad (3)$$

Někdy se také uvádí definice pomocí výkonů místo energií. Z principu zachování energie jasně vidíme (celková energie systému je konstantní), že činitel nabývá hodnot v intervalu

od nuly do jedné, kdy $\alpha = 0$ odpovídá úplnému odrazu a $\alpha = 1$ představuje otevřené okno, tedy dokonalý absorbér, který neodráží žádnou energii zpět. Součin činitele pohltivosti α a dané plochy S je absorpce A . Je běžné, že v místnosti se vyskytují plochy s různým činitelem pohltivosti. Celková absorpce je pak dána jako součet absorpcí pro jednotlivé plochy.

$$A = \alpha \cdot S = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n \quad [\text{m}^2] \quad (4)$$

Činitel pohltivosti je frekvenčně závislý, a tato závislost se uvádí nejčastěji pro oktávové, ale také i třetinoctávové pásmo.



Obrázek 4: Příklad zobrazení závislosti činitele pohltivosti na frekvenci. Převzato z <https://www.glasio.cz/akustika/>

2.1.1 Pohlcování zvuku jako přeměna zvukové energie

Pro pochopení vlivu materiálu na celkovou akustiku prostoru je dobré uvést, jakým způsobem je energie v daném materiálu absorbována, resp. přeměněna. Přeměna zvukové energie na energii jinou při pohlcování zvuku je nevratná a při šíření v pevných látkách můžeme rozdělit přeměny podle zdrojů [1] na tři typy:

- a) **Přeměny vznikající třením (viskózní ztráty)** – k takovým přeměnám dochází při pohybu vzduchových částic podél určitého povrchu. Část energie zvuku se přemění na energii tepelnou v závislosti na velikosti plochy, na níž dochází ke tření. Pro co největší účinek přeměny je potřeba co největší plochy styku. K takovým ztrátám dochází především na stěnách otvorů, pórů apod. [1] Některé obklady mají

schopnost se při dopadu zvukové vlny rozkmitat. Energie se zde rozdělí na část, která se třením přemění na teplo a na část, která se díky kmitům přemění opět na akustickou energii. [1]

- b) **Přeměny vznikající poklesem akustického tlaku (relaxační ztráty)** – v místech, kde dochází vlivem šíření zvuku ke stlačení vzduchu, se zvyšuje celkový i akustický tlak. Tím pochopitelně naroste teplota a následně dojde k výměně tepla s kostrou konstrukce. Při snížení teploty poklesne tlak a v souvislosti s tím dochází k relaxaci akustického tlaku. Při snížení (relaxaci) akustického tlaku se zmenší nashromážděná potenciální energie a tím i zvuková energie. Relaxace může být způsobena také například vyrovnáním teplot vodivé kostry s okolím. [1]
- c) **Přeměny nepružnou deformací těles** – vznikají v látkách s tzv. pružnou hysterezí. To znamená, že při stlačení takové látky určitou silou se látka nevrátí zcela do původního stavu. Rozdíl mezi prací, která deformovala těleso a prací získanou pružností tělesa představuje úbytek zvukové energie. [1]

Z těchto principů vychází materiály a akustické prvky, které slouží především pro úpravu akustiky v místnosti. Kromě běžných materiálů, které se používají pro stavbu a vybavení místností a které mají minimální pohltivost, se v prostorové akustice setkáváme především s prvky, které mají značnou pohltivost v určitém pásmu. Pro takové prvky můžeme použít základní rozdělení:

- **Porézní materiály** – pevné látky obsahující mnoho dutinek vyplněné vzduchem (až 99 %). Takové materiály mají strukturu vláknitou, strukturu ztuhlé pěny [1] nebo partikulární (částice kameniva spojené lepidly či jinými pojivy). K pohlcování energie zde dochází přeměnou energie zvukové na tepelnou vzájemným třením vzduchových částic na rozhraní se stěnami dutin a vlivem viskózních sil. Typickým materiálem je např. minerální vlna nebo pěnové plastické hmoty.
- Prvky založené na rezonanci můžeme rozdělit na kmitající desky a membrány a Helmholtzovy rezonátory. **Kmitající membrány a desky** jsou tenké desky či fólie, které tvoří rezonanční soustavu a jejich tuhost v ohybu je nepatrná. Membrány jsou připevněné na pevnou konstrukci, ve které může být také umístěn například porézní materiál. Po dopadu zvukové vlny na membránu dojde k přeměně energie na mechanickou a membrána začne kmitat na vlastním rezonančním kmitočtu, dále je postupně tlumena a dochází k přeměně energie na tepelnou. **Helmholtzův rezonátor** je tvořen dutinou o určitém objemu. V této dutině slouží sloupec vzduchu jako píst. Při dopadu zvukové vlny dojde k jejímu mnohonásobnému odražení

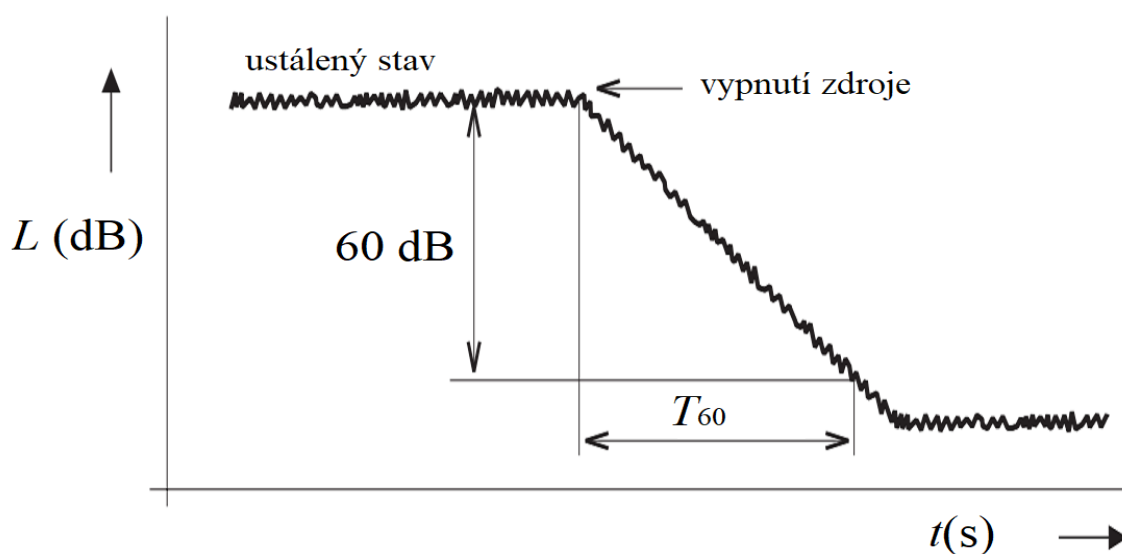
v dutině a dojde k útlumu a přeměně na tepelnou energii. [1] [19] V kombinaci s porézním materiálem dosáhneme rozšíření frekvenčního pásma pro absorpci.

- Rozptylové prvky (nebo **difuzory**) oproti předchozím prvkům neslouží prioritně k utlumení zvuku, ale k jeho rozptýlení. Stavba difuzoru umožňuje dopadající zvukovou vlnu „rozbít“ a odrazit ji rozptýleně zpět do prostoru v různých směrech díky členitosti povrchu. Díky tomu je možné vytvořit difúzní pole. I v tomto případě je možná kombinace s porézním materiálem.

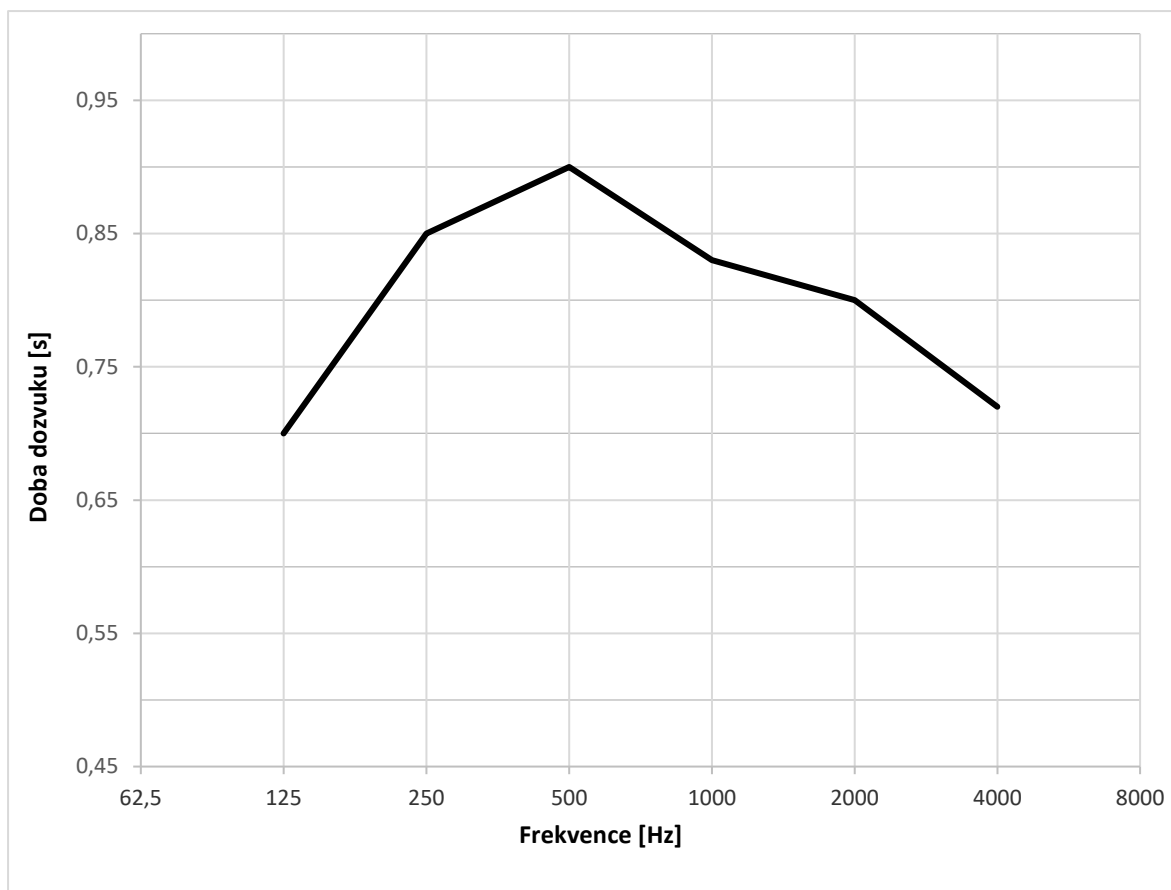
2.2 Dozvuk a doba dozvuku

Další parametr, který souvisí s pohltivostí, je **dozvuk**. Při ustáleném stavu je množství energie pohlcené stěnami doplňováno zdrojem zvuku. Po vypnutí zdroje začne zvuková energie odražených vln vlivem pohltivosti stěn a dalších ploch v místnosti postupně ubývat, dokud není pohlcena úplně. Zvuk, který se prostorem šíří po vypnutí zdroje do úplného pohlcení energie odražených vln, je právě dozvuk.

Klíčová pro posuzování akustické kvality místnosti je tzv. **doba dozvuku**, která je definována jako doba, za kterou v místnosti s ustáleným zvukovým polem klesne hladina intenzity zvuku po vypnutí zdroje o 60 dB. K poklesu dochází převážně díky útlumu překážek. Jelikož je činitel pohltivosti frekvenčně závislý, je i doba dozvuku závislá na kmitočtu. Nejčastěji se uvádí pro určité pásmo, např. pro 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz a 4000 Hz. Známe různé metody teoretického výpočtu doby dozvuku v závislosti na případě použití.



Obrázek 5: Definice doby dozvuku - 60 dB pokles (L – hladina intenzity zvuku, t – čas)
zdroj: http://acoust.feld.cvut.cz/files/uak_files/uloha6.pdf



Obrázek 6: Ilustrace závislosti doby dozvuku na frekvenci

2.2.1 Doba dozvuku – Sabinův vzorec

Americký fyzik Wallace C. Sabine, jenž byl průkopníkem prostorové akustiky, zkoumal vliv pohlcujících ploch na dozvuk v místnosti a následně zavedl předpoklad, že zvuková energie je stěnami obklopujícími uzavřený prostor pohlcována plynule, a tak byl pro výpočet doby dozvuku v dané místnosti postupně odvozen výraz

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad [\text{s}] \quad (5)$$

kde V celkový objem místnosti [m^3]

S celkový obsah všech ploch [m^2]

α střední činitel pohltivosti [-]

V případě, kdy v místnosti jsou plochy s různým činitelem pohltivosti se střední činitel vypočte jako

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S} \quad [-] \quad (6)$$

kde $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ činitel zvukové pohltivosti různých stěn [-]
 $S_1, S_2 \dots S_n$ plochy stěn s odlišným činitelem pohltivosti [m²]
 S celková plocha stěn v místnosti. [m²].

Sabinův vzorec je bezesporu základem při objektivním posuzování akustiky prostoru. Tento vztah má však své limitace. Platí totiž především pro menší hodnoty činitele α . [1] Navíc je zřejmý problém při extrémních hodnotách. Pro $\alpha = 1$ (dokonale pohltivé stěny nebo „otevřené okno“) by se měla doba dozvuku rovnat nule, což by podle tohoto vzorce nenastalo. (Obdobně je to pro $\alpha = 0$. V tomto případě by dle tohoto vztahu se doba dozvuku měla rovnat nekonečnu, to však není vzhledem ke ztrátám při šíření možné).

2.2.2 Doba dozvuku – Eyringův vzorec

Předpoklad plynulého pohlcování zvukové energie stěnami se tedy ukázal pro vyšší hodnoty činitele pohltivosti jako nevyhovující. Americký fyzik Carl F. Eyring uvažoval, že se dopadající zvukový paprsek zeslabuje skokově. [1] Při odvození teoretického výpočtu tak odstranil nedostatek Sabinova vzorce. Pro dobu dozvuku tak platí

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad [s] \quad (7)$$

kde V objem místnosti [m³]
 α střední hodnota činitele pohltivosti [-]
 S celkový obsah všech ploch s různými materiály [m²].

2.2.3 Doba dozvuku – Millingtonův vzorec

Přestože Eyringův vzorec do jisté míry řeší nedokonalosti Sabinova vzorce, ukazuje se v praxi, že není dostačující v případech, kdy činitel pohltivosti dosahuje hodnot větších než 0,8. Přesnější je Millingtonův vzorec, který v sobě zahrnuje předpoklad různých ploch o rozdílném činiteli absorpce. Tento vztah je ale výpočetně mnohem náročnější. [1] [13]

$$T_M = 0,164 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad [s] \quad (8)$$

kde V objem místnosti [m³]
 α_i činitel pohltivosti jednotlivé plochy [-]
 S_i obsah ploch s příslušným činitelem pohltivosti α_i [m²].

2.2.4 Vliv prostředí na dobu dozvuku

Doba dozvuku je ale závislá i na prostředí, jimž se zvuk šíří. Především v místnostech s velkým objemem je nutné uvažovat ztráty při šíření prostředím. Pro útlum prostředím se do všech zmíněných vzorců pro dobu dozvuku přidává do jmenovatele korekční člen $4mV$. [1][13] Činitel útlumu m závisí na relativní vlhkosti, teplotě a kmitočtu. [10] Vzorce včetně korekce tedy vypadají takto:

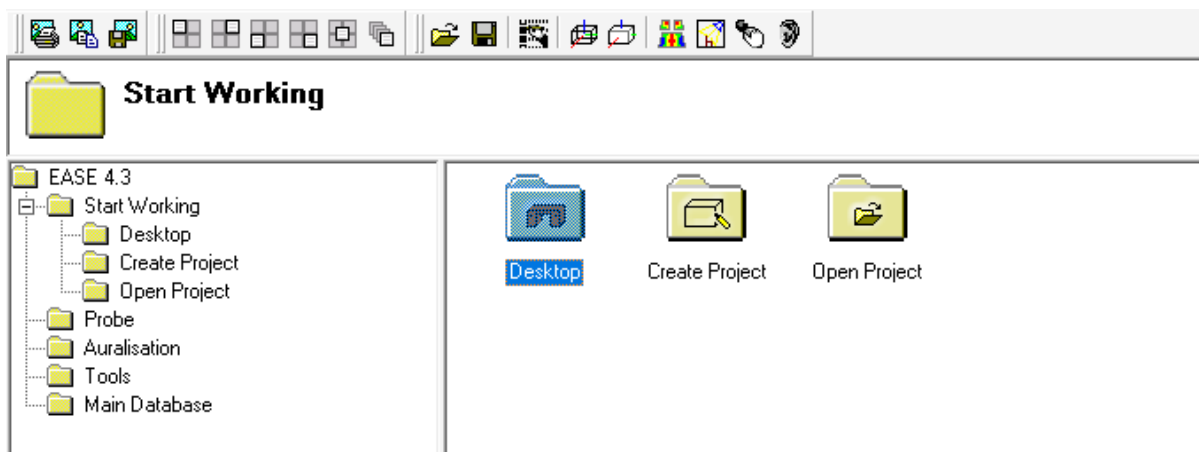
$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S + 4mV} \quad [\text{s}] \quad (9)$$

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha) + 4mV} \quad [\text{s}] \quad (10)$$

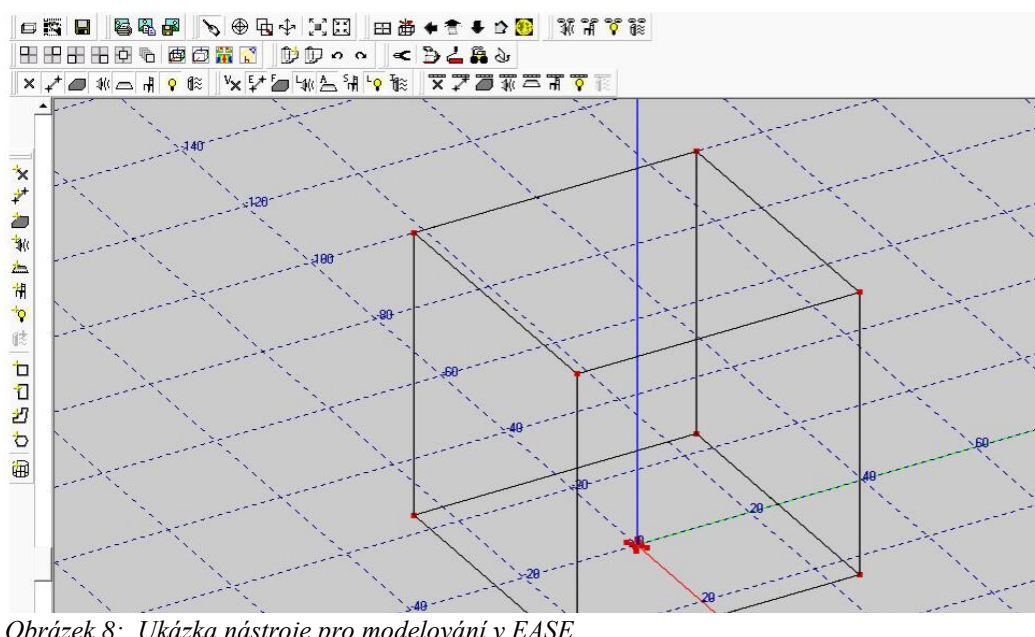
$$T_M = 0,164 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad [\text{s}] \quad (11)$$

3 Modelování pomocí EASE

Pro modelování místnosti a simulaci akustických parametrů v ní byl dle zadání této práce použit software EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) vyvinutý německou společností Ahnert Feistel Media Group. EASE obsahuje mnoho nástrojů a možností pro elektro-akustické modelování a simulace v prostorové akustice od modelování místnosti ve vlastním editoru, přes výpočty akustického pole v ní, po 3D zobrazení navržené místnosti. V dnešní době je tento program prakticky standardem pro firmy zabývající se elektro-akustickým modelováním a simulacemi v prostorové akustice. V následující části bude stručně popsán EASE modul pro modelování a simulaci akustiky v daném modelu.



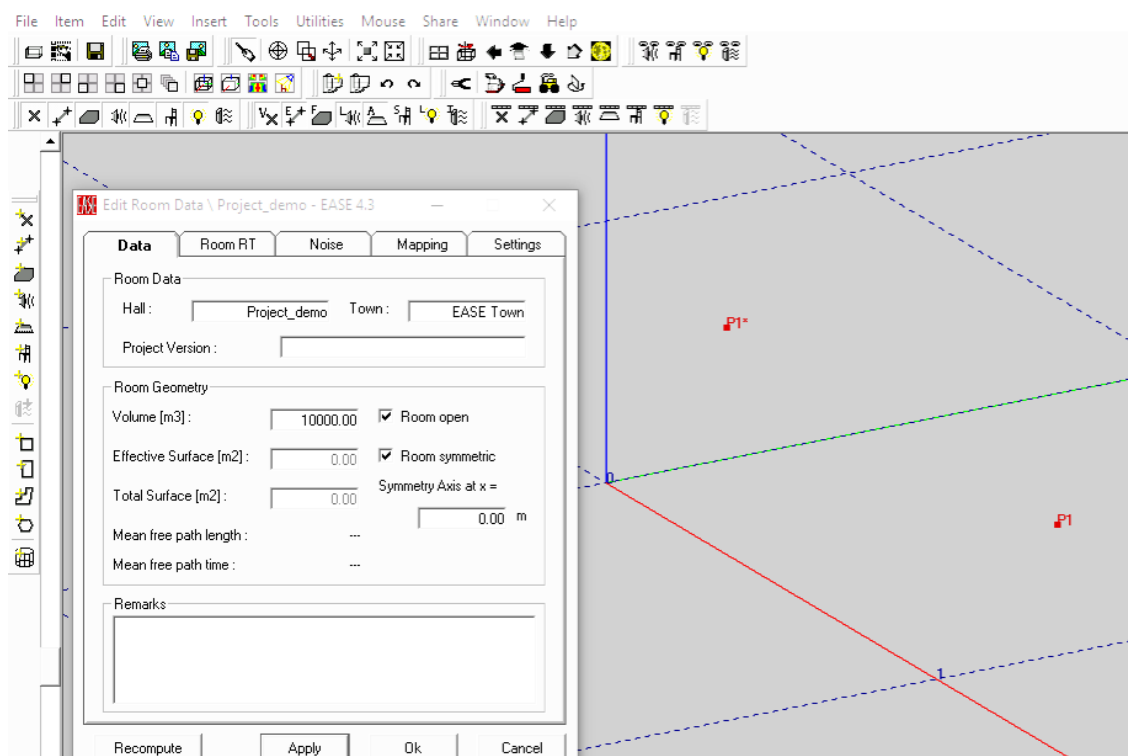
Obrázek 7: EASE – Hlavní pracovní plocha



Obrázek 8: Ukázka nástroje pro modelování v EASE

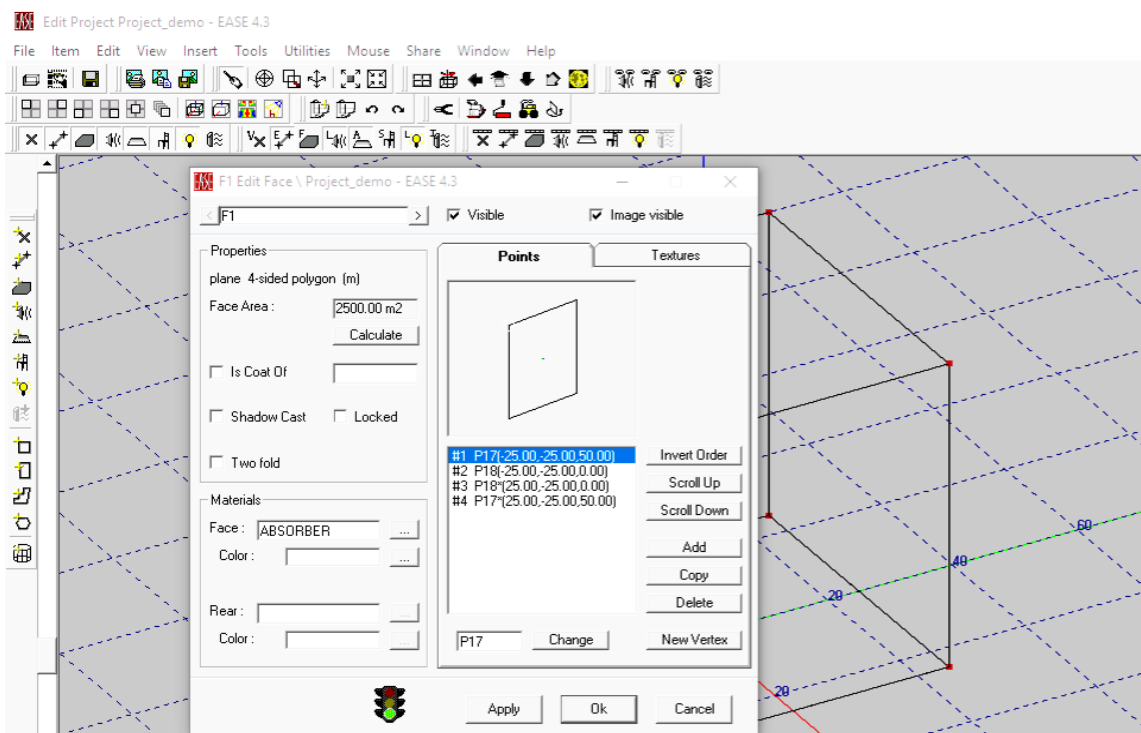
Před samotným modelováním je nutné správně nastavit metrické jednotky. To provedeme v menu *File/Options/Settings –Used Unit – metric*. Modul pro vytváření modelu zapneme např. pomocí *Room Edit/ Modify Data*. Tím se otevře okno s editorem, kde vidíme souřadnicovou síť, ve které budeme modelovat, a různé ikony odpovídající konkrétním nástrojům editoru.

V EASE se model sestavuje pomocí vrcholů (*Vertex*), hran (*Edge*) a stěn (*Face*). Pro tyto prvky najdeme příslušné ikony (první tři v postranním panelu) nebo můžeme využít zkratk (klávesa “v” pro vertex, “e” pro edge, “f” pro face). Po vložení vrcholu na libovolné místo se objeví okno s možností zadat souřadnice daného vrcholu. Další vrcholy lze vložit podobně pomocí zadání konkrétní souřadnice, nebo využít možnosti *Duplicate* (pravý klik na označený vertex), kde zadáváme, do jaké vzdálenosti (ve všech osách) od původního vrcholu chceme vložit nový. Podobně je možné použít funkci *Displace*, která daný vrchol pouze přemístí, ale nevytvoří se nový. Je ale důležité počítat s tím, že v EASE je implicitně nastavená symetrie místnosti, to znamená, že každý vytvořený prvek bude duplikován symetricky dle některé z os. Tato funkce může ovšem být nápomocná v případě, že modelujeme skutečně symetrickou místnost. V takové chvíli se dá ušetřit mnoho času. V případě, že tuto funkci nechceme využívat, je možné ji vypnout v nastavení místnosti (položka *Edit/Room data*) v kolonce *Room symmetric*



Obrázek 9: Nastavení místnosti (EASE)

Pro vytvoření stěny je nutné spojit všechny vrcholy (body) které ji definují. Zde také záleží na pořadí, resp. na směru výběru vrcholů, zda po nebo proti směru hodinových ručiček. To určí orientaci stěny, jestli je to vnitřní nebo vnější strana, orientaci stěny, resp. pořadí bodů, lze však kdykoli invertovat. I tentokrát se po vytvoření objeví okno s informací a vlastnostmi stěny včetně nastavení parametrů. Po vložení vrcholů a jejich spojení do stěn máme základ místnosti. Kromě manuálního vytváření stěn je možné použít nástroje pro geometrické tvary jako je čtverec, kvádr, polygon nebo i 3D tělesa či funkci *Extrude*, pomocí které můžeme stěnu použít jako základnu pro 3D těleso. Ve chvíli, kdy máme hrubý tvar místnosti, pokračujeme s okny a dveřmi. Vytváříme je stejně jako stěny, kdy vkládáme vrcholy přímo na rovinu stěny (pro ulehčení je možné na stěnu, kde chceme vytvořit novou plochu, použít funkci *Vertex On Face* resp. *Vertex on Face Margin*, která vloží nový vertex na danou stěnu resp. na její hranu), s tím, že je nutné následně buď předefinovat vrcholy stěny, aby nedocházelo ke konfliktu při vyhodnocení (tedy aby stěna neobsahovala plochu dveří), nebo je nutné použít nastavení “*Coat of*” a “*Two-fold*” ve vlastnostech plochy. Pro představu můžeme tyto dvě funkce chápat tak, že plochu okna či dveří nanese na stěnu jako další vrstvu, s tím, že vrstva se odsune od stěny na velmi malou nenulovou vzdálenost, což je nutné mj. pro korektní výpočty a zároveň aby tato mezera nebyla považována jako tzv. “hole”, tedy díra. Funkce “*Two-fold*” se navíc použije pro jakékoli bariéry v místnosti, tím se totiž definuje rubová i lícová strana předmětu nebo stěny k tomu, aby byly zahrnuty v simulaci.

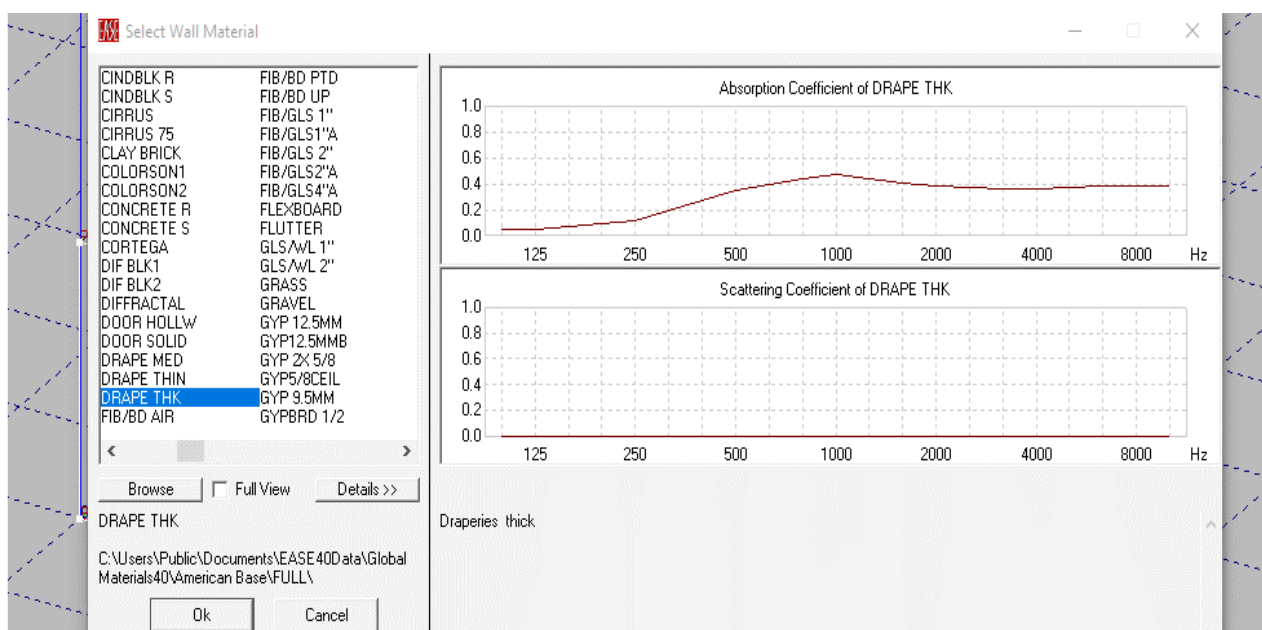


Obrázek 10: Nastavení stěny v EASE

Kulaté tvary, pro modelování např. půdorysu amfiteátru a podobných staveb, můžeme vytvořit pomocí funkce *Insert Circular Array/Vertices*, která vloží požadovaný počet vrcholů uspořádaných do oblouku. Další postup pro vytvoření stěny je stejný jako výše popsany.

Máme-li hotovou místnost a domníváme-li se, že je každá zeď správně naorientována, je nutné před dalšími kroky a pro umožnění výpočtů místnost „uzavřít“. To provedeme odškrtnutím políčka „Room Open“ nastavení místnosti (položka *Edit/Room data*). Stiskneme-li tlačítko „Recompute“, měl by program spočítat objem a efektivní plochu místnosti (položky „Volume a Effective surface“). Následně model zkontrolujeme pomocí funkce *Check Data* nebo *Check Holes*, která ověří, že model je správně zkonstruován a nikde není díra, nesprávně orientovaná plocha nebo špatné přiřazení vrcholů ke stěně. V případě, že je vše v pořádku, zbývá už jen uložit model. Pokud se ale nějaká díra vyskytne, můžeme se pokusit o její nalezení manuálně (což může být náročné, protože to nemusí být okem viditelná vada, ale např. dvě sousední stěny mají přiřazené různé vrcholy, které jsou těsně na sobě, nebo taky špatná orientace jedné stěny), nebo můžeme použít funkci *Check Holes/Close Holes* pro nalezení a případnou opravu chyb, jenže není pravidlem, že tato funkce vždy vše opraví a pokud ano, může oprava vnést do modelu nežádanou modifikaci či další chyby.

Po vytvoření modelu místnosti, je nutné přiřadit každé ploše materiál a tím i příslušnou absorpci. EASE obsahuje poměrně velkou databázi základních materiálů s údaji o činiteli pohltivosti, která se kdykoli může doplnit dalšími databázemi.



Obrázek 11: Ukázka výběru materiálu v EASE

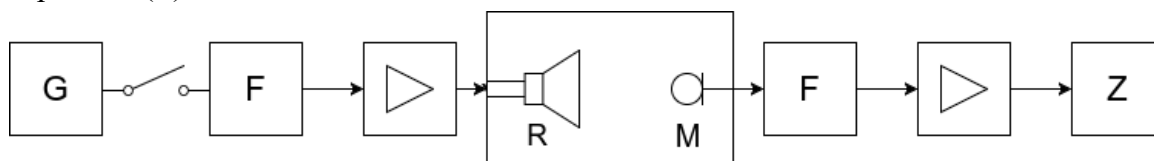
Navíc má modul materiálových databází možnost vytvořit vlastní materiál, kdy zadáme koeficienty pohltivosti pro příslušné frekvence. Menší vadou může být skutečnost, že je nutné zadávat kmitočtovou závislost pohltivosti v třetinooktávové stupnici, tedy pro více frekvencí, než se běžně uvádí (zpravidla oktávová stupnice). V nastavení stěny nalezneme položku “*Materials*” a po rozkliknutí položky přejdeme do okna materiálů (nebo je možné v nabídce dané stěny použít funkci *Change wall material* případně příslušnou zkratku *F2*). Materiály je však nutné načíst z databáze “*Global Materials40*” ve složce programu, případně z jiné složky, kde jsou uloženy vlastní vytvořené materiály. Po načtení databáze vybereme požadovaný materiál a potvrdíme pro přiřazení materiálu ke stěně. Toto je nutné udělat pro každou stěnu (zdi, okna, dveře atd.), abychom dosáhli co nejpřesnějších výpočtů. Ve stejném okně můžeme také vybrat obarvení dané stěny. Po vytvoření modelu a jeho zkontrolování nezbyvá než ho uložit. O výpočtech potřebných parametrů včetně dalších modulech EASE bude zmíněno dále v praktické části.

4 Praktická část

Tato práce spočívá nejen v modelování a simulaci, ale také v provedení akustických měření ve vybraných místnostech. Pro porovnání výsledků simulace a akustiky místnosti byla pro tuto práci jako parametr zvolena doba dozvuku, jenž je klíčovým a v mnoha případech dostačujícím objektivním kvalitativním parametrem určující akustické vlastnosti a ovlivňující kvalitu poslechu. Dílčím cílem bylo tedy získat dobu dozvuku v určených místnostech. To je možné pomocí impulsní odezvy daného prostoru.

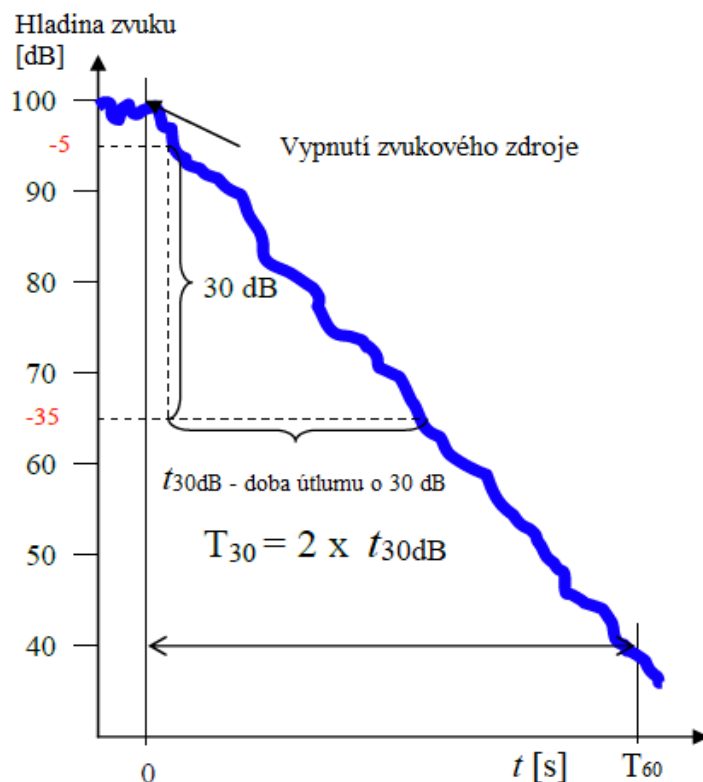
4.1 Měření doby dozvuku

Řetězec pro měření se skládá na vysílací straně z generátoru šumivého signálu (G), oktávového (třetinooktávového) filtru (F), zesilovače reproduktoru (R) s všesměrovou charakteristikou vyzařování. Na přijímací straně je zapojen mikrofon s všesměrovou charakteristikou (M), oktávový nebo třetinooktávový filtr (F), zesilovač a hladinový zapisovač (Z). [1]



Obrázek 12: Blokové schéma zapojení standardní metody měření doby dozvuku

Zdroj musí vyzařovat takovým akustickým výkonem, aby hladina akustického tlaku měla alespoň 40 dB odstup od hladiny hluku v pozadí [1] (zdroje [7], [9] připouští menší i větší minimální hladiny pro různé případy). K vybuzení se používá šumový či modulovaný sinusový signál. Po vypnutí zdroje se zaznamenává pokles hladiny akustického tlaku. Doba dozvuku pak určíme dle definice o poklesu – 60 dB. Měření by se mělo provádět pro více poloh snímacího mikrofonu, ideálně v typických polohách zdrojů např. řečník). V dnešní době se místo magnetických a jiných zapisovačů používá počítač s vhodným zvukovým rozhraním a příslušným softwarem. V praxi je ale velice náročné dosáhnout poklesu o 60 dB, resp. místnost vybudit pro dostatečný odstup signálu od šumu, proto se určují alternativní vyjádření doby dozvuku, kromě T_{60} také T_{10} , T_{20} , T_{30} nebo EDT (early decay time), kdy např T_{30} je doba dozvuku přepočítána z doby, za kterou bude pokles o 30 dB (uvádí se pokles z -5 dB na -35 dB) Δt_{30dB} tak, že $T_{30} = 2\Delta t_{30dB}$ (podobně $T_{20} = 3\Delta t_{20dB}$ pro pokles -5 dB až -25 dB). Analogicky to platí i pro T_{10} . Hodnota EDT je přepočten z poklesu o 10 dB od ustáleného stavu (vypnutí zdroje) a přesněji odpovídá fyziologickému subjektivnímu vnímání než zbylé. [1] [13][17][7]



Obrázek 13: Znárodnění přepočtů doby dozvuku (T_{30}) <https://www.acousticbulletin.com/room-acoustic-descriptors-rt-c50-and-gain>

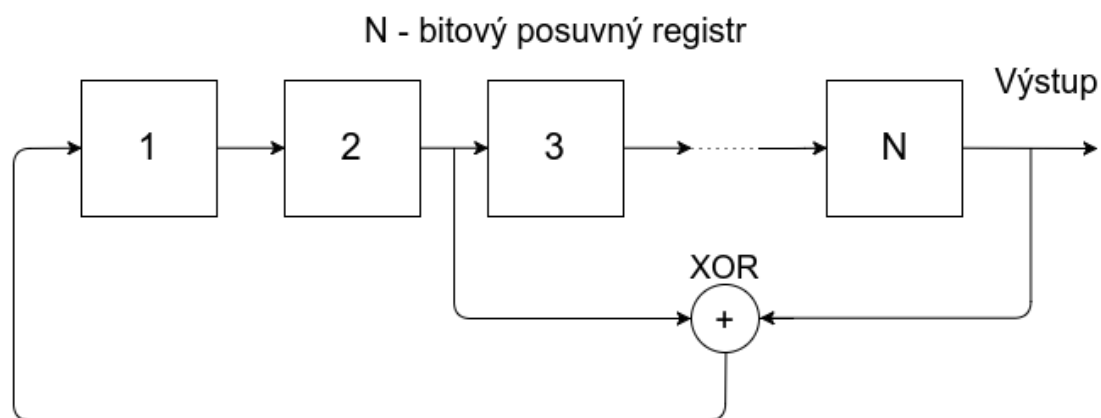
4.1.1 Metoda MLS

Analýza akustických vlastností prostor pomocí klasické impulzní metody, kdy vybudíme místnost impulsem podobným Diracovu impulsu a zaznamenáme odezvu, je v praxi nepoužitelná, neboť impulsní odezva prakticky zanikne v hluku pozadí. V dnešní době se pro zjištění impulzní odezvy (díky zvýšení výkonu výpočetní techniky) používá metoda, která tento nedostatek kompenzuje. Metoda zvaná **MLS – Maximum-Length Sequences** spočívá v generování pseudonáhodné 2-úrovňové posloupnosti. Taková posloupnost má podobné vlastnosti jako šum, a tedy ploché frekvenční spektrum a konstantní spektrální výkonovou hustotu (kromě malé stejnosměrné složky). Velkou výhodou použití MLS posloupností je velká šumová imunita měření. Perioda MLS signálu je určena jako

$$L = 2N - 1 \quad (12)$$

kde N je celé číslo (pro měření akustických vlastností N do 16). Taková posloupnost je generována pomocí řady posuvných registrů se zpětnou vazbou. Aby se posloupnost nezačala opakovat v cyklu kratším, než je maximální délka, je nezbytné dodržet vhodné umístění zpětných vazeb registru dané tabulkou zpětných vazeb, tedy jaké bity budou

zavedeny jako zpětnovazební. Pro správnou funkci je nutné na začátku nastavit všechny bity na „log 1“ abychom předešli tzv. „zakázanému stavu“, kdy všechny registry budou v hodnotě „log 0“ a generátor nezačne pracovat.



Obrázek 14: Blokové schéma generátoru MLS signálu

Pro samotné použití těchto signálů je nezbytné binární signál převést na analogový symetrický 2 – úrovnňový signál, kdy binárnímu stavu „1“ bude přiřazena analogová úroveň „- 1V“ a stavu „0“ úroveň „+1V“. Po aplikaci tohoto signálu bude námi zaznamenaný signál obsahovat jak původní signál, tak i impulsní odezvu dané místnosti. Závislost výstupního signálu můžeme vyjádřit jako konvoluci vstupního signálu $x[n]$ s impulsní odezvou $h[n]$

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n - k] \quad (13)$$

kdy signál impulsní odezvy získáme vzájemnou korelační funkcí vstupního MLS signálu a jeho odezvy na výstupu (případně můžeme výpočty provádět v kmitočtové doméně, kdy spektra jednotlivých signálů mezi sebou násobíme či dělíme). [11]

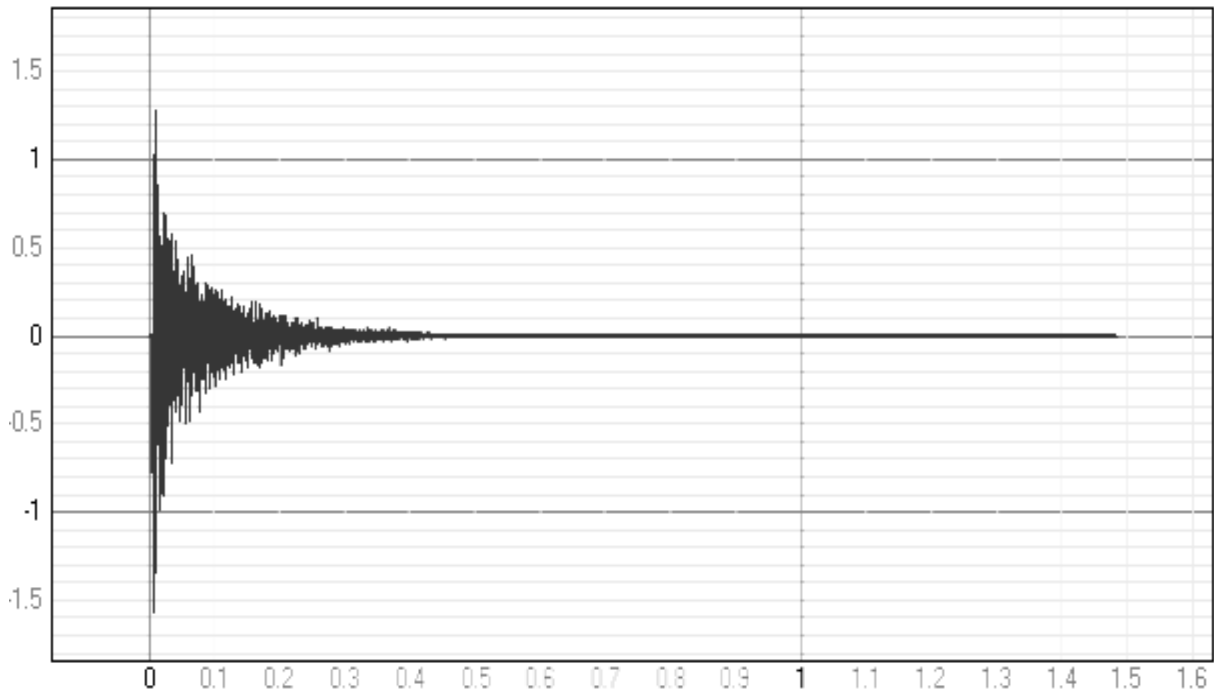
4.1.2 Určení doby dozvuku z impulsní odezvy

Doba dozvuku se často určuje nepřímou z impulsní odezvy, získané například metodou MLS, pomocí Schroederovy metody zpětné integrované impulsové odezvy. Jedná se o vyjádření vztahu mezi průměrným poklesem energie $E(t)$ příslušnou impulsovou odezvou $p(t)$

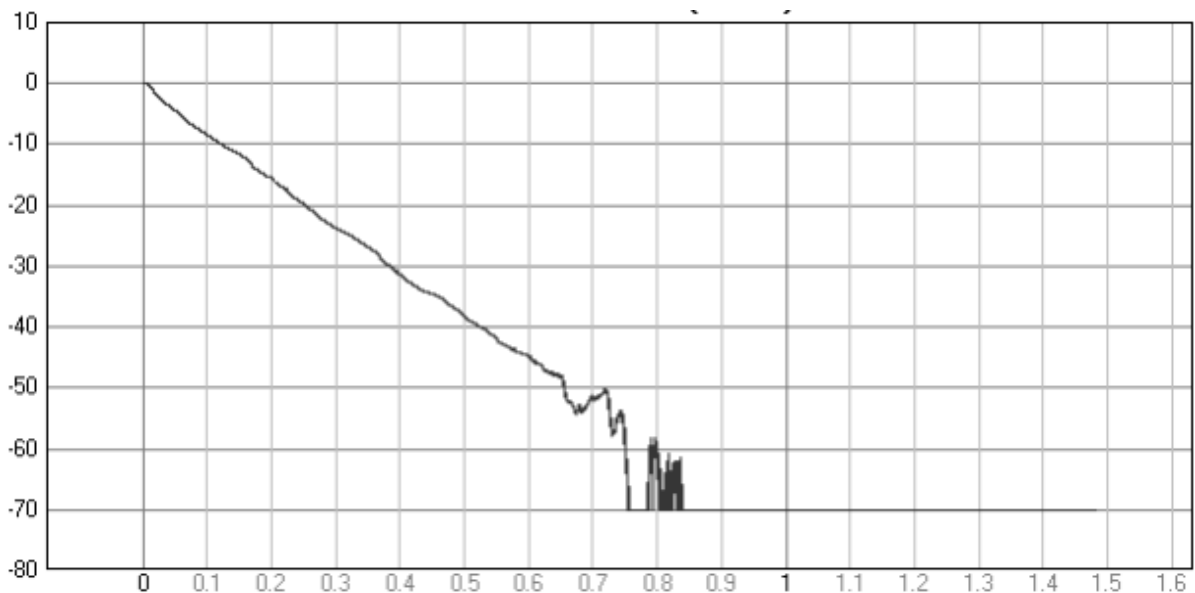
$$E(t) \sim \int_t^{\infty} p^2(x) dx = \int_0^{\infty} p^2(x) dx - \int_0^t p^2(x) dx \quad (14)$$

kde E je energie křivky poklesu jako funkce času
 p akustický tlak impulsové odezvy jako funkce času
 t čas.

Ze vzniklého časového průběhu doznívání následně získáme dobu dozvuku, často místo T_{60} se určí T_{30} či T_{10} (případně EDT). V následujících ilustracích je znázorněn příklad impulsní odezvy a vyjádření dozvuku pomocí Schroederovy křivky poklesu.



Obrázek 15: Příklad impulsní odezvy horizontální osa – čas v sekundách, vertikální osa – amplituda tlaku v Pascalech) [převzato z programu EASERA]



Obrázek 16: Dozvukový pokles – Schroederova křivka z impulsní odezvy z obr. 40 (horizontální osa – čas v sekundách, vertikální osa – normovaná hladina zvuku v decibelech kdy 0 dB je maximum). Zde je vidět, že z dané křivky by bylo složité určit T_{60} , doba dozvuku T_{10} , T_{20} a T_{30} se ale dá určit poměrně přesně [převzato z programu EASERA]

4.1.3 Realizace měření

Samotné měření vychází z výše zmíněné standardní metody a bylo provedeno za pomoci profesionálního software EASERA (Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis), který je určen pro veškerá akustická měření, včetně nezbytné impulsní odezvy. EASERA v sobě zahrnuje všechny nezbytné prvky od generátoru (v tomto případě šumového MLS) signálu, po samotné vyhodnocení, analýzu a výpočet potřebných parametrů. V tomto případě měřicí řetězec byl následující: PC se zmíněným programem a zvukovou kartou, obsluhující výstupní i vstupní signály, audio zesilovač *SONY TA-FB920R* s připojeným reproduktorem *SinusLive* a všesměrový měřicí mikrofón *Brüel & Kjær 2671* napájený zesilovačem *Brüel & Kjær 2525*.

4.2 Místnosti vybrané pro modelování a měření

Pro účely této práce byly zvoleny dvě reálné místnosti na Fakultě elektrotechnické ČVUT v kampusu v Dejvicích: učebna 554 na katedře radioelektroniky a posluchárna D3 - 309. Jelikož je první ze zmíněných svou povahou a konstrukcí jednodušší, byla v rané fázi této diplomové práce vybrána jako předloha pro první model. Úkolem bylo seznámit se s modelovacím softwarem EASE, poznat jeho funkce a moduly a dále jej dostatečně ovládat pro následné modelování a simulace.

4.2.1 Učebna 554

Pro první srovnání modelu a reálné místnosti byla vybrána učebna 554. Je to klasická místnost typu “krabice od bot”, neobsahuje žádné přídavné akustické prvky, stěny jsou holé, podlaha je pokryta linoleem. V jedné ze stěn jsou vsazena velká okna (2x s rozměry 445x195 (v cm)). Učebna již je vybavena nábytkem i elektronikou, a tak nelze přesně určit dobu dozvuku prázdné místnosti, i proto se dá očekávat rozdíl mezi teoretickou dobou dozvuku a reálnou. Rozměry učebny jsou 995 x 540 x 330 (cm). Místnost nyní slouží jako běžná učebna pro účely přednášek, cvičení a laboratoří pro zhruba 25 osob.

Přestože se model dá vytvořit od základu přímo v modelovacím modulu EASE (Project data), byl základní hrubý model učebny mj. pro vizualizaci sestaven pomocí software **SketchUp** od společnosti Trimble. EASE totiž zahrnuje v sobě modul „Import/Export“, který umožňuje import modelů uložených ve formátu některých modelovacích programů jako např. AutoCAD (a některé jeho alternativy) nebo právě

SketchUp. SketchUp je modelovací program používaný jak pro architektonické návrhy, tak pro design interiéru či vytváření 3D modelů. Výhodou je, že je poměrně intuitivní, takže při prvním používání lze rychle pochopit jeho funkce. Stavění modelu ve SketchUp je také oproti EASE při složitějších tvarech místností mnohem pohodlnější a přehlednější. Navíc hned vidíme 3D pohled modelu, oproti EASE, kde při stavbě vidíme pouze hrany a vrcholy v souřadnicové síti, což při větším množství linek může působit poněkud nepřehledně. Dále můžeme přímo ve SketchUp hned přiřadit každé ploše vlastní materiál včetně barvy či textury a při správném nastavení a sestavení modelu je možné při importu do EASE přiřadit daným materiálům příslušný materiál z databáze v EASE, což může silně usnadnit importování a následnou práci, jelikož je manuální přiřazování materiálů v EASE při větším počtu jednotlivých ploch časově náročné. Obzvlášť při optimalizaci či změnách v modelu je při každém novém importu nutno každý krok opakovat a optimalizace modelu je pak časově neefektivní. Při importu také může nastat nesprávným nastavením špatné přiřazení měřítka, resp. jednotek délky, kdy např. místo centimetrů, ve kterých byl vytvořen model, budou v EASE použity metry, to nám razantně změní výsledky, ale příčina nemusí být na první pohled zřejmá. Proto je dobré věnovat při importování pozornost i detailům nastavení. Přes všechna úskalí však může modelování ve SketchUp být výhodným začátkem pro další simulaci.

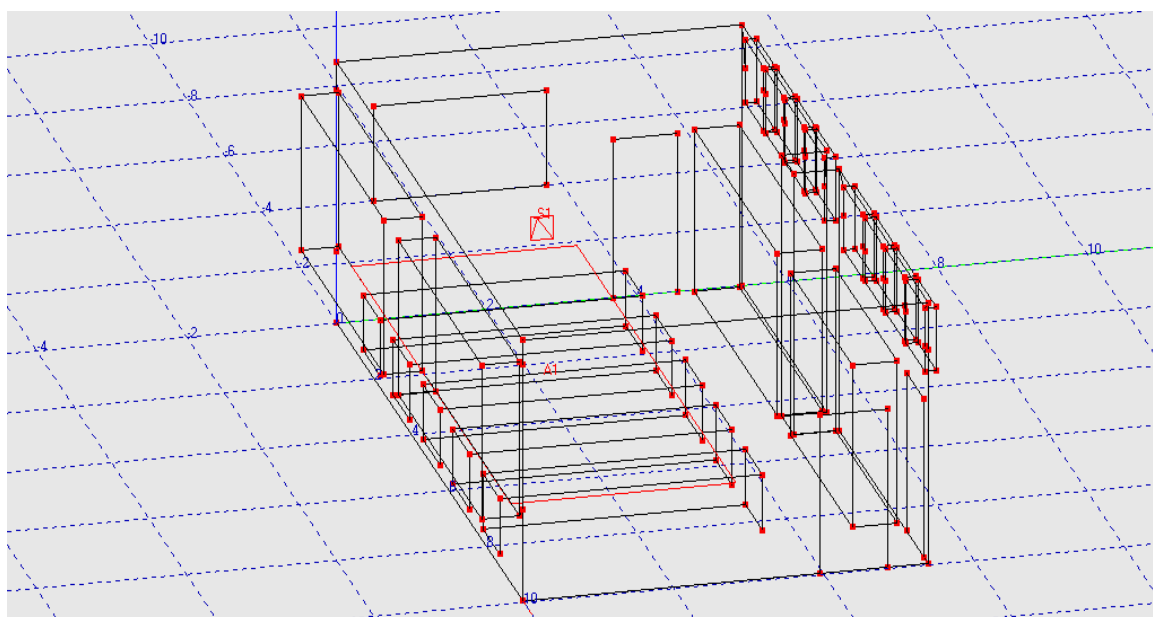


Obrázek 17: Místnost 554 – pohled zezadu

Základní model učebny byl tedy vytvořen ve SketchUp a následně upraven v EASE. Nakonec byl zjednodušeně namodelován i nábytek pro zlepšení přesnosti modelové doby dozvuku. Nutno také zmínit, že veškeré materiály (např. dřevo, sklo nebo linoleum), resp. jejich absorpční koeficienty byly vybrány z EASE databáze tak, aby co nejvíce odpovídaly reálným materiálům v místnosti, v případě, že nebyl nalezen přesně odpovídající materiál, zvolil se alternativní s podobnou charakteristikou s ohledem na pohltivost. Lze tedy předpokládat, že i to může při výpočtu doby dozvuku v modelu vnést nepřesnost. Náhled 3D zobrazení je na následujícím obrázku.

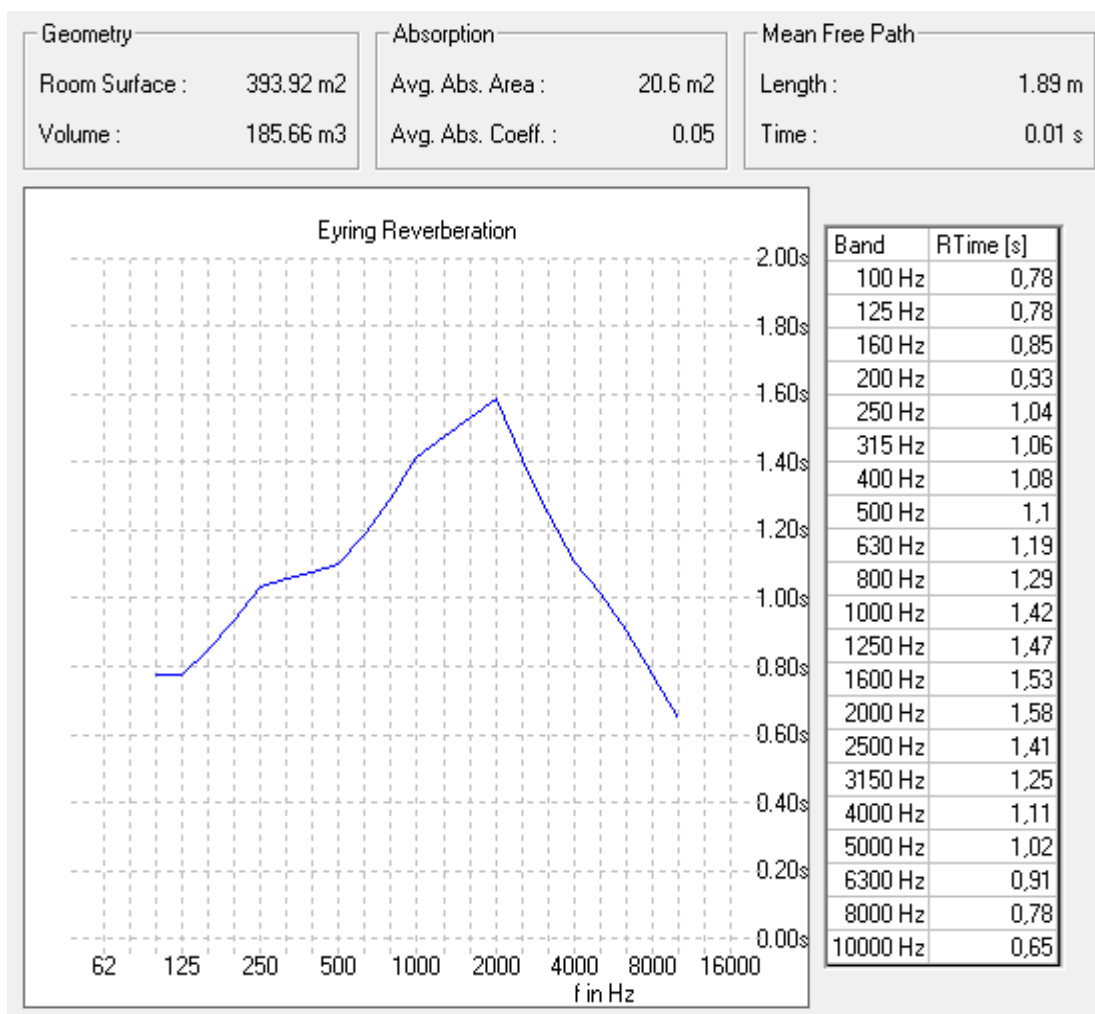


Obrázek 18: Ilustrace modelu místnosti 554 v software SketchUp



Obrázek 19: Upravený model učebny 554 v software EASE

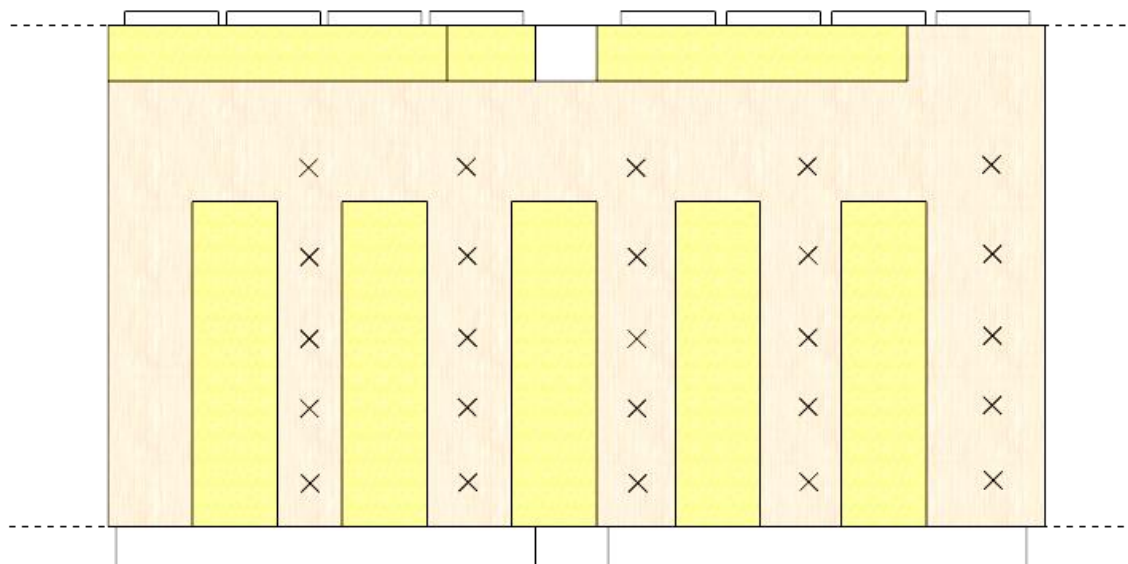
Po úspěšném vytvoření modelu můžeme pro místnost zjistit dobu dozvuku, jejíž hodnoty v závislosti na frekvenci lze zobrazit pomocí *View/ Room RT*. Zde vidíme graf i tabulku s hodnotami na daných frekvencích. V nastavení *Room Data/Room RT* můžeme nastavit parametry jako vlhkost vzduchu, teplota, ale i metodu, podle které se doba dozvuku vyhodnotí, zda Sabineho nebo Eyringa. Doba dozvuku tohoto modelu znázorňuje obrázek 20



Obrázek 20: Doba dozvuku v EASE

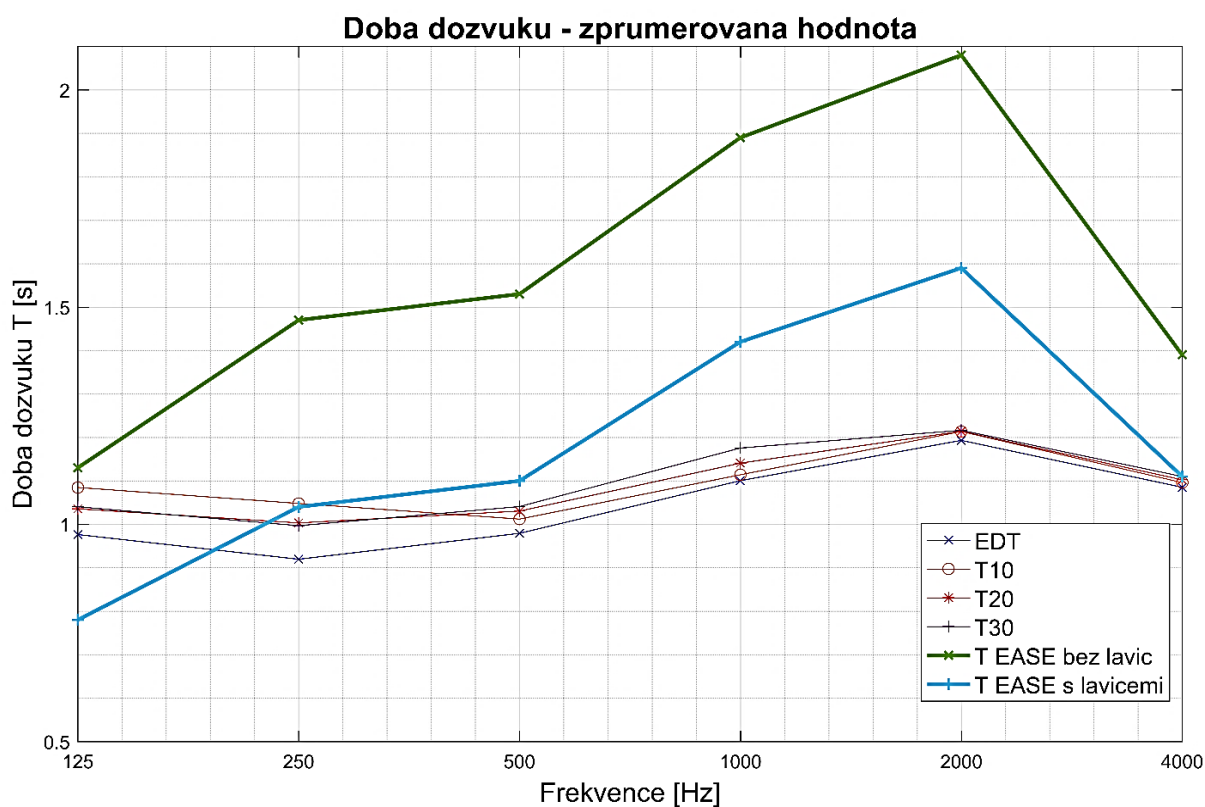
Pro srovnání s reálnou místností bylo provedeno měření (kap. 4.1.3) a díky programu EASERA i poměrně lehce získána doba dozvuku. Jelikož je tato místnost používána hlavně jako běžná učebna pro výuku, lze předpokládat, že zdroj zvuku (přednášející, cvičící) se bude pohybovat především před katedrou u přední stěny s tabulí, proto byl zdroj postaven na toto místo ve výšce 170 cm. Pro tuto učebnu bylo zvoleno více pozicí mikrofону pro měření (25 pozicí byly vybrány vzhledem k místům sezení posluchačů). Výsledky z každého měření pak byly zprůměrovány pro celkovou hodnotu doby dozvuku. Každé měření bylo z EASE uloženo mj. do textového souboru (tabulka

doby dozvuku). Data ze všech souborů pak byla následně zpracována pomocí jednoduchého skriptu vytvořeného v prostředí MATLAB. Skript data načte, vybere potřebné hodnoty, zprůměruje je a výsledek společně s hodnotami doby dozvuku z modelu vykreslí do grafu. Skript pak zaznamená a uloží hodnoty do tabulky EXCEL souboru *-.xls*. Plný kód skriptu je k nahlédnutí v příloze A.



Obrázek 21: Vybrané body pro měření impulsové odezvy

Výsledné zprůměrované hodnoty doby dozvuku pro učebnu 554 znázorňuje následující graf a tabulka



Obrázek 22: Srovnání doby dozvuku pro měření a simulaci v modelu (MATLAB)

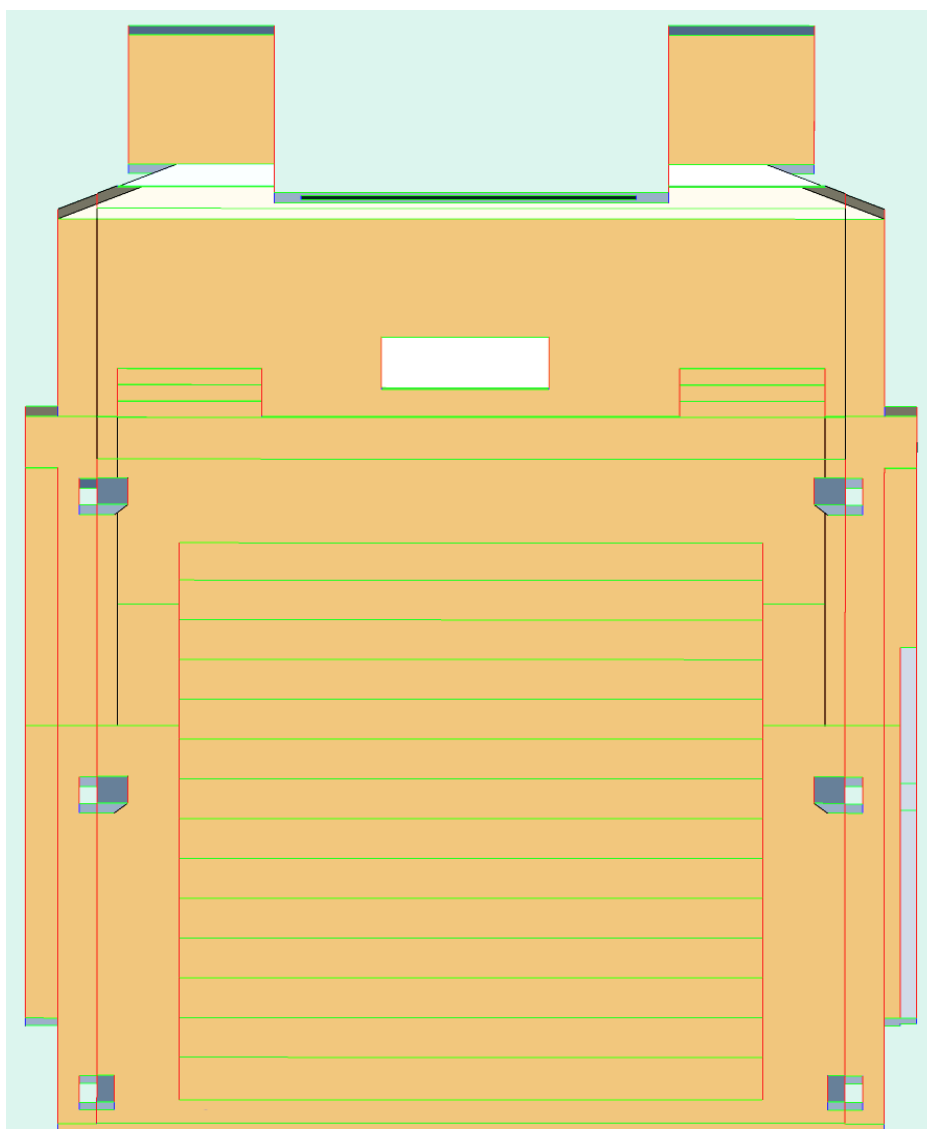
Tabulka 1: Výsledné zprůměrované naměřené hodnoty doby dozvuku a hodnota simulace

EDT [s]	0,98	0,92	0,98	1,10	1,19	1,09
T₁₀ [s]	1,08	1,05	1,01	1,11	1,21	1,10
T₂₀ [s]	1,04	1,00	1,03	1,14	1,21	1,10
T₃₀ [s]	1,04	1,00	1,04	1,18	1,22	1,11
T_model [s]	0,78	1,04	1,10	1,42	1,59	1,11
frekvence f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000

Na první pohled se, (především z grafu) zdá, že doba dozvuku v modelu se silně liší od reálné. Podíváme-li se na konkrétní hodnoty, nejsou ale rozdíly v tomto případě tak markantní. V případě, že jsou v modelu zahrnuty i lavice, výsledek se velmi blíží realitě, kdy největší rozdíl (téměř 0,4 s) pozorujeme v pásmu 2000 Hz. To s ohledem na řečové pásmo může představovat mírný problém, přesto je ale dobré připomenout, že model není sestaven dokonale a není v něm zakomponováno vše co v reálné místnosti je, například další nábytek jako židle, které v součtu mohou představovat značnou plochu, navíc poměrně nemalou mírou ovlivní dobu dozvuku i vybavení uloženo ve skříních a na lavicích a vzhledem k rozměrům židlí i vybavení se dá předpokládat, že při zakomponování do modelu bychom pozorovali změny právě ve zmíněném 2000 Hz pásmu a jeho okolí. I tak ale vidíme relativně dobrou shodu v pásmech 250–1000 Hz. Nemůžeme také nezmínit i přiřazení materiálu k daným plochám, neboť koeficient pohltivosti nemusí být přesně roven hodnotám koeficientu v reálné místnosti.

4.3 Posluchárna D3-309

Druhá část této práce představovala tu hlavní a daleko komplexnější a náročnější část. Kromě toho, že samotná posluchárna 309 je oproti učebně 554 stavbou složitější, a tedy i model takového prostoru je náročnější, dle zadání je úkolem vytvořit několik modelů této místnosti, každý v různé míře přesnosti a podobnosti vůči reálné místnosti. V každém z modelů se opět získá doba dozvuku a porovná se s reálnou změřenou hodnotou. Účelem je podle výsledků zjistit, jak detailní model je dostačující sestavit k tomu, aby již odpovídal, resp. blížil svými akustickými vlastnostmi reálné místnosti, a případně určit, zda a v jakém případě je přesnější modelování už zbytečné a nepřináší další zlepšení ve výsledcích.

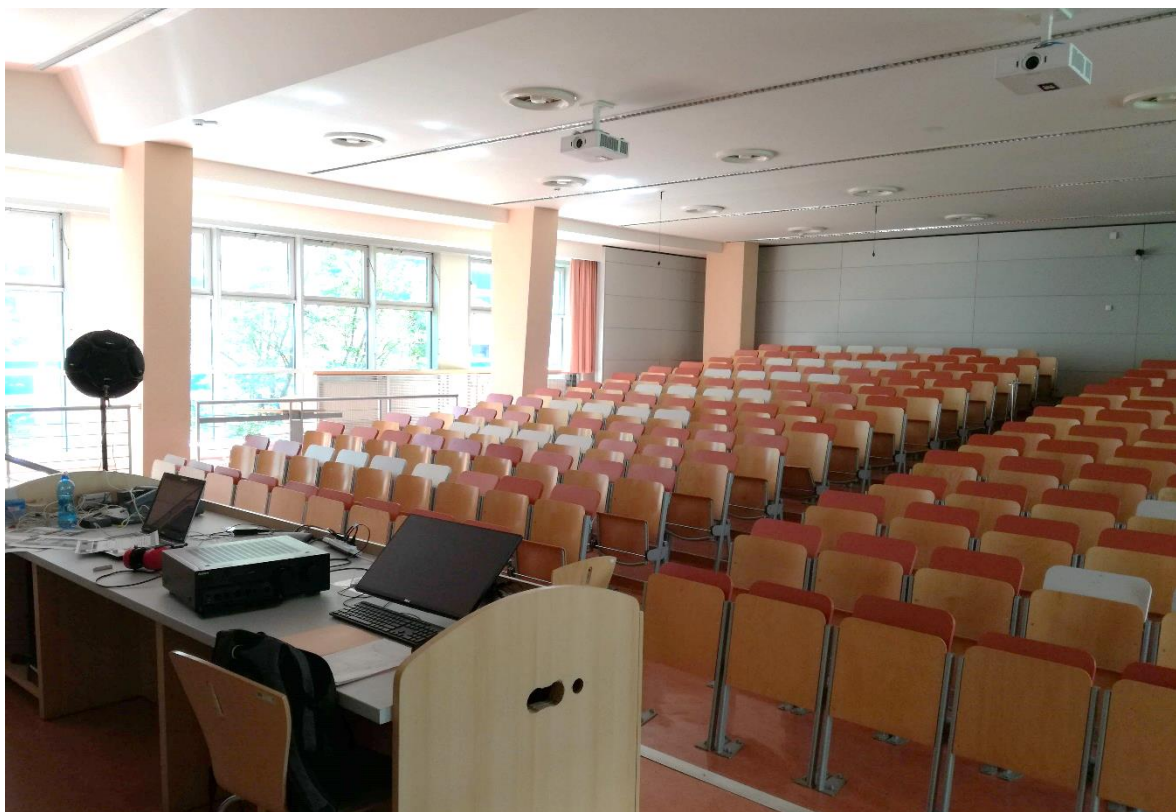


Obrázek 23: Posluchárna 309 – pohled zhora

Místnost 309 v bloku D3 dejvického kampusu Fakulty elektrotechnické slouží jako běžná posluchárna a je vybavena moderním zařízením pro účely přednášek včetně audio vybavení a projekční techniky pro umožnění i technicky náročnějších prezentací. Po rekonstrukci byla opatřena potřebnými akustickými úpravami, takže se dá očekávat, že akustika zde bude přinejmenším uspokojivá. Tvar půdorysu (obrázek 23) této místnosti vychází z obdélníku, ale zahrnuje některé odchylky především v přední části, kde se také nachází pódium. Ovšem z profilu pozorujeme zešíkmený trend jak ve stropní části, tak i u podlahy. Zvláštnost této místnosti také je, že jsou na ni z obou stran u vchodu napojené dva malé prostory. Místa k sezení jsou postavena stupňovitě, kdy začínají zhruba 40 cm níže než pódium a pokračují s postupnou elevací až ke konci posluchárny (viz obrázek 25). Posluchárna tak pojme zhruba 300 osob. Sedačky jsou dřevěné s mírným polstrováním.



Obrázek 24: Posluchárna 309 – pohled zezadu



Obrázek 25: Posluchárna 309

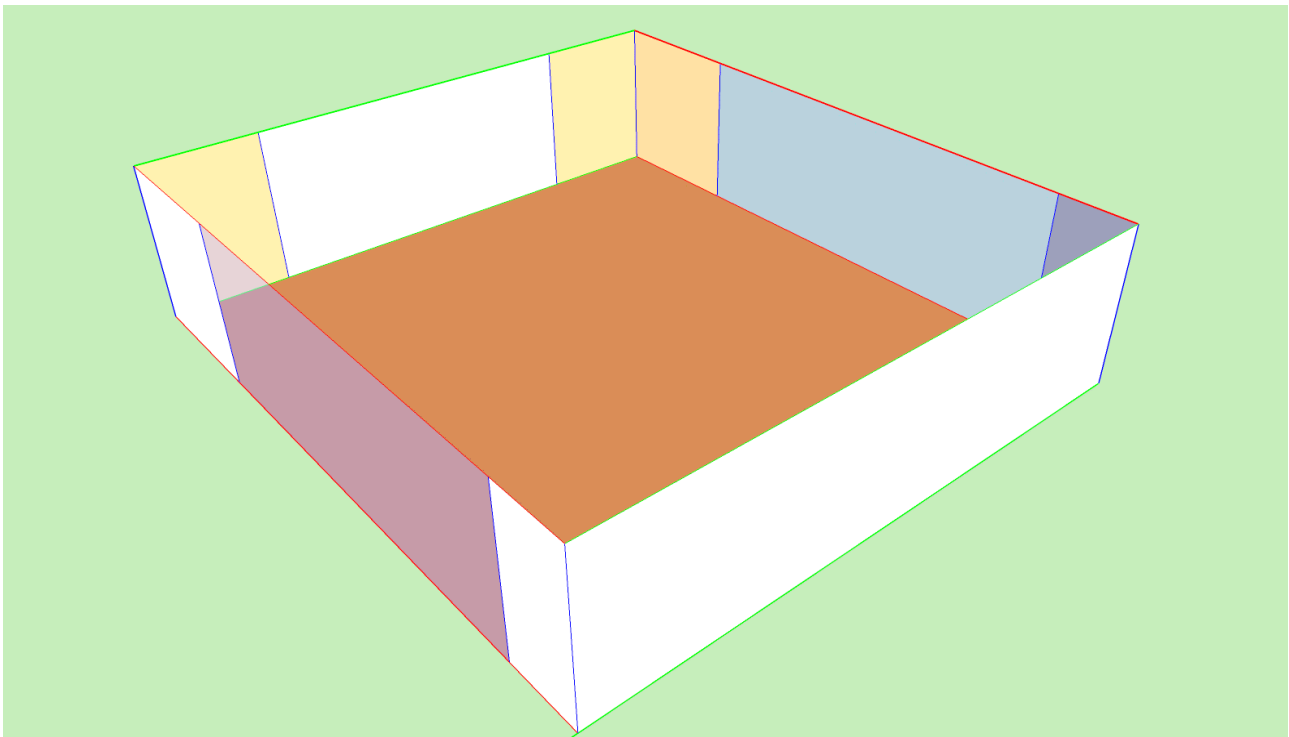
Na každé straně nalezneme tři nosné sloupy a ve stěnách obou stran jsou vsazena okna s kovovou konstrukcí, která jsou opatřena centrálním zatemněním – tlustými závěsy, u kterých se dá předpokládat, že také budou ovlivňovat v menší míře akustiku, především na vyšších kmitočtech. Zadní stěna a část bočních je pokryta dřevěnými panely se vzduchovou kapsou a minerální vlnou. Jedná se tedy o obklad na principu kmitajících desek. Podobně je tomu i v přední části místnosti, která je z většiny obložena jiným dřevěným obkladem, ale opět s minerální vlnou za ním. Přítomnost větracích otvorů a zabudovaných světel napovídá, že značná část stropu je opatřena podhledovou konstrukcí, pravděpodobně sádrokartonem s částečným použitím minerální vlny. To ovšem nebylo možné ověřit. Některé oblasti stropu jsou obloženy deskami se soustavou dutinek, tedy systémem Helmholtzových rezonátorů. Některé části stropu i zdi jsou akusticky neošetřené, včetně nosných sloupů. Podlaha je po celé ploše pokryta linoleem.

4.3.1 Modely D3-309

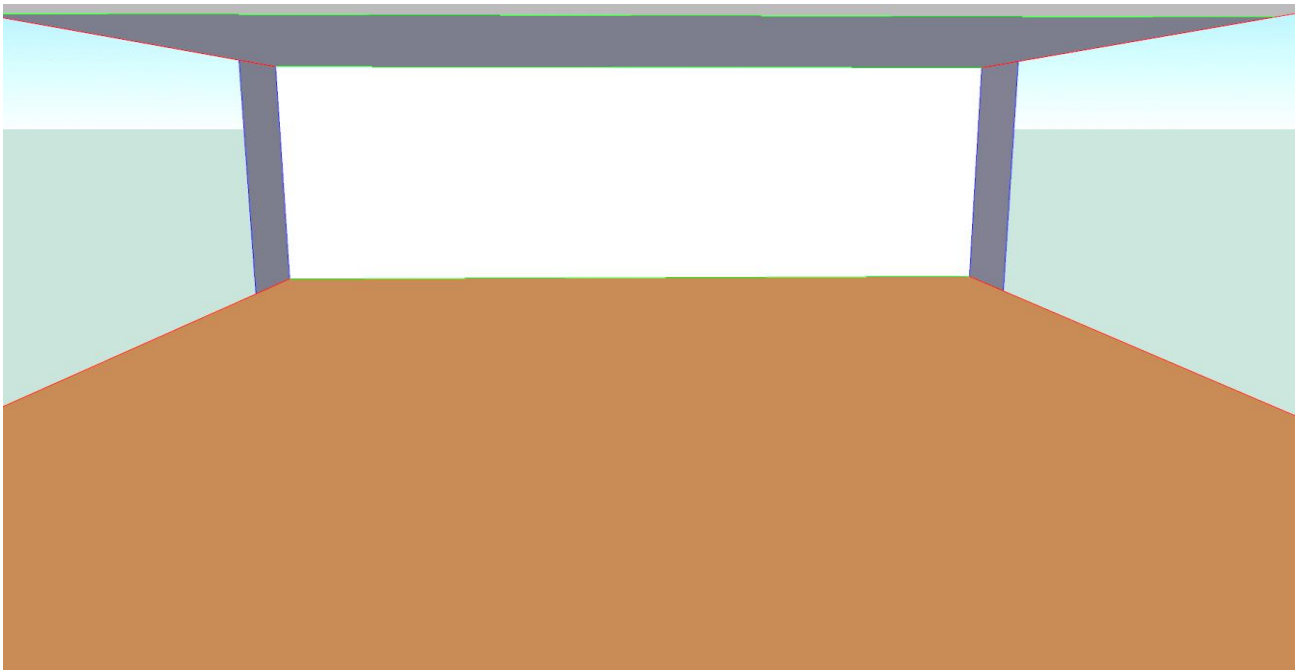
Stejně jako u učebny 554, i tentokrát byl základní model vytvářen ve SketchUp. Jak již bylo zmíněno, zvláštností této úlohy mj. bylo vytvoření několika modelů posluchárny. Postupně bylo nakonec vytvořeno sedm modelů v různé míře přesnosti a jemnosti stavby. Každý z modelů bude dále stručně popsán, včetně specifik při modelování. Všechny modely a jejich ilustrace jsou obsaženy v elektronické příloze.

Model 1 – shoebox

Tento model je ve své podstatě pouhý kvádr, tedy typická místnost „krabice od bot“, a tak zde nejsou žádné nepravidelnosti. Rozměry jsou 4,15x17,15x15,30 (m). Bylo zvoleno alespoň základní rozdělení ploch dle materiálů: zadní stěna společně s částí přilehlých bočních stěn pokryty dřevěným obkladem, dále na bočních stěnách navazuje plocha odpovídající oknům, tedy pohltivost skla, dále rohovým částem těchto stěn společně s přední byl přidělen materiál analogický k dřevěnému obkladu se vzduchovou kapsou a minerální vlnou. Střed přední stěny pak odpovídá sádrokartonu a strop je rozdělen na dvě části, kdy větší odpovídá pokrytí sádrokartonem a zbylá část má pohltivost betonové zdi. Model je znázorněn na následujících obrázcích – snímku z horního pohledu a snímku odpovídajícímu pohledu zepředu od katedry.

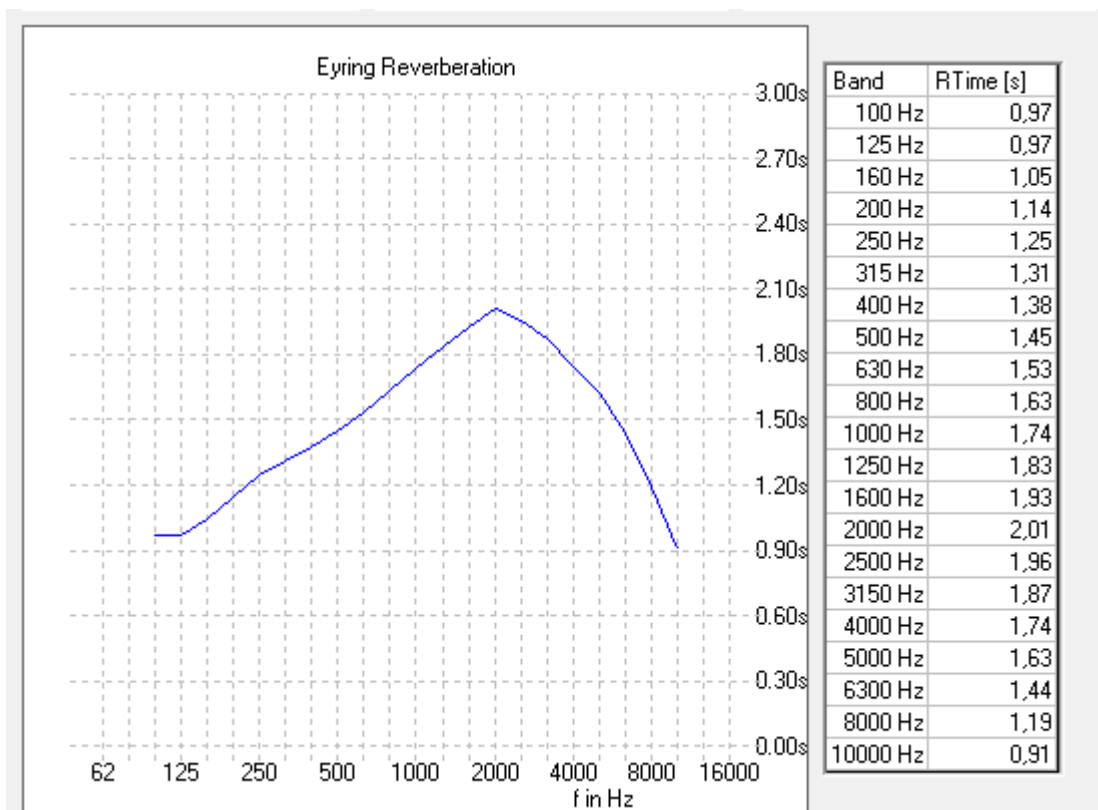


Obrázek 26: Model 1 – shoebox (horní pohled)



Obrázek 27: Model 1 – shoebox (pohled od katedry)

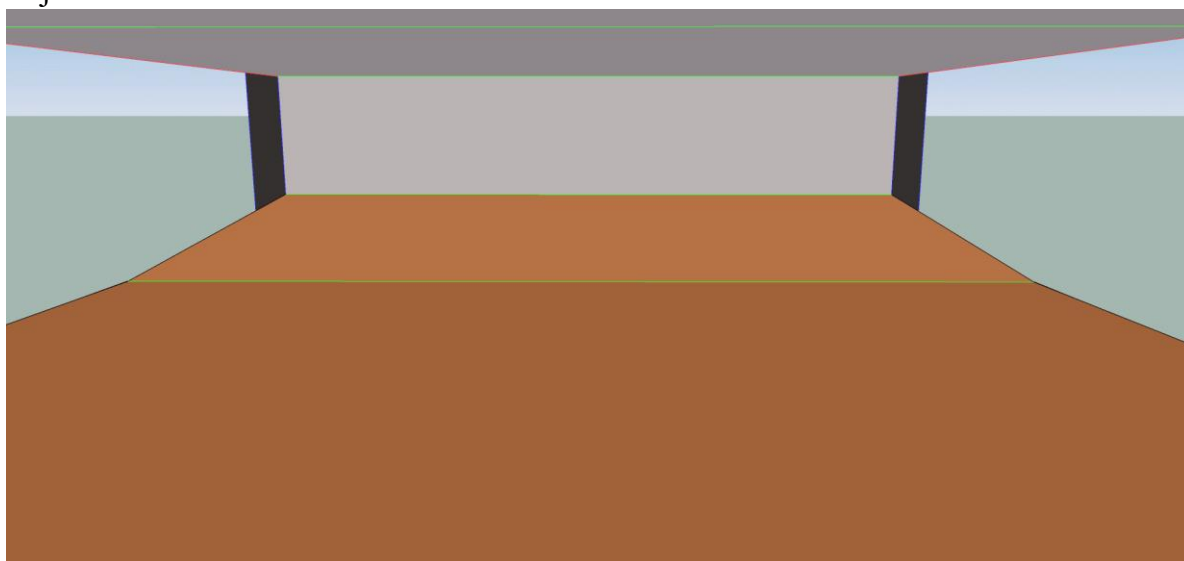
Výsledný objem vychází na necelých 1090 m^3 . Efektivní plocha, tedy plocha podílející se na odrazu zvuku je rovna 794 m^2 . Doba dozvuku v tomto modelu je zobrazena v grafu na obrázek 28.



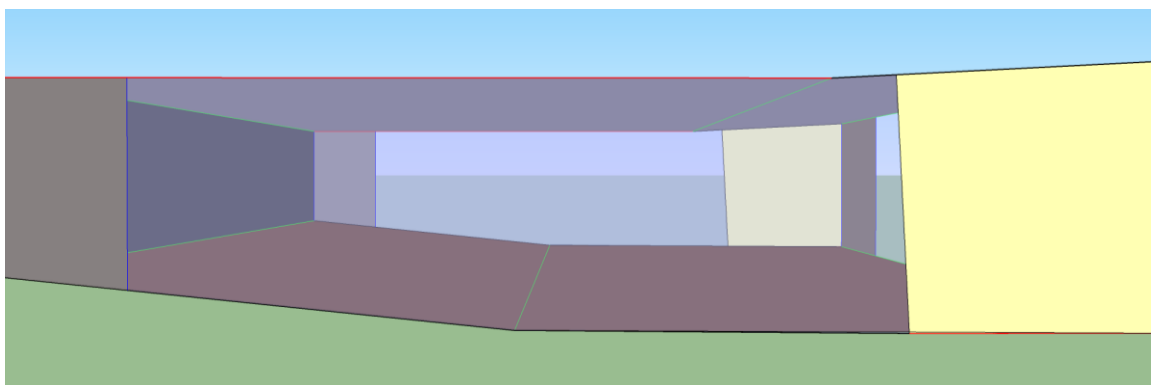
Obrázek 28: Model 1 – doba dozvuku (EASE)

Model 2 – hrubý tvar (základ)

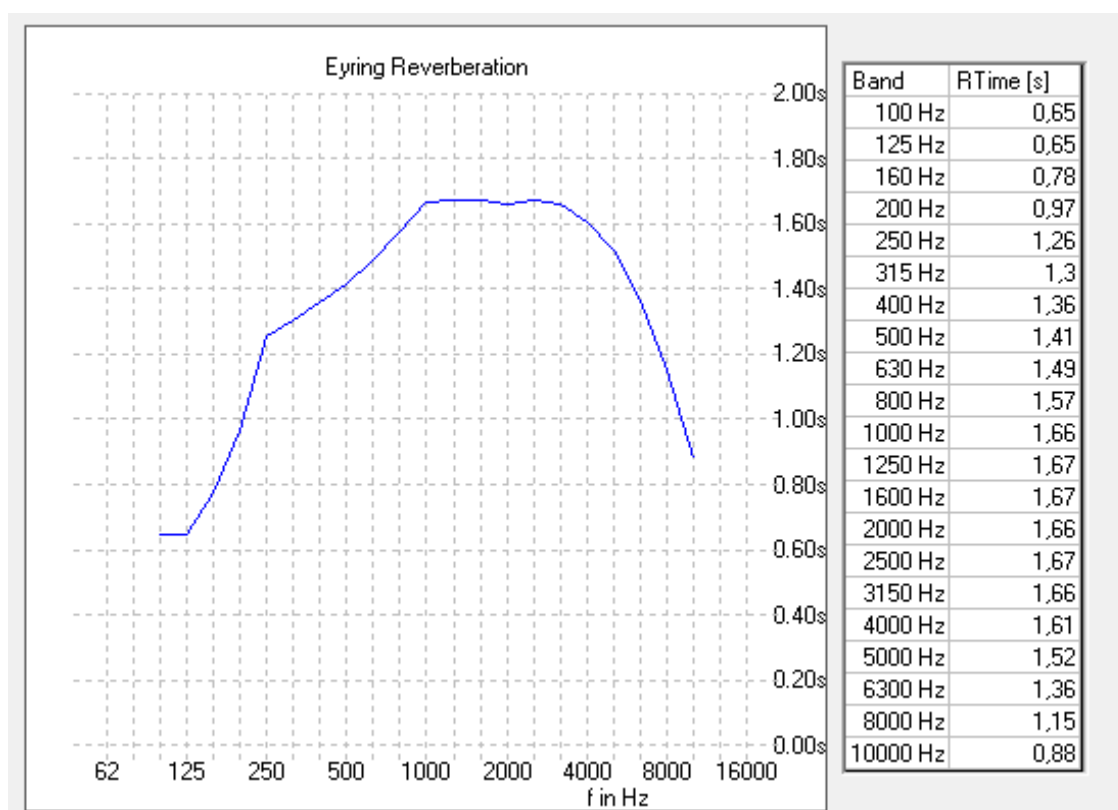
Model vychází z předešlého, s tím rozdílem, že se zde objevuje zkosení podlahy a částečně i stropu. Tedy výška zadní části je oproti předešlému modelu menší, pochopitelně se tím zmenšil i objem místnosti, který je roven necelým 937 m^3 , a efektivní plocha činí 754 m^2 . Rozdělení ploch včetně použití materiálů je (kromě změn v rozměrech) stejné.



Obrázek 29: Model 2 – hrubý tvar (pohled zepředu)



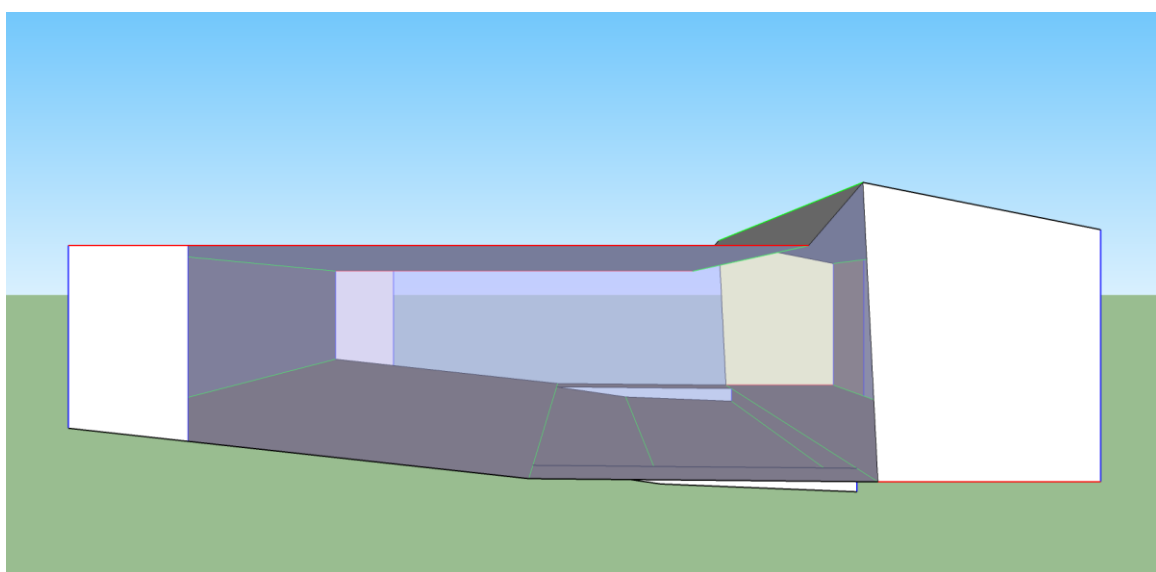
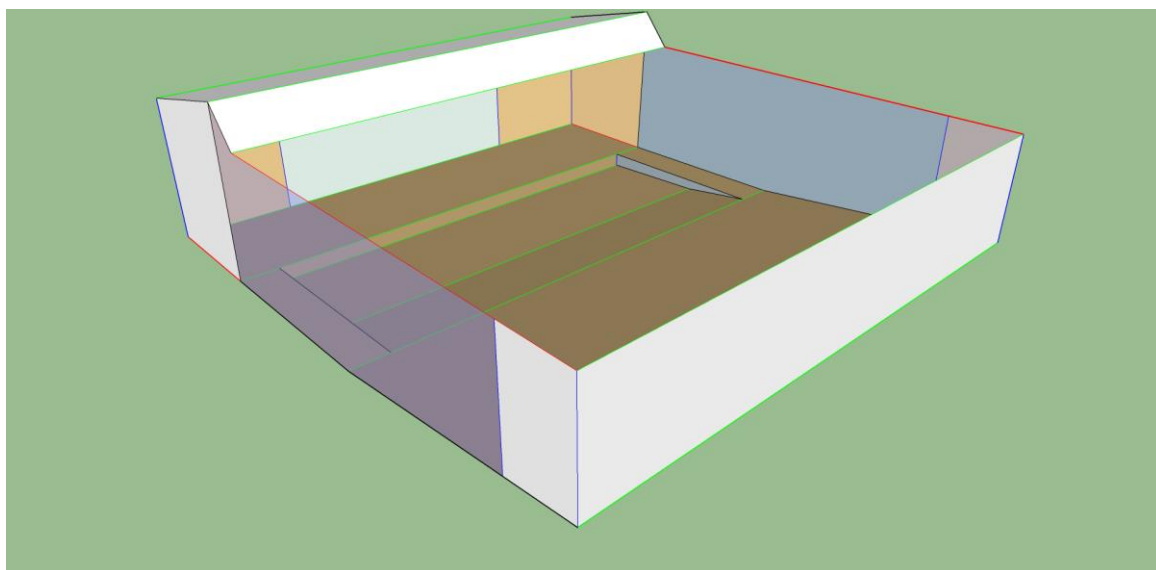
Obrázek 30: Model 2 – hrubý tvar (pohled z boku)



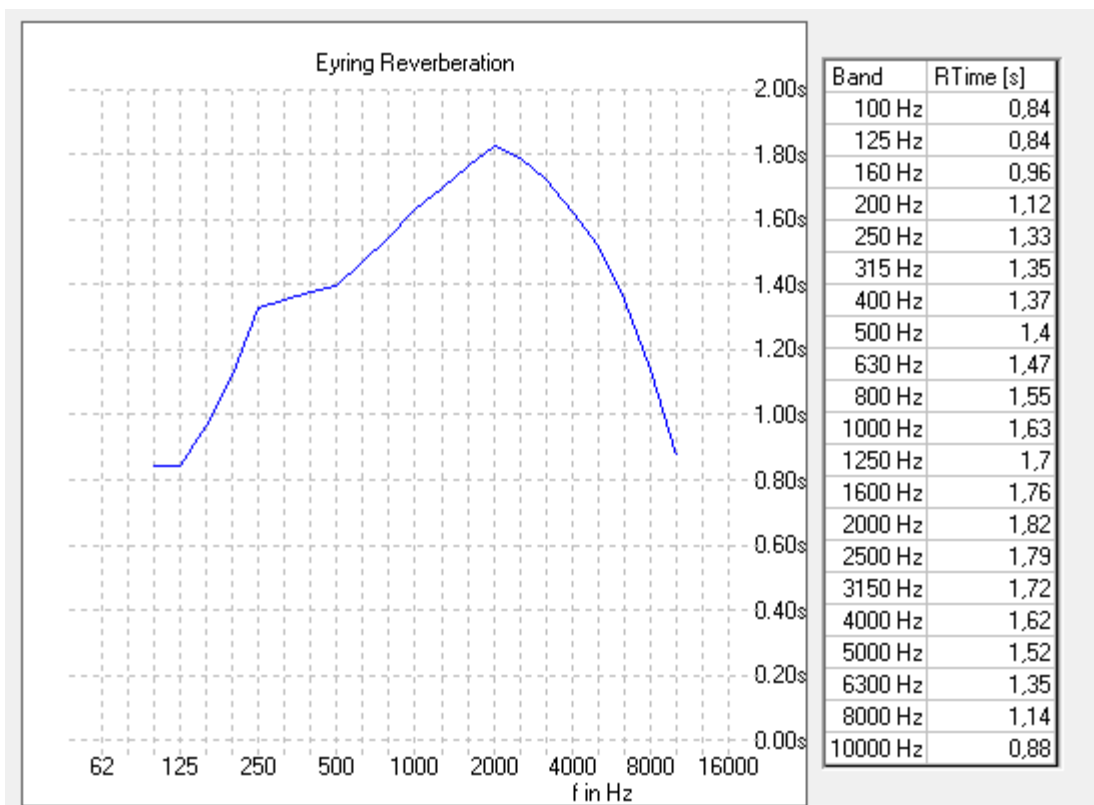
Obrázek 31: Model 2 – doba dozvuku (EASE)

Model 3 – hrubý tvar (pokročilé)

Modifikace oproti předchozím modelům spočívá především ve změnách ve stropní části, kde se přidalo zkosení směrem nahoru. Také se přidala do podlahy menší prohlubeň, která odděluje místa publika a pódia. Drobná nepřesnost pak nastává v části s okny. Přidružené materiály zůstávají, kromě ploch, které vznikly po stranách při změnách podlahy. Tam se použil materiál odpovídající holé zdi.



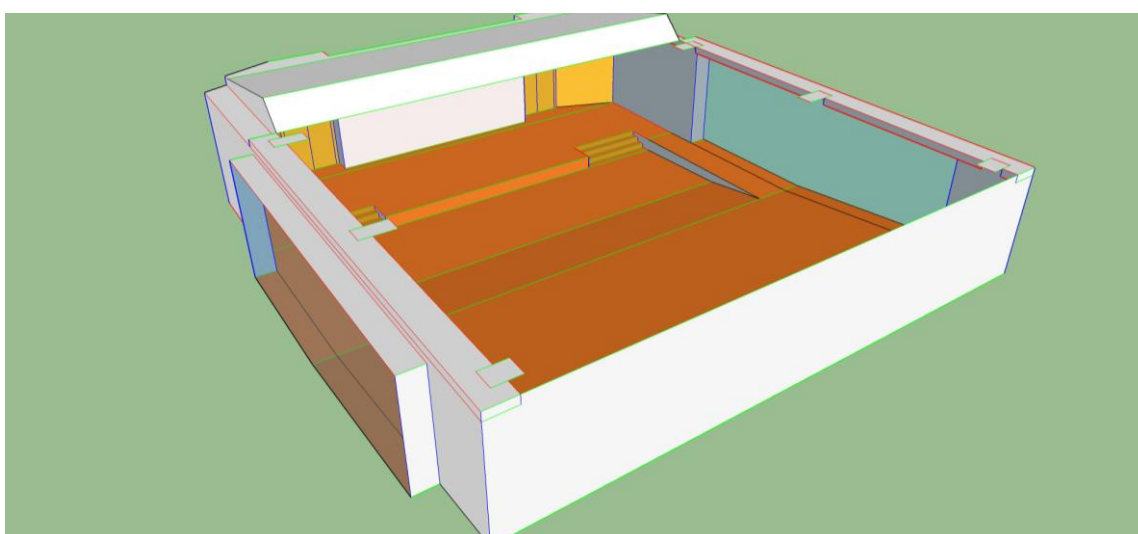
Obrázek 32: Model 3- hrubý tvar (pokročilé)



Obrázek 33: Model 3 – doba dozvuku (EASE)

Objem místnosti je tentokrát 994 m³ a efektivní plocha 775 m². Doba dozvuku se na první pohled razantně nemění, lze ale pozorovat na některých frekvencích dokonce delší, např. na kmitočtu 2000 Hz, to však nemusí být překvapující vzhledem mj. k většímu objemu místnosti.

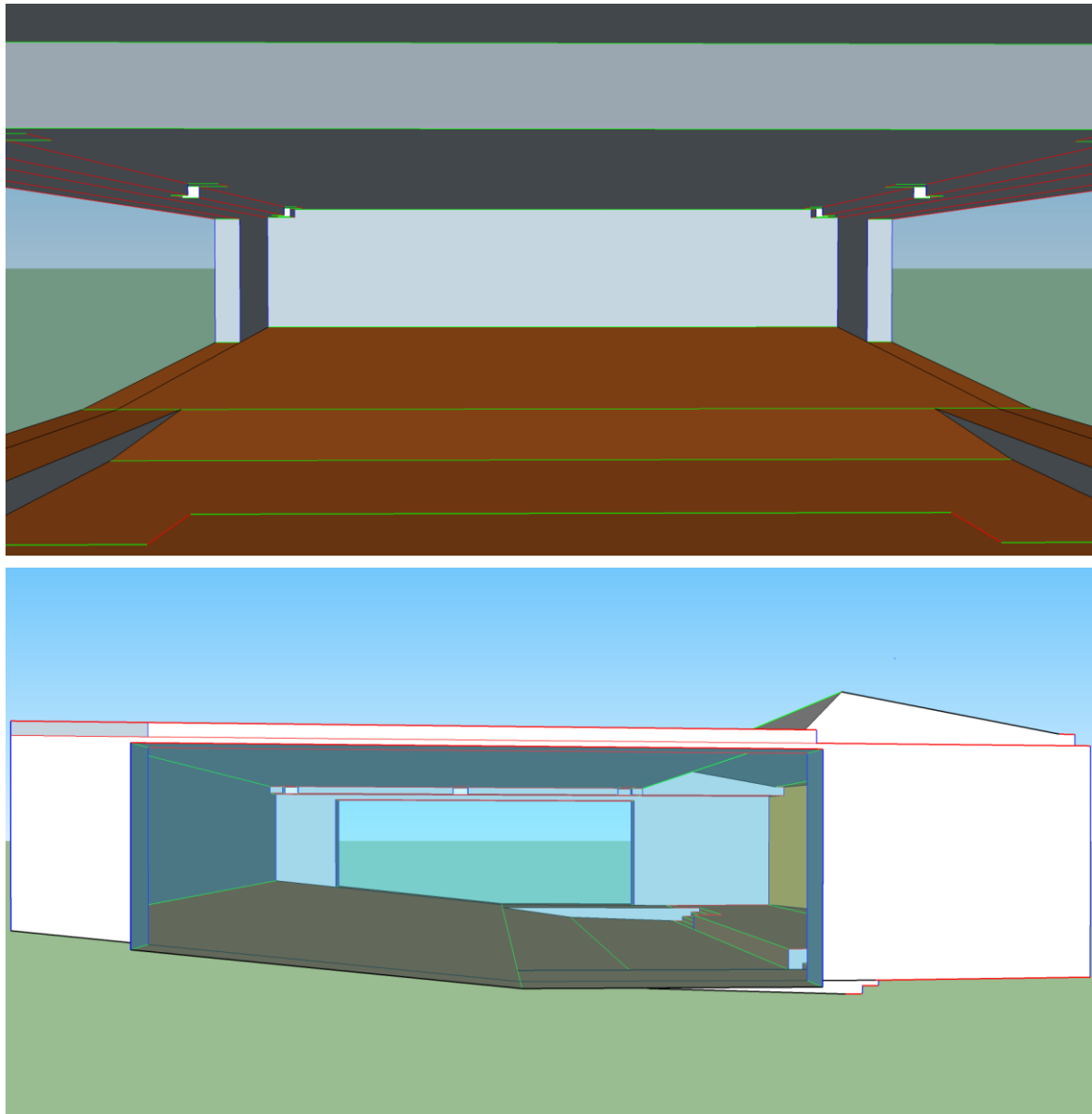
Model 4 - prázdná místnost bez přilehlých prostorů a sloupů



Obrázek 34: Model 4

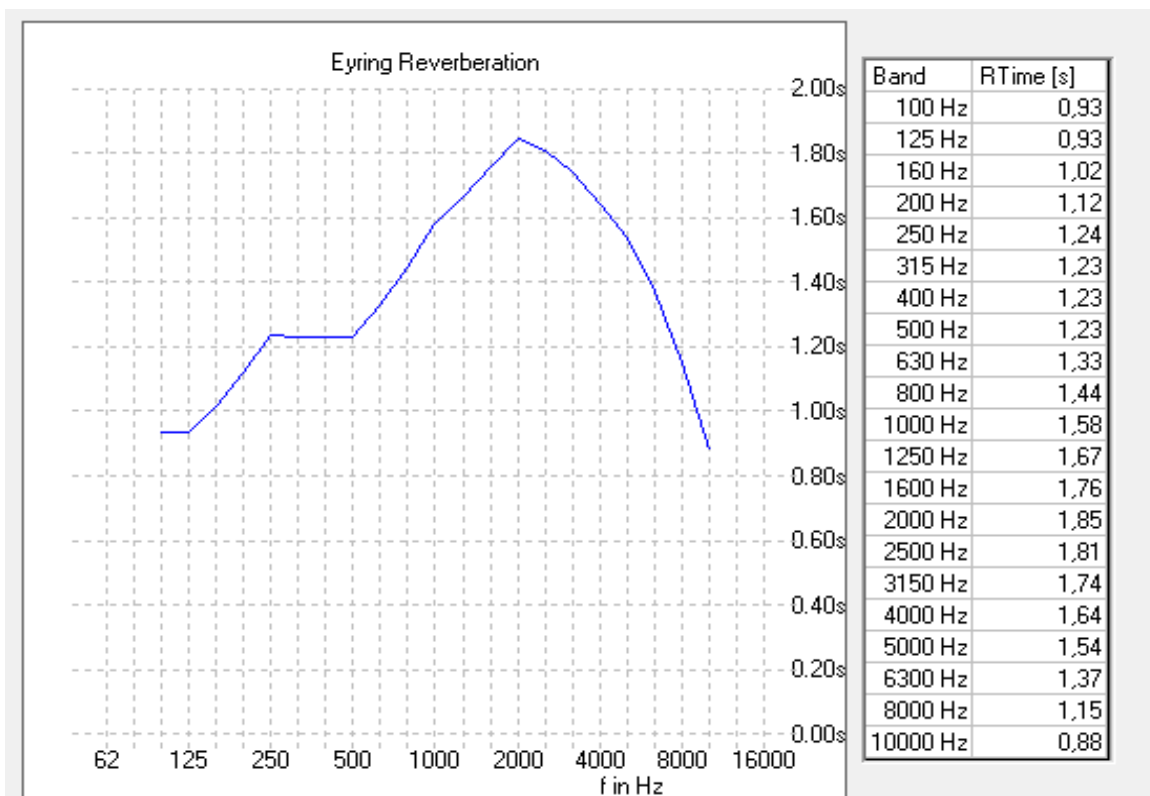
Tento model plně odpovídá základnímu tvaru posluchárny 309. Bylo vymodelováno pódium včetně schůdků na něm, plocha oken byla pozměněna, a navíc byla

okna vsazena hlouběji (viz obrázky dále). Také přední zeď byla změněna tím, že se vymodeloval vstupní prostor společně s dveřmi. Každé ploše byly opět přiřazeny stejné materiály, výjimkou jsou nově vzniklé stropní části nad okenním prostorem. Jelikož jsou tyto plochy v reálné místnosti pokryty obkladem se systémem Helmholtzových rezonátorů, i v modelu jim byl přiřazen analogický materiál, a to rezonátory pro pásmo 500 Hz.



Obrázek 35: Model 4 – pohled zepředu a z boku

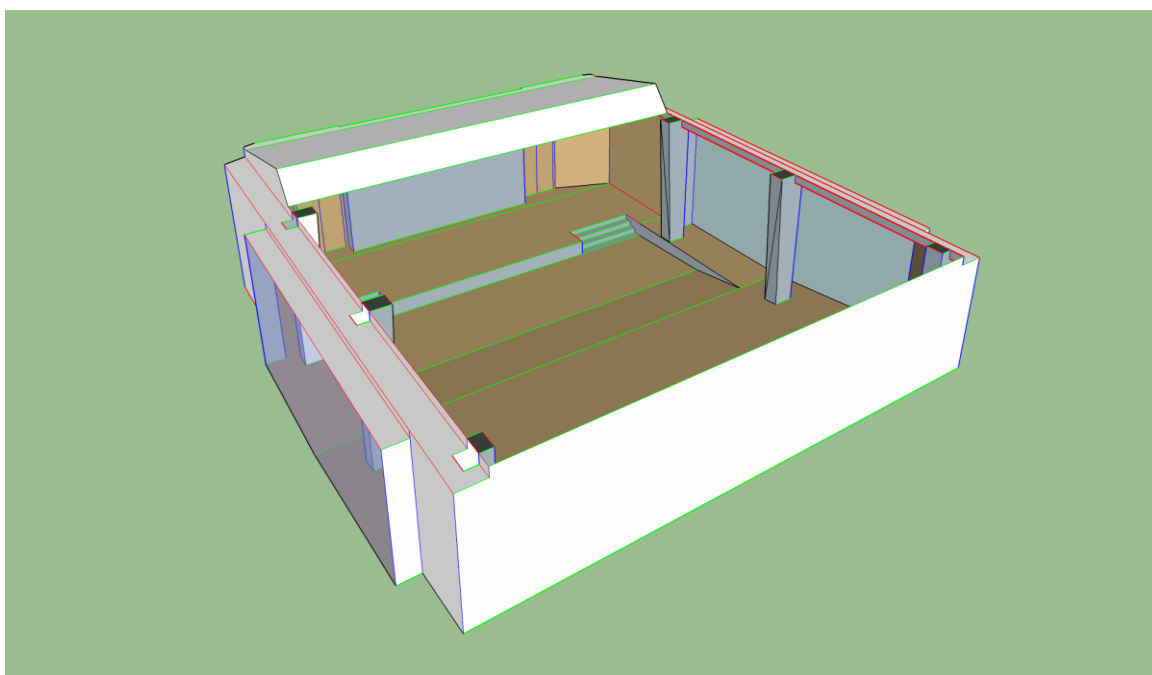
Objem tohoto modelu se opět zvětšil a to na 1036 m^3 a efektivní plocha je necelých 820 m^2 . Jak ukazuje graf na obrázek 36, v porovnání s předchozím modelem se doba dozvuku nezměnila nijak zásadně, pozorujeme však její zkrácení kolem 500 Hz, kde se zřejmě uplatnily systémy Helmholtzových rezonátorů.



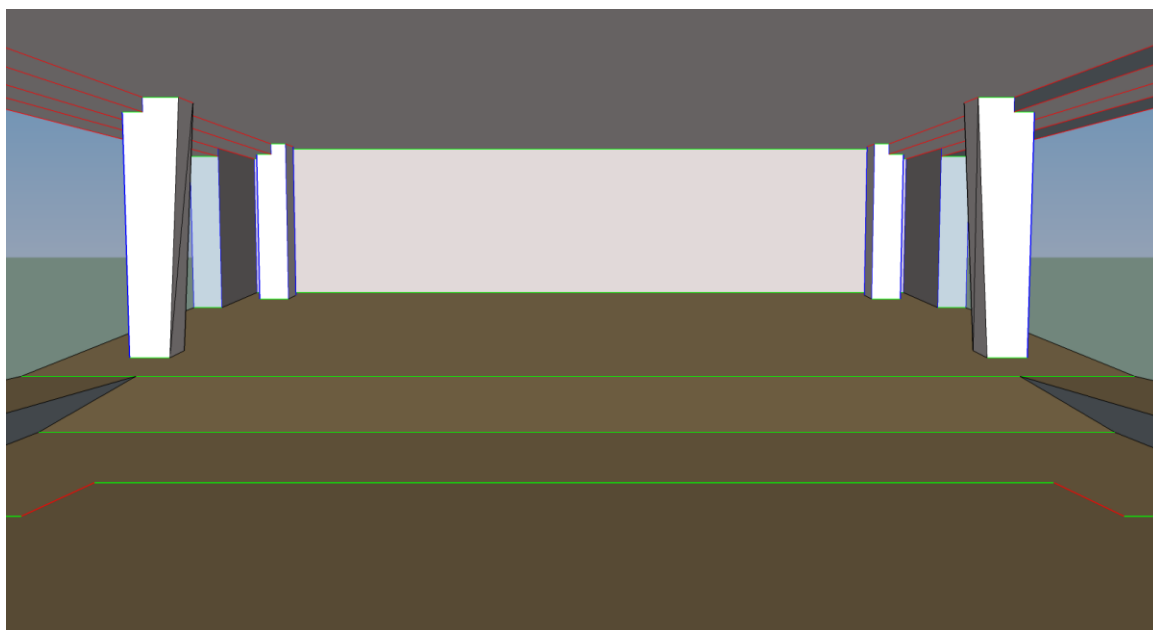
Obrázek 36: Model 4 – doba dozvuku (EASE)

Model 5 - prázdná místnost bez přilehlých prostorů se sloupy

Zde se neprovedly žádné zásadní změny kromě vložení nosných sloupů, kterým byl přiřazen materiál s koeficientem pohltivosti odpovídající holé zdi. Materiály ostatních ploch zůstaly stejné.

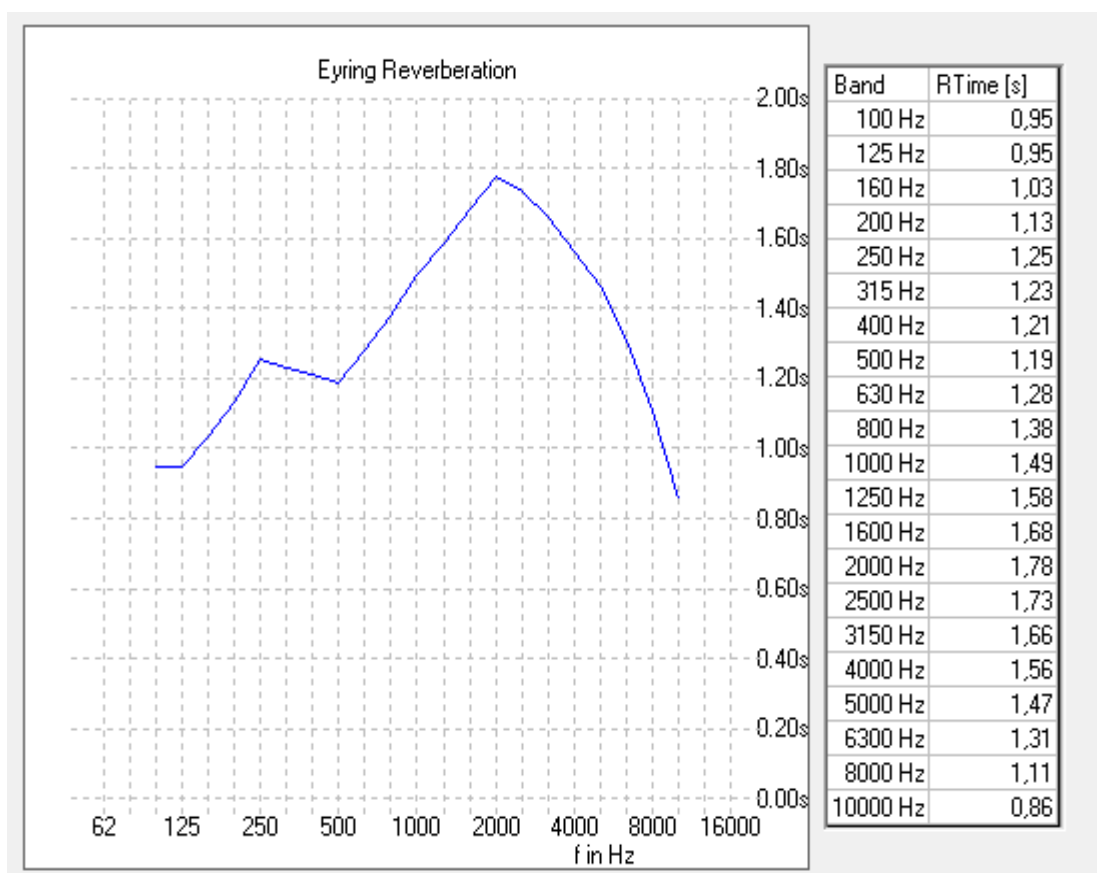


Obrázek 37: Model 5



Obrázek 38: Model 5 – pohled zepředu

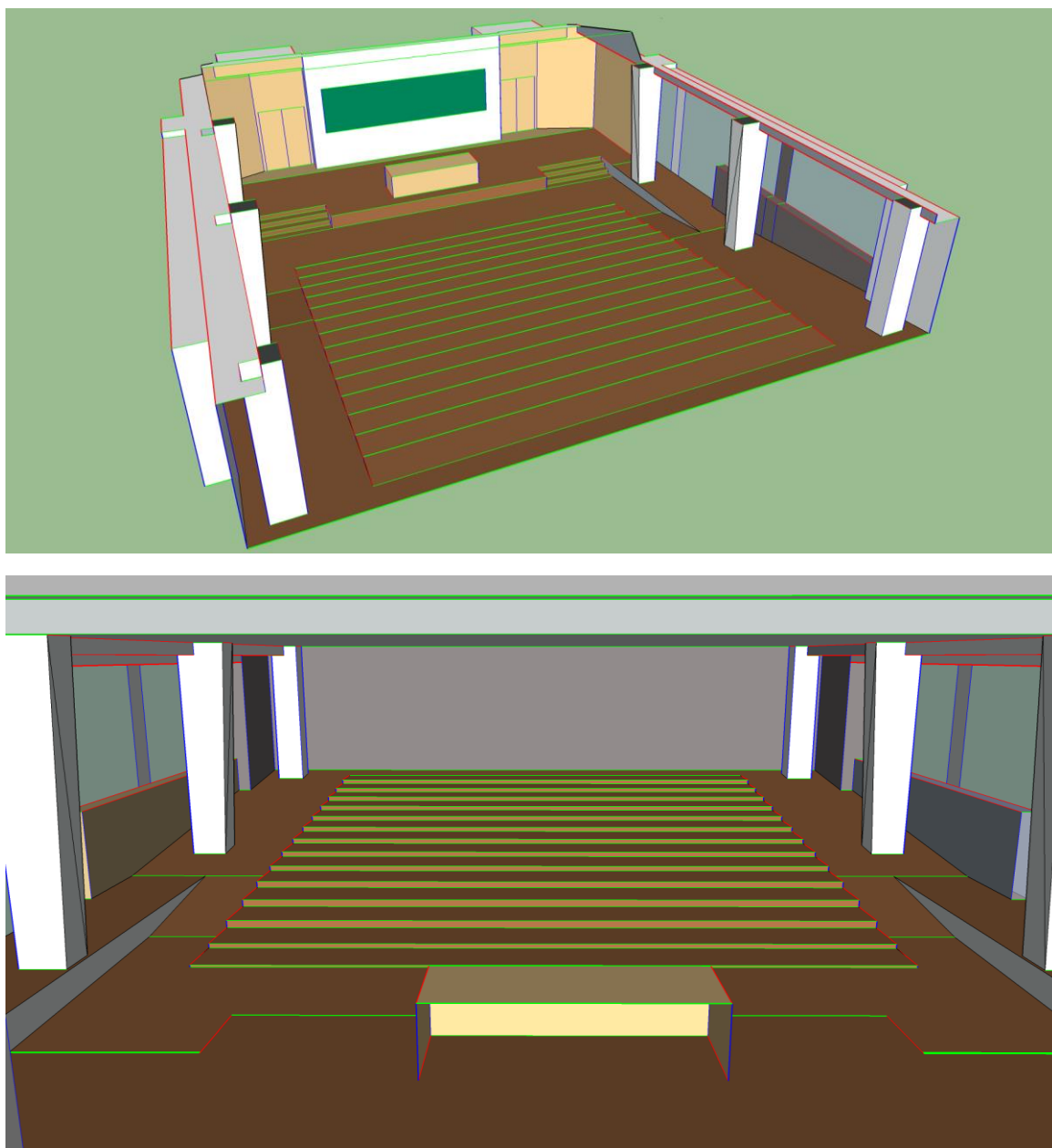
Zahrnutí nosných sloupů do modelu zmenšilo objem místnosti na 1028 m^3 , efektivní plocha se však zvětšila na 863 m^2 . Doba dozvuku se však mění pouze v rámci setin sekundy.



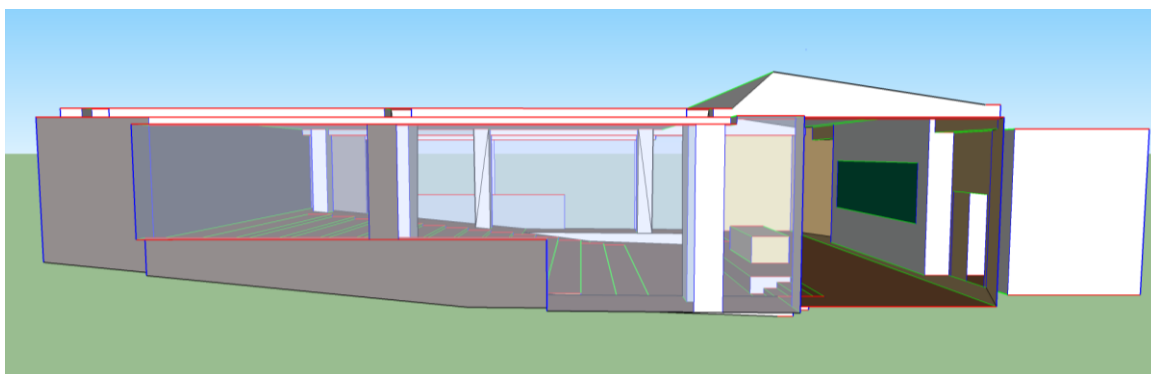
Obrázek 39: Model 5 – doba dozvuku (EASE)

Model 6 – úplný model bez sedaček

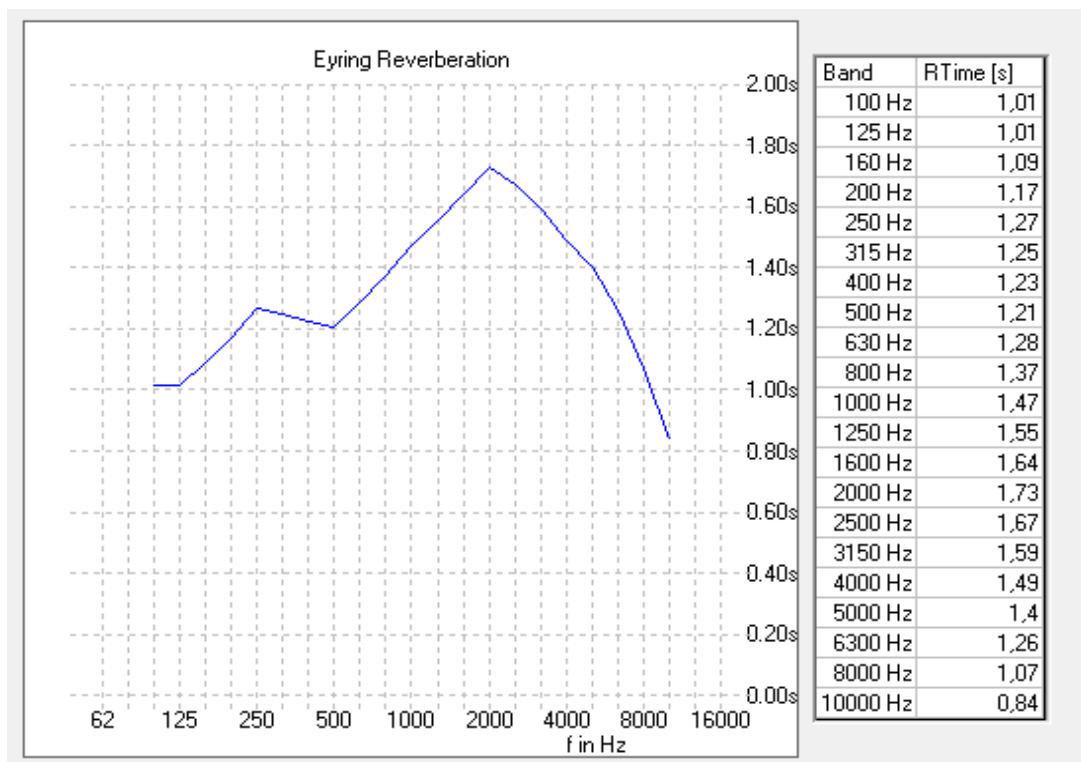
V této modifikaci se již vymodelovaly schody v podlaze, ovšem stále bez sedaček. Na pódiu se umístila katedra a největší změna v modelu spočívá v napojení přilehlých prostorů u vchodů místnosti. Jako materiál pro stěny a strop těchto prostorů byl zvolena betonová zeď a pro podlahu bylo stejně jako u samotné posluchárny vybráno linoleum. Mezi přilehlými prostory a posluchárnou jsou dřevěné dveře. Další poměrně velkou změnou je přidání plochy na místo topení a zdiva v oblasti oken (obrázek 40). Tím se pochopitelně mění efektivní plocha i pohltivost těchto částí místnosti.



Obrázek 40: Model 6



Obrázek 41: Model 6 – pohled z boku

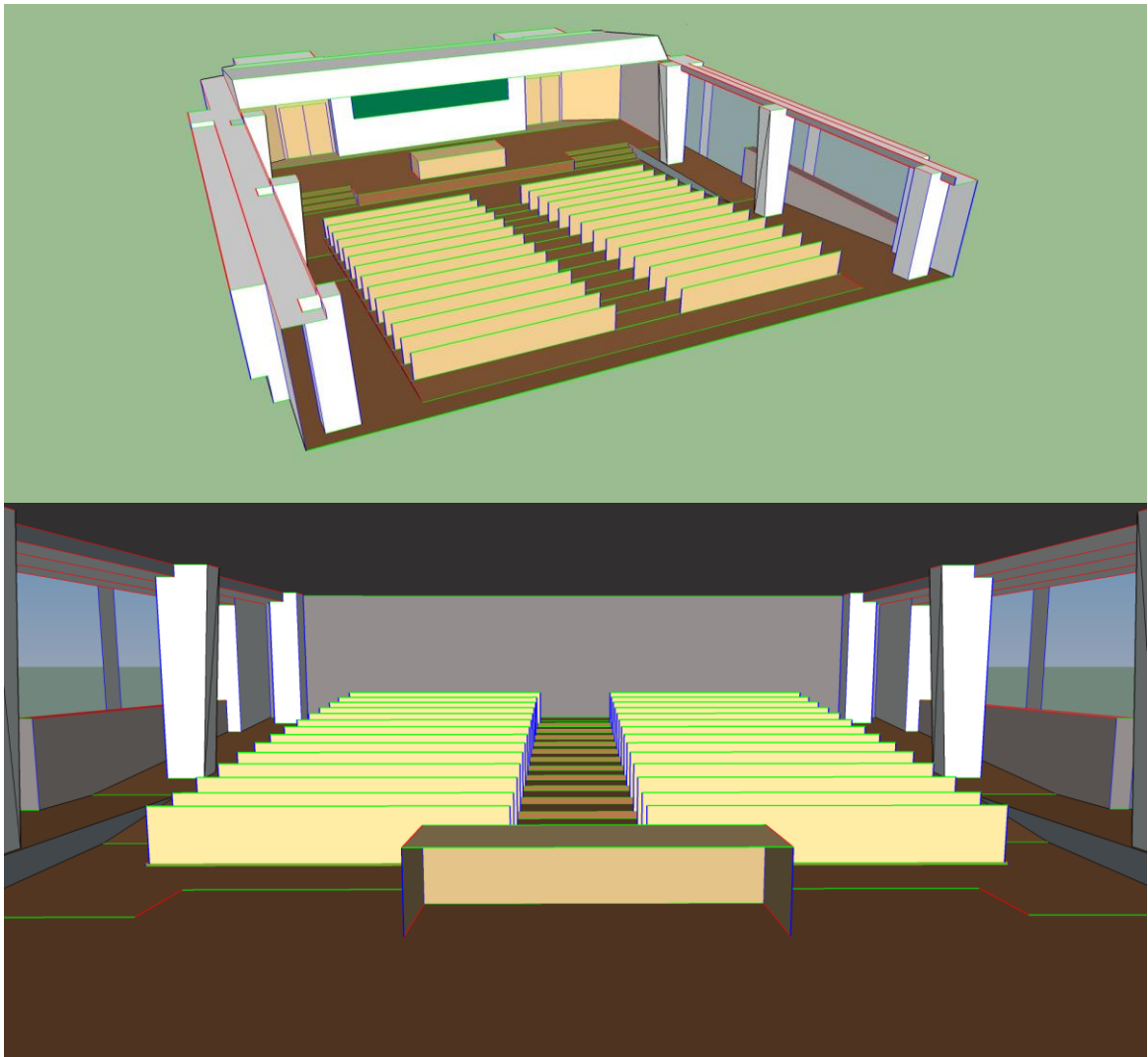


Obrázek 42: Model 6 – doba dozvuku (EASE)

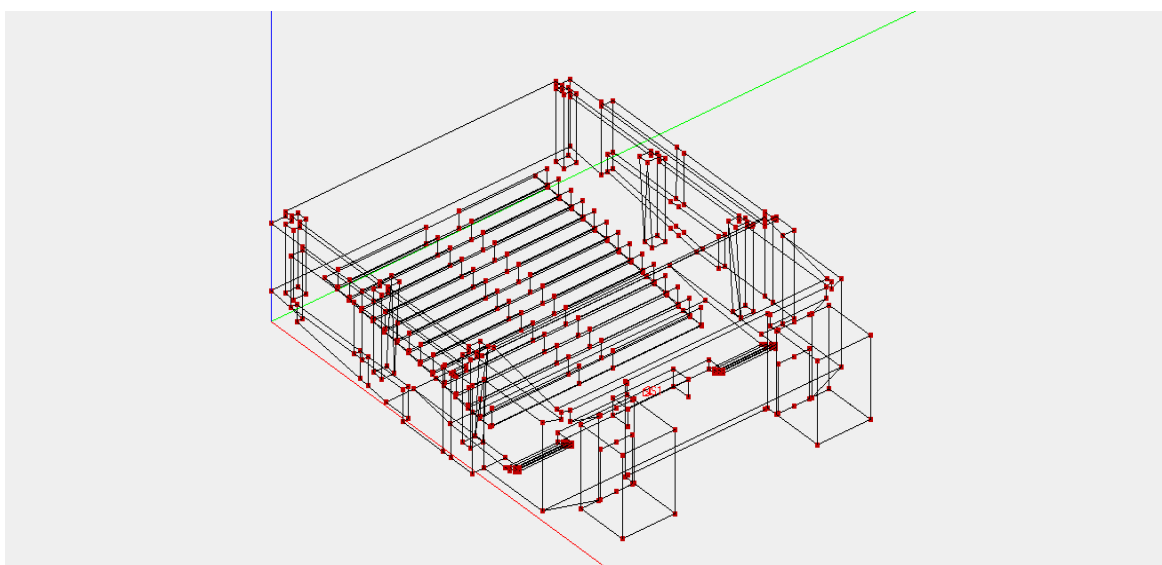
Připojení prostorů u vchodu pochopitelně zvětšilo objem místnosti, a to na 1074 m³, i efektivní plocha je větší, také díky přidání ploch topení u oken a vytvarování schůdků, a činí 1010 m². V době dozvuku pozorujeme mírné změny (většinou kolem 0,05s).

Model 7 – Úplný model

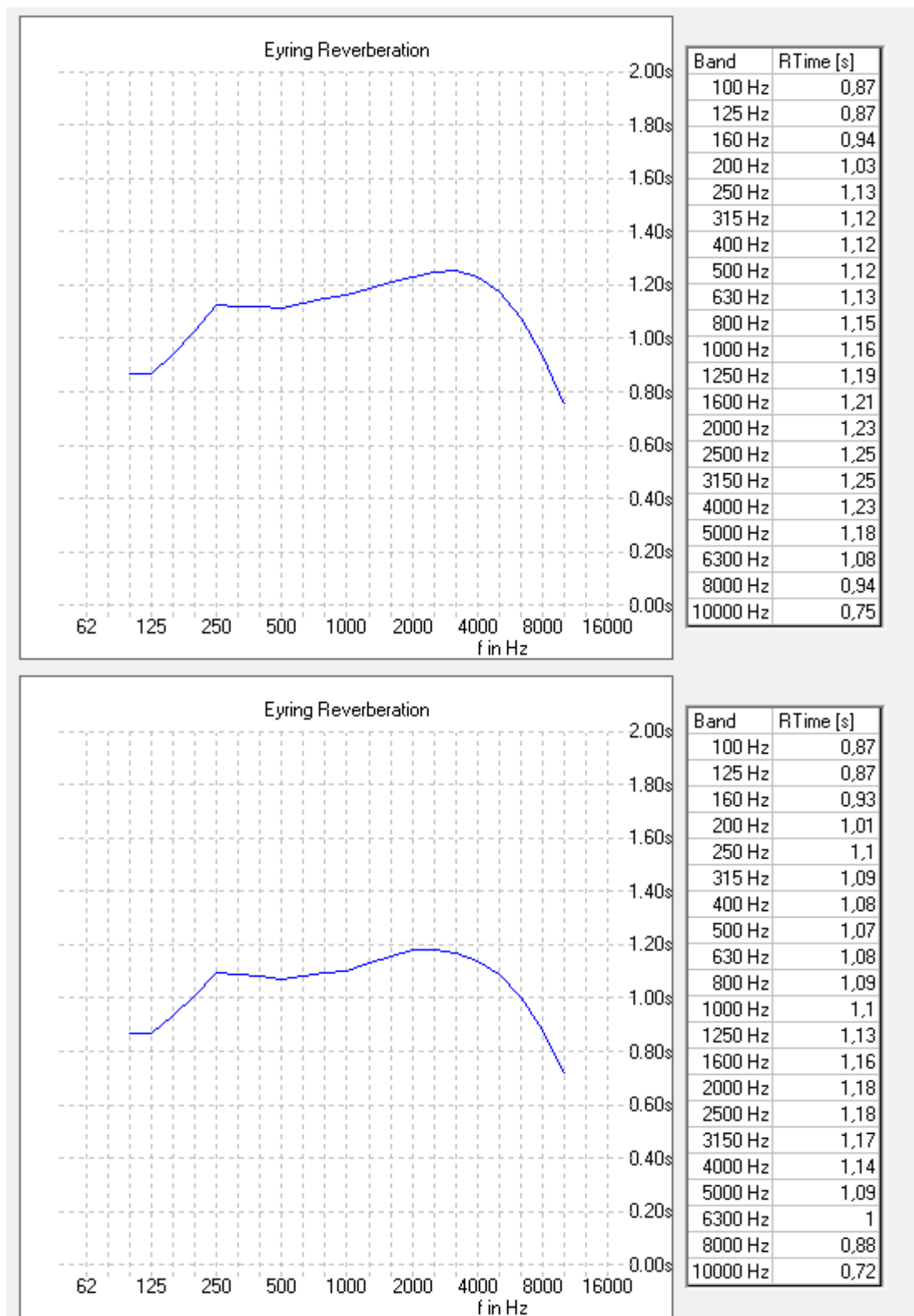
Poslední model byl vytvořen ve dvou variantách: s otevřenými dveřmi k přilehlým prostorům nebo s dveřmi zavřenými. Jedinou (přesto zásadní) změnou od předchozího modelu bylo přidání dřevěných sedaček do střední části místnosti. Pro jednoduchost se modelovala pouze plocha odpovídající těmto sedačkám. Materiály pro sedačky byly použity dva, konkrétně pro zadní stranu dřevo a pro přední byl vybrán materiál odpovídající sedačkám s částečným polstrováním.



Obrázek 43: Model 7



Obrázek 44: Model 7 – EASE



Obrázek 45: Model 7 – doba dozvuku (nahore se zavřenými dveřmi, dole s otevřenými dveřmi)

Tentokrát se objem místnosti pochopitelně nezměnil, ovšem efektivní plocha se navýšila na bezmála 1186 m² (při otevřených dveřích 1173 m²), mohli jsme tedy očekávat i změnu v hodnotách doby dozvuku. To potvrzuje i graf a výsledky znázorněny na obrázek 45, kde

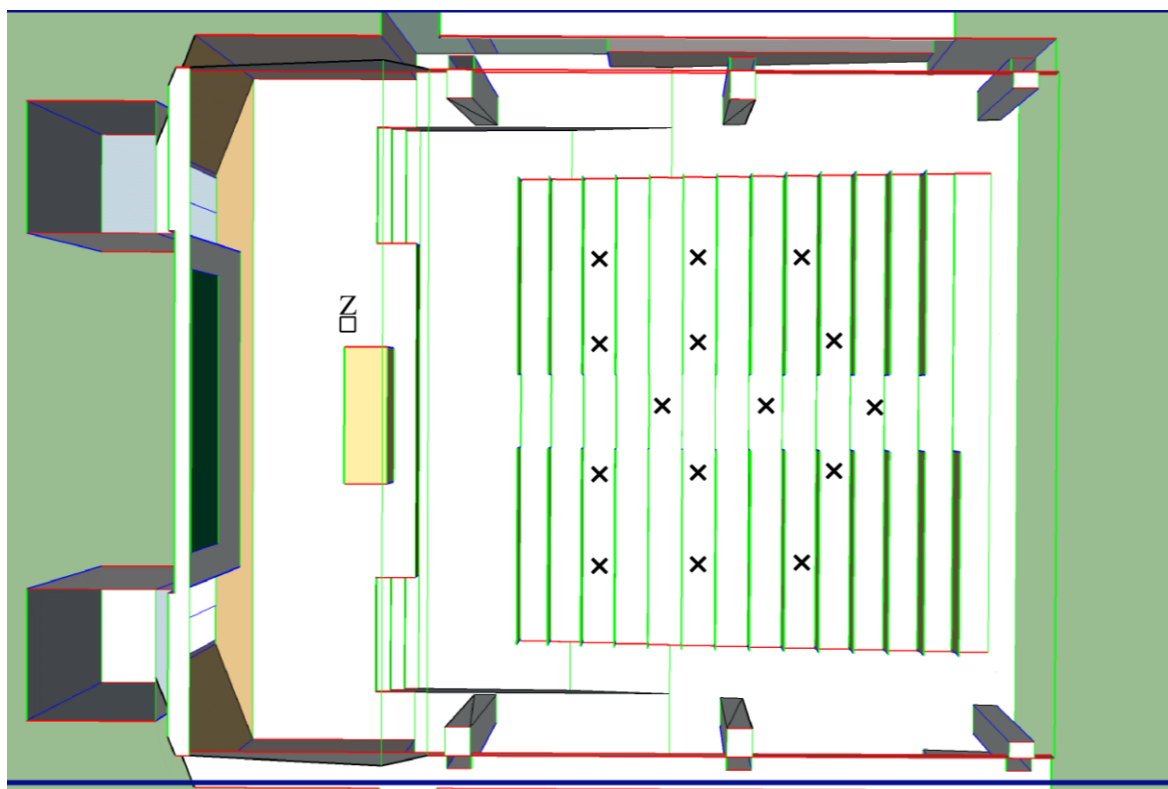
vidíme velké změny především okolo kmitočtu 2000 Hz. Můžeme také pozorovat rozdíl, který je způsoben otevřenými nebo zavřenými dveřmi.

Tabulka 2: Přehled vytvořených modelů

Model	Objem [m ³]	Efektivní plocha [m ²]
Model 1 – shoebox	1090	794
Model 2 – hrubý tvar (základ)	937	754
Model 3 – hrubý tvar (pokročilé)	994	775
Model 4 – prázdná místnost bez přilehlých prostorů a sloupů	1036	820
Model 5 – prázdná místnost bez přilehlých prostorů se sloupy	1028	863
Model 6 – úplný model bez sedaček	1074	1010
Model 7 – Úplný model (otevřené nebo zavřené dveře)	1074	1186
		1173

4.3.2 Měření posluchárny 309

Pro získání doby dozvuku posluchárny bylo opět nutné změřit impulsní odezvu místnosti. Stejně jako u učebny 554, i zde se měřilo dle standardní metody. Odměřeno bylo z jedné pozice zdroje a několika pozic mikrofonu (v některých pozicích se měřilo i vícekrát pro vyloučení chybných výsledků). Zdroj byl postaven do pravděpodobné pozice přednášejícího a mikrofon byl pokládán na místa sezení, jak je znázorněno na obrázku.



Obrázek 46: Pozice měření posluchárny 309

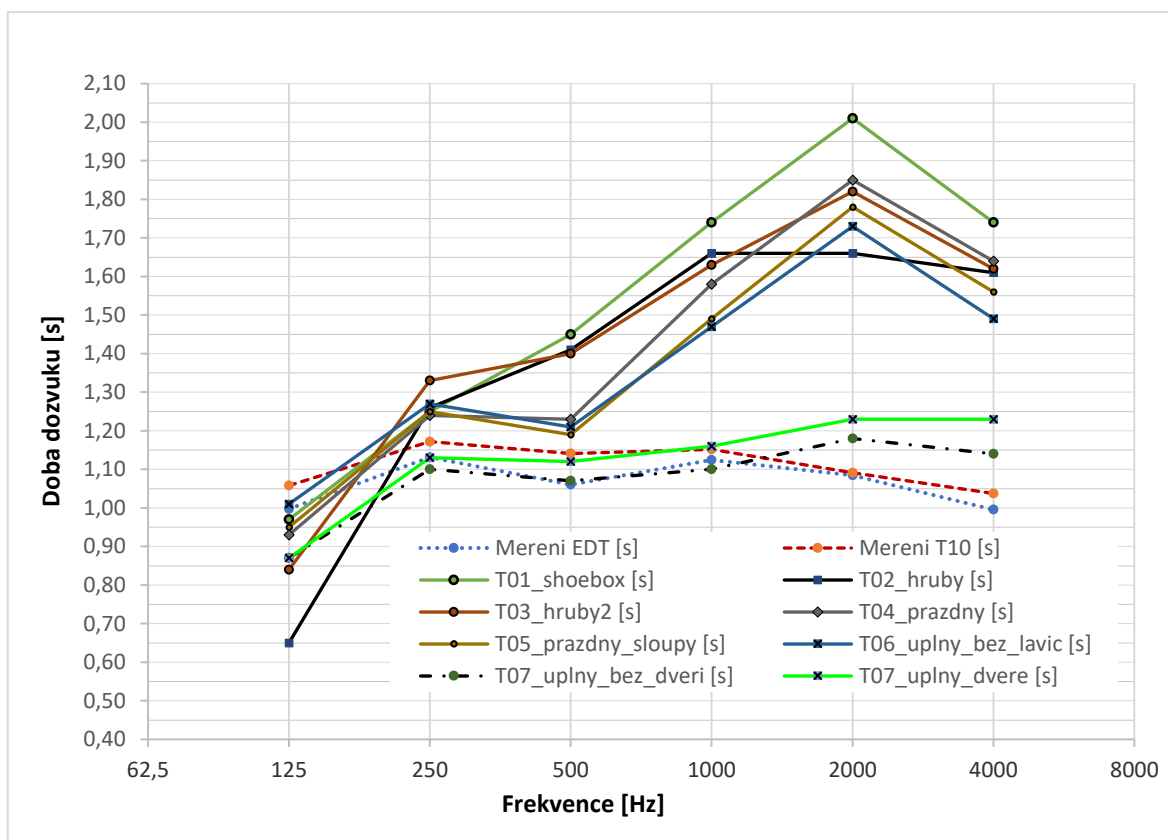
Závěsy zůstaly schované, aby (byť jen v malé míře) neovlivnily výsledky vzhledem k následnému porovnání s modelem, ve kterém závěsy započítány nejsou. Bylo také provedeno zvláštní měření pro místnost s otevřenými a zavřenými dveřmi.

Celkový výsledek doby dozvuku vznikl průměrováním dílčích výsledků. Pro vyhodnocení byl opět použit skript v prostředí MATLAB, který byl oproti minulému modifikován. Vzhledem k několika nepřesným měření, kdy doba dozvuku vycházela příliš vysoká (i více než 10 sekund), je ve skriptu zahrnuto opatření, které vyřadí takováto měření ze souboru dat k vyhodnocení. Tyto nepřesnosti mohly vzniknout z více důvodů. Možné je např. odměření z pozice, kde se nacházel mód na dané frekvenci. Za více pravděpodobný důvod se jeví fakt, že při měření nebylo možné dosáhnout dostatečného odstupu signálu od šumu neboli dostatečně vybudit místnost. Jelikož se nepřesné výsledky týkají hodnot T_{20} a T_{30} , lze předpokládat, že nebylo dosaženo potřebného poklesu od -5 dB do -35 dB, aby se signál zároveň neztratil v šumu, takže měřící software měl problém s výpočtem těchto hodnot. Zmíněný skript stejně jako pro učebnu 554 načte textové soubory uložené z programu EASE, ve kterých jsou zapsány výsledné doby dozvuku, vyřadí chybná data, vypočte průměrné hodnoty a výsledky uloží do sešitu EXCEL pod názvem „RT_vysledky309.xls“. Ve skriptu jsou také zaznamenány hodnoty doby dozvuku každého z modelů, které jsou pro zjednodušení porovnání a vyhodnocení též zapsány do výstupního souboru.

Tabulka 3: Příklad výsledků z měření posluchárny 309

EDT [s]	1,25	1,18	1,15	1,26	1,15	1,02
T10 [s]	1,31	1,40	1,16	1,12	1,04	1,03
T20 [s]	1,05	1,31	1,29	1,13	1,11	1,03
T30 [s]	1,08	1,22	1,20	1,08	1,07	1,00
frekvence f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000

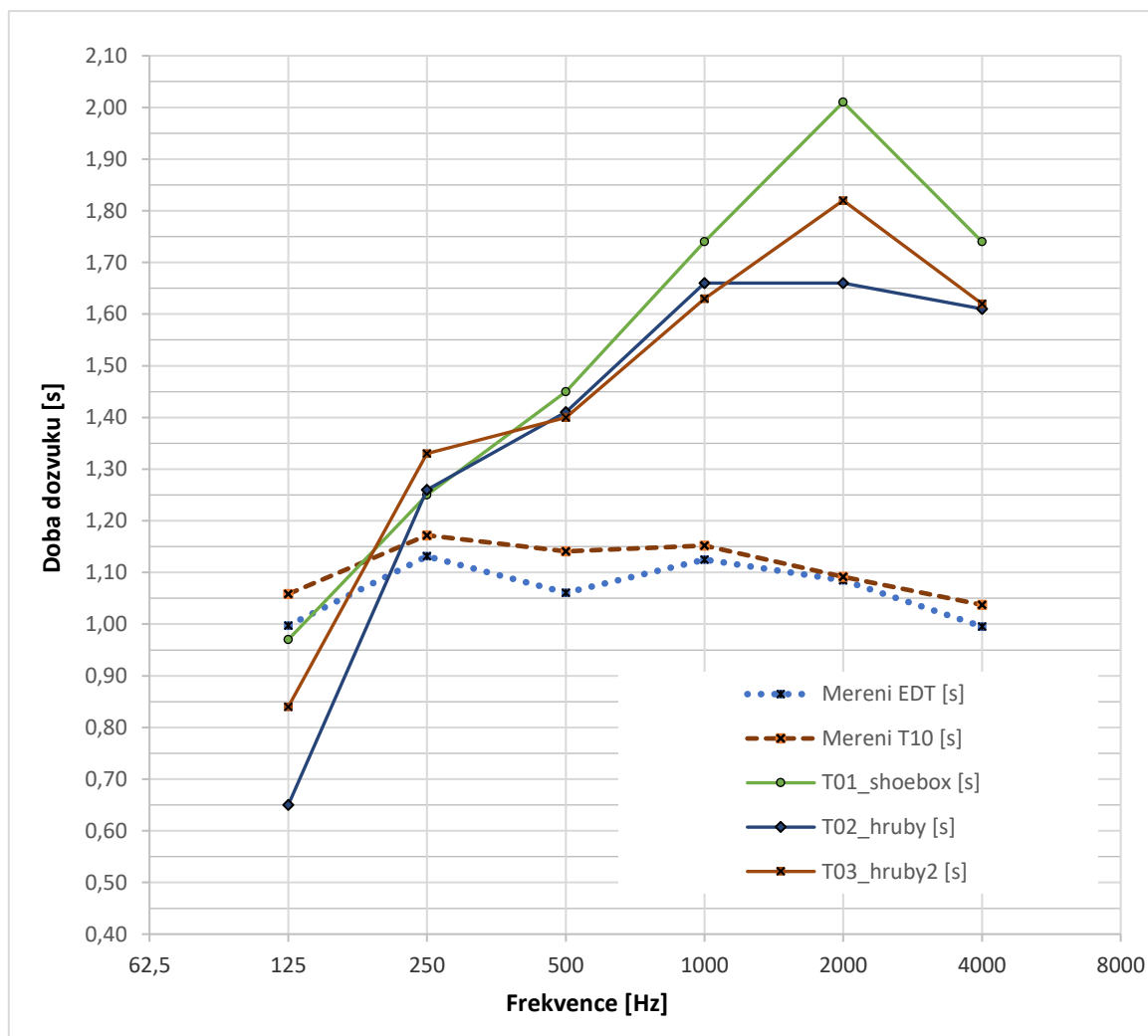
4.3.3 Srovnání modelů a reálné místnosti



Obrázek 47: Srovnání všech výsledků

Graf na obrázek 47 srovnává všechny výsledky modelů a hodnoty z měření (pro zjednocení výsledků byla doba dozvuku modelů vyhodnocována v oktávových pásmech nikoli v třetinooktávových, jak se udává v programu EASE). Takový graf vzhledem k množství dat působí nepřehledně, srovnání mezi jednotlivými modely se jeví jako lepší varianta. I tak ale lze jasně vidět velký rozdíl mezi některými výsledky. Je také vhodné připomenout, že primárním cílem této práce nebylo přiblížit se modelem reálným hodnotám doby dozvuku, nýbrž ukázat, kdy již není nutné modelovat podrobněji a přesněji. Přesto byl výběr materiálů proveden tak, aby výsledek co nejvíce odpovídal reálným hodnotám. Pro srovnání a diskusi nad výsledky byl vybrán z výše uvedených důvodů parametr *EDT* nebo T_{10} , se kterým se postupně budou porovnávat hodnoty ze simulace.

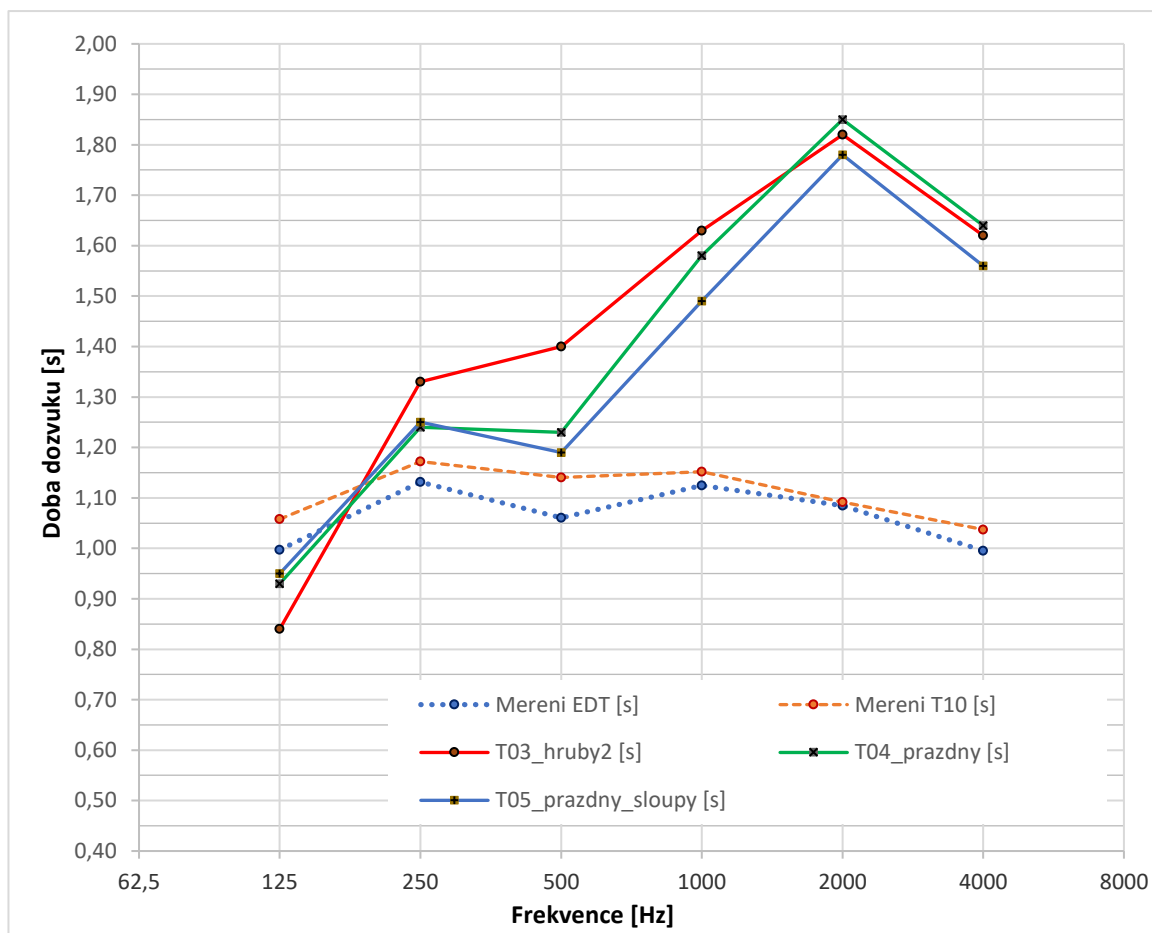
Jako první byly srovnány modely bez jakýchkoli detailů, a to první tři (model 1 – shoebox, model 2 – hrubý tvar (základ) a model 3 – hrubý tvar (pokročilý)). Na první pohled hned vidíme nedostatek všech tří modelů a sice nevyrovnanou dobu dozvuku přes frekvenční pásma. Například u prvního modelu pozorujeme poměrně vysokou dobu dozvuku přes dvě sekundy v pásmu 2000 Hz a zároveň dozvuk o délce bezmála jedné vteřiny v nízkých kmitočtech.



Obrázek 48: Srovnání č.1

Přítom pro takovou posluchárnu je normou stanovena optimální doba dozvuku 0,9 s společně s požadavkem vyrovnané doby dozvuku v podobě tolerančního pásma (norma ČSN [9]). Další dva modely zkracují dozvuk v pásmu 2000 Hz, ale i na nízkých frekvencích. Kromě uvedeného pásma však velké rozdíly mezi nimi nejsou. Změna, kterou přinesl třetí model tedy není tak zásadní, abychom již mohli určit, do jaké míry je tato modifikace směrodatná. Navíc se v tomto modelu zvětšil objem a tím se doba dozvuku také převážně prodloužila, byť jen o setiny sekundy.

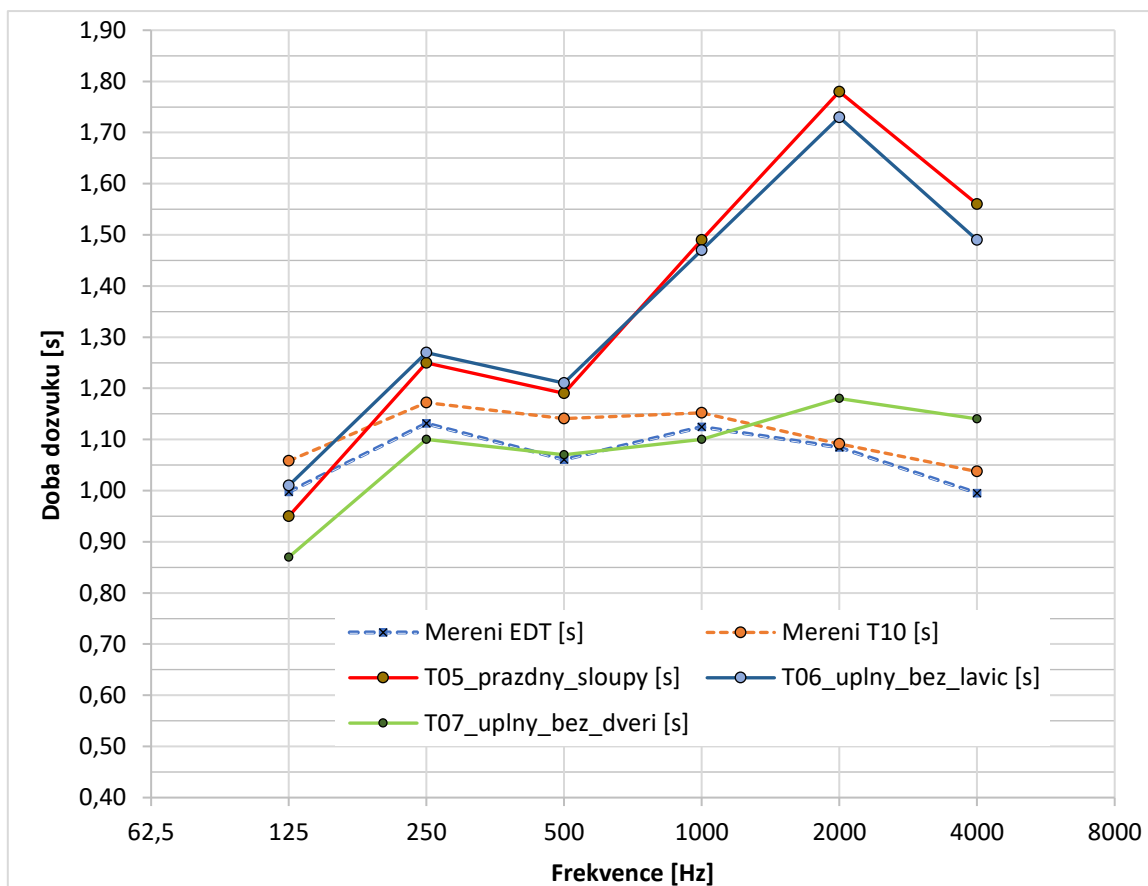
V dalším srovnání je vybrán model 4 - prázdná místnost bez přilehlých prostorů a sloupů a model 5 - prázdná místnost bez přilehlých prostorů se sloupy společně s posledním z předchozích, a to model 3 – hrubý tvar (pokročilý). Podobně jako v minulém případě ani tentokrát mezi modely velké změny nepozorujeme (především mezi modely 4 a 5), taková úprava, tedy přidání pouhých sloupů, nemění charakter doby dozvuku, pouze ji zkrátí o několik setin sekundy, maximálně o jednu desetinu.



Obrázek 49: Srovnání č.2

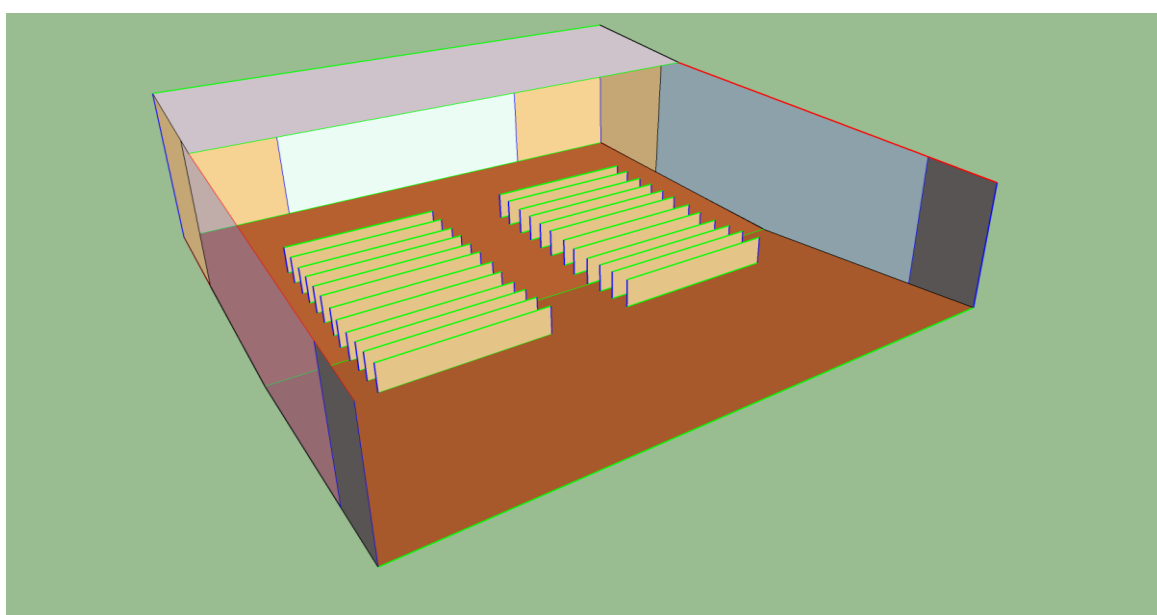
V nízkých kmitočtech je sice vidět drobné zlepšení, na vysokých nikoli, obzvláště v pásmu 2000 Hz, které se pro prázdnou místnost zdá problematické. V pásmu 500 Hz však detailnější model oproti hrubému tvaru přinesl zlepšení (zřejmě díky rezonátorům nastaveným na tuto frekvenci), a to téměř o dvě desetiny sekundy.

Následující porovnání už zahrnuje úplný model, tedy s přidavnými předními prostory a také poslední model, do kterého byly zakomponovány i sedačky. Přesto, že se díky přidání prostoru a tím i mírnému zvětšení celkového objemu dalo očekávat, že se doba dozvuku znatelně změní, oproti předešlému modelu to bylo jen v rámci několika setin sekundy. Graf také ukazuje, že průběhy modelů 5 a 6 jsou si velmi podobné. Až poslední model přinesl takovou změnu doby dozvuku, že vyhladila její průběh, který se nyní velmi podobá době dozvuku naměřené v posluchárně, včetně jejich hodnot. Přesto ale rozdíly činí až dvě desetiny sekundy a ve frekvenčním pásmu 125 Hz je rozdíl s parametrem T_{10} i tři desetiny. I tak ale lze říci, že takový model se nejvíce přiblížil reálné hodnotě, a především přinesl největší změnu. Je jasné, že zakomponování sedaček způsobilo takovou změnu, jelikož se tím přidává značná plocha pro odrazy i absorpci.



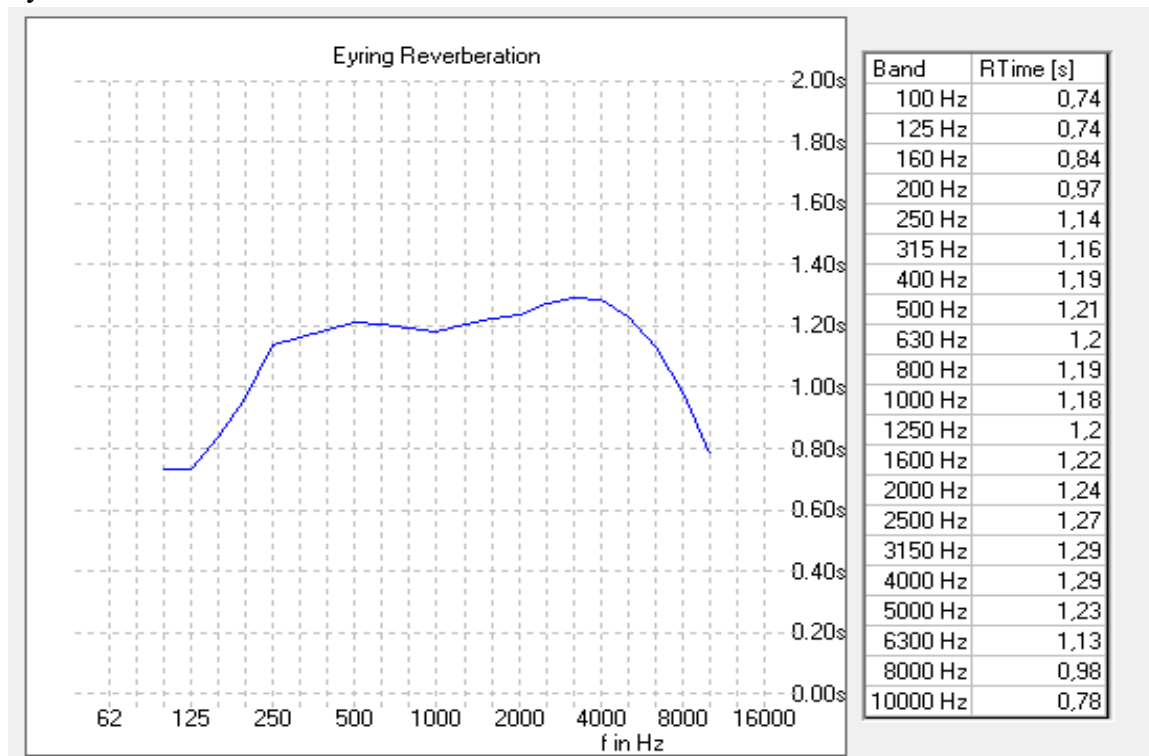
Obrázek 50: Srovnání č.3

Hned se nabízí varianta jednoduššího modelu s přidáním právě sedaček. Proto se i v závěrečné fázi této diplomové práce dodatečně vytvořil nový model vycházející z modelu č. 2, tedy téměř nejjednoduššího a bez detailů. Do modelu se vložilo dvanáct řad sedaček na obou stranách. Další modifikace provedeny již nebyly.

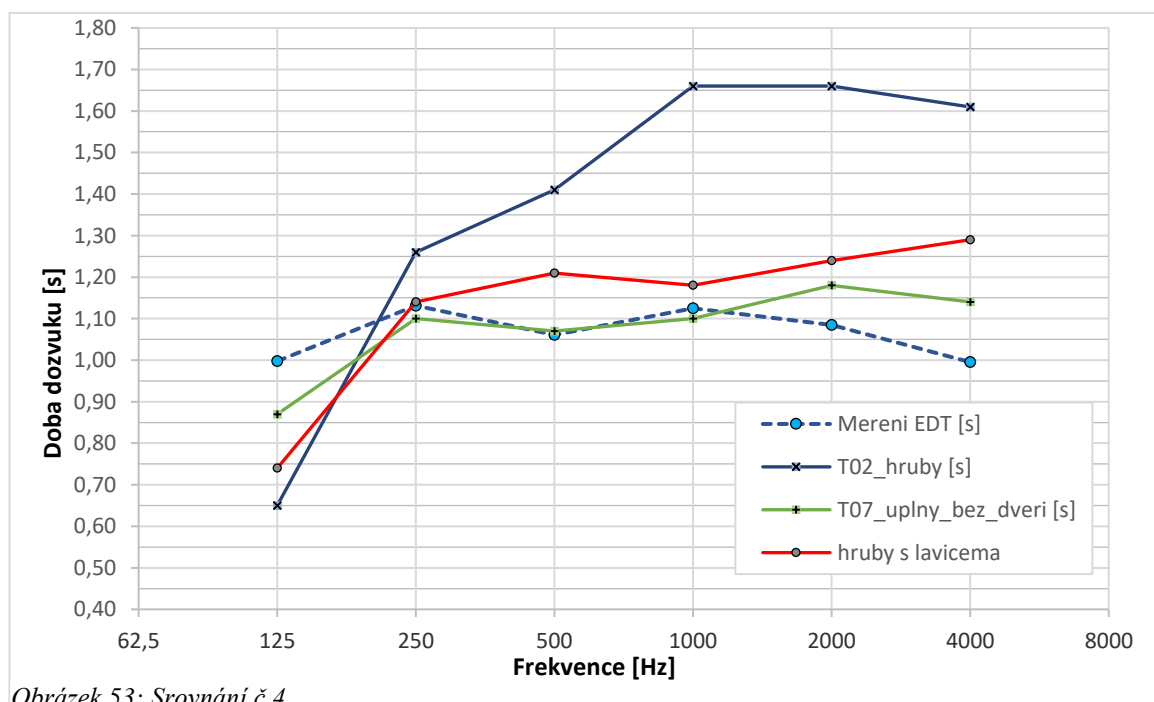


Obrázek 51: Dodatečný model (č.8 – hrubý model s přidáním laviček)

Objem tohoto modelu se pochopitelně nezměnil, výrazně se však změnila efektivní plocha a to z 754 m² na 905 m². Doba dozvuku se oproti původnímu modelu č. 2 značně liší, v některých pásmech i o 0,4 s. Na první pohled to může být překvapující, jelikož hodnoty pro původní model byly mnohem vyšší, podíváme-li se ale na definici výpočtu doby dozvuku, vidíme, že taková změna efektivní plochy musí mít výrazný vliv na výsledek.

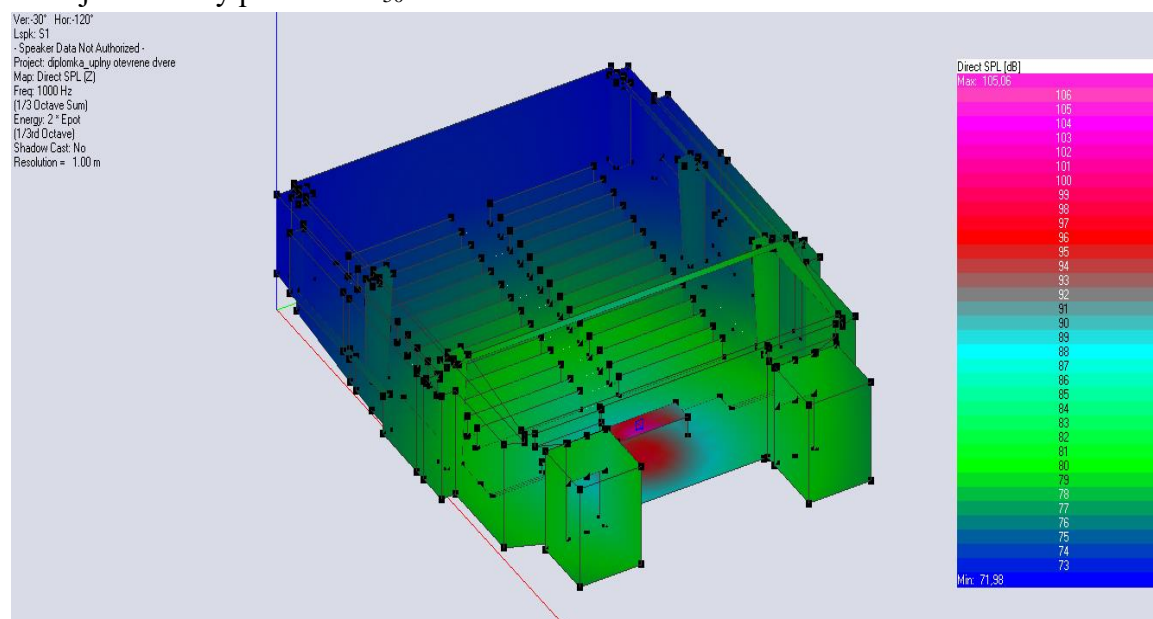


Obrázek 52: Model 8(hrubý s lavicema) – doba dozvuku (EASE)



Obrázek 53: Srovnání č.4

Na obrázek 53 lze vidět, jak se doba dozvuku posledního modelu nejen změnila oproti modelu č. 2, ale také se výrazně přiblížila reálné době dozvuku, podobně jako u modelu č. 7. Navíc je její průběh více vyhlazený, ve srovnání s předchozími neúplnými modely. Doba dozvuku na nízkých kmitočtech se mírně prodloužila a v pásmech od 500 Hz výše se znatelně zkrátila. Takový výsledek nám může ukázat, že i přes nedokonalý a nepřesný model je možné se přiblížit reálným hodnotám ve chvíli, kdy zakomponujeme hlavní velké plochy s příslušnými materiály. Detaily jako menší plošky, rohy, schůdky apod. nejsou tak určující pro výslednou dobu dozvuku, to však nemusí být vzhledem k definici jejího výpočtu tak překvapivé. Samozřejmě nelze takový závěr učinit jen s použitím jednoho parametru doby dozvuku, na který se tato práce zaměřila, přestože je tím nejdůležitějším a nejvíce určujícím parametrem objektivního posuzování akustiky místností. Pro jistější a lepší výsledky by bylo vhodné udělat rozsáhlejší studii, která zahrne jak více místností, tak více kombinací modelů stejně tak jako použití více parametrů (např. míra zřetelnosti C_{50} pro konkrétní místa v posluchárně). Navíc jako vhodný doplněk takové studie by mohlo být i tzv. mapování modelu, které též v sobě software EASE zahrnuje. Takový modul nasimuluje zvukové pole s ohledem na konkrétní příznak jako je hladina akustického tlaku nebo již zmíněný parametr C_{50}



Obrázek 54: Příklad mapování zvukového pole (Sound Pressure Level SPL – hladina akustického tlaku); modul EYES v programu EASE

5 Závěr

Tato práce se zabývala problematikou prostorové akustiky, modelování akustiky v místnostech a porovnáním modelů s reálnými místnostmi. Pro srovnávání byl vybrán jeden z hlavních parametrů charakterizující akustiku uzavřeného prostoru, a to doba dozvuku, která nejlépe objektivně popisuje místnost z hlediska akustických vlastností. Úkolem bylo namodelovat dvě vybrané místnosti, jednu z toho v několika stupních přesnosti modelu, určit dobu dozvuku a následně srovnat s reálnou změřenou hodnotou. Pro modelování byly pro tuto práci vybrány dva modelovací softwary, a to SketchUp pro základní hrubé modely, které se dále upravovaly v programu EASE pro akustické simulace.

První místností byla vybrána učebna 554 v dejvickém kampusu FEL, na které se mělo především vyzkoušet si modelování v akustickém programu EASE a prozkoumat jeho možnosti. Byl vytvořen poměrně detailní model se zakomponováním většiny nábytku. Jak pro nábytek, tak i pro stěny, okna a dveře byly zvoleny materiály s příslušným absorpčním koeficientem odpovídajícím reálným plochám v učebně. Dále bylo v této místnosti za pomoci programu EASERA provedeno akustické měření pro určení doby dozvuku. Pro celkové vyhodnocení všech výsledků se vytvořil skript v prostředí MATLAB. Při srovnání pozorujeme odchylky modelové doby dozvuku až o čtyři desetiny sekundy. To ovšem neznamená nutně nepoužitelnost modelu. Tyto rozdíly od reálné místnosti v něm vznikají kvůli např. nepřesným hodnotám koeficientu pohltivosti pro daný materiál nebo nábytku, který nebyl do modelu zakomponován.

Pro hlavní část této práce byla určena posluchárna D3-309. I v tomto případě byly pro vytvoření modelu použity oba již zmíněné programy. Namodelováno bylo celkem sedm variant s různým důrazem na detail od nejprimitivnějšího modelu po nejkomplexnější. Pro každý z modelů byly použity materiály, které odhadem odpovídaly materiálům v reálné místnosti. Dále se také provedlo akustické měření v posluchárně v několika pozicích mikrofónu pro zamezení nepřesnosti průměrováním. Pro vyhodnocení byl opět napsán skript, který z měřicích dat a hodnot z modelů sestaví tabulku pro následné zpracování výsledků. Následovalo samotné porovnávání. Srovnalo se postupně vždy několik modelů. Z výsledků a grafů je vidět, že při každém porovnání (především podobných modelů) nenastávají výrazné změny v době dozvuku, jak by se dalo očekávat, výjimkou bylo srovnávání modelů s posledním úplným modelem, který obsahoval vše včetně dřevěných laviček. Výsledek tohoto srovnání ukázalo, že přidání dalších detailů a zpřesnění reliéfu ploch není tolik významné pro změnu doby dozvuku. Na opačnou stranu přidání nebo

změna velkých ploch významně ovlivní dobu dozvuku, což vyplývá i z výpočetního vztahu. Z něj vidíme, že i přidání dalšího objemu má vliv na výsledek, ovšem v případě této posluchárny připojení přídavných místností u vchodů nemělo tak velký dopad, jako např. vložení lavic (viz obrázek 51). Díky tomuto poznatku se následně vytvořil ještě jeden model, který byl bez detailů, tedy obsahoval pouze hrubé plochy bez jakéhokoliv reliéfu s přidáním lavic do oblasti určené k sezení posluchačů. To přineslo zajímavé výsledky, jelikož doba dozvuku tohoto modelu se snížila a značně se přiblížila reálné hodnotě i té z posledního modelu č.7. Porovnání nového a předchozího modelu (obrázek 53) jen potvrdilo předešlou myšlenku, že samotné detaily neovlivní dobu dozvuku tak, jako výrazné změny velkých ploch, ať už vlastní vložení nebo výběr materiálu.

Uvedené výsledky ukazují, že pro shodu v hodnotách doby dozvuku mezi simulací a reálnou místností není vždy nutné vytvářet co nejpřesnější model. Jak bylo možné vidět v posledním srovnání, i hrubý model může být dostatečný. Je nezbytné však zakomponovat všechny velké plochy a objemy a také správně určit materiály a tím i koeficient pohltivosti. Právě absorpce, tedy součin plochy a koeficientu pohltivosti, tak silně ovlivní dobu dozvuku. Chyby, které vnášejí do modelu drobné nepřesnosti v samotné struktuře a reliéfu modelu, nejsou tak zásadní, neboť neovlivňují výsledek tak, jako výběr materiálu. Při změně koeficientu pohltivosti pro velkou plochu, byť jen o malé hodnoty, se totiž doba dozvuku výrazně změní. Proto je velmi důležité určit co nejpřesněji použitý materiál, což není vždy lehká úloha, a to ani v případě katalogových údajů, kdy se můžou projevit nejistoty měření koeficientu. Následkem toho se naměřené hodnoty činitele pohltivosti mohou od reálné lišit i o několik procent a v případě velkých ploch to může znamenat znatelný rozdíl ve výsledné době dozvuku modelu.

Přestože, doba dozvuku je pro objektivní posuzování jeden z nejdůležitějších parametrů, pro lepší a přesnější srovnání modelu a reálné místnosti by bylo vhodné použít i další parametry, např. míra zřetelnosti, míra jasnosti nebo STI (Speech transmission index – index přenosu řeči), to bylo ovšem již nad rámec této práce. Tyto parametry lze společně s dobou dozvuku vyhodnotit i pro různé body v místnosti, což by mohlo dát pro některé druhy místností lepší výsledky. Důležité je i použití subjektivních parametrů a hodnocení. Zajímavým prvkem by pro posouzení modelu mohla být možnost auralizace, kdy lze z modelu extrahovat impulsní odezvu a pomocí konvoluce si poslechnout jakýkoli zvuk v namodelované místnosti. V případě, kdy by model byl vytvořen podle reálné místnosti, lze vzájemně srovnat jejich impulsní odezvy, použít auralizaci nebo také subjektivně srovnat nahraný zvuk v místnosti s výsledkem auralizace z modelu. Vhodným

rozšířením této práce by také mohla být rozsáhlejší studie, která by testovala více místností o různé složitosti i velikosti s více modely za použití různých parametrů včetně mapování jejich průběhů v prostoru za použití i jiných simulačních softwarů. Tato práce sice naznačuje, že není nutné vždy stavět dokonale přesný model, abychom dosáhly dobrých výsledků a všechny výše uvedené možnosti by mohly tento fakt potvrdit, je pochopitelné, že v praxi je často žádané (např. zákazníkem), aby model byl precizní jak ve stavbě, tak i ve výběru materiálů, a tak plně odpovídal reálné místnosti. Prokázala by hlubší studie, že zahrnutí detailů do modelu ovlivní dobu dozvuku (či jiné parametry) jen v zanedbatelné míře, mohlo by to z dlouhodobého hlediska znamenat mj. úsporu prostředků jak ekonomických, tak personálních, což je v oboru, který se neustále rozšiřuje, bezesporu vítané.

6 Použitá literatura

- [1] KOLMER, Felix a Kyncl, Jaroslav. *Prostorová akustika*. 2. nezm. vyd. Praha. Státní nakladatelství technické literatury, 1982. str. 244 s. ISBN 04-526-82.
- [2] Kuttruff, Heinrich. *Room Acoustics*, Fourth edition. Londýn. Taylor & Francis e-Library, 2001. ISBN 0-203-18623-0.
- [3] EASE Software. *EASE 4.3 User's Guide & Tutorial*. <http://ease.afmg.eu/>. [Online] 2009. Version 4.3.6, dostupné z URL:
http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASE/EASE_4.3_Tutorial_English.pdf. [vid. 2.3.2019]
- [4] AFMG Technologies GmbH. *EASERA Tutorial* <http://easera.afmg.eu/>. [Online] 2012. Version 1.2, dostupné z URL:
http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASERA12/EASERATutorial_EN.pdf [vid. 28.4.2019]
- [5] Everest, F. Alton. *The Master Handbook of ACOUSTICS* 4. vydání. USA, The McGrawHill Companies Inc, 2001, 641 s., ISBN 0-07-139974-7
- [6] Berdan, Eugeniu. *Úprava akustiky malé místnosti*, Bakalářská práce. Praha. Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Dr. Ing. Libor Husník, 2017.
- [7] ČSN EN ISO 3382-1, *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*, 2009
- [8] ČSN EN ISO 3382-2, *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*, 2009
- [9] ČSN 73 0527, *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*, 2005
- [10] ČSN 73 0525, *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*, 1998
- [11] KADLEC, František. *Zpracování akustických signálů*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2005, 189 s., ISBN 80-01-02588-8
- [12] Wikipedia. *Maximum length sequence*. Wikipedia.org [online] (CC-BY-SA). Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_length_sequence [vid. 21.3.2019]

[13] Syrový, Václav. *Hudební akustika*, 3. doplněné vydání. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.

[14] SCHIMMEL, Jiří. *Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření – přednáška* [online]. 2015. Dostupné z URL:

<http://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni> [vid. 10.3.2019]

[15] NOVÁČEK, Filip. *Úprava akustiky učebny*. Bakalářská práce. [online] Praha 2016. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Dr. Ing. Libor Husník. Dostupné z URL: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64698/F3-BP-2016-Novacek-Filip-uprava_akustiky_ucebny.pdf?sequence=-1 [vid. 20.3.2019]

[16] RYŠAVÝ, Marek. *Modelování akustiky uzavřených prostorů paprskovou metodou*. Bakalářská práce. [online] Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Michal Trzos. Dostupné z URL:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69013

[vid. 20.3.2019]

[17] MARTIN, Martin. *Akustika malých prostorů*. Bakalářská práce. [online] Brno 2016. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D. Dostupné z URL:

https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/60599/MartinMartin165029!Akustika_malych_prostor.pdf?sequence=1 [vid. 20.3.2019]

[18] Anon. *Akustika*. Prezentace [online] Dostupné z URL: <http://slideplayer.cz/slide/7038299/> [vid. 10.3.2019]

[19] Wikipedia. *Helmholtz resonance*. *Wikipedia.org* [online] (CC-BY-SA). Dostupné z URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_resonance [vid. 10.3.2019]

[20] REICHL, Jaroslav – VŠETIČKA, Martin. *Odrážení zvuku, pohlcování zvuku*. Encyklopedie fyziky [online] © 2006–2019. Dostupné z URL:

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/197-odraz-zvuku-pohlcovani-zvuku>

[vid. 10.3.2019]

[21] REICHL, Jaroslav – VŠETIČKA, Martin. *Kmitající membrány a desky*. Encyklopedie fyziky [online] © 2006–2019. Dostupné z URL:

<http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/1197-kmitajici-membrany-a-desky>

[vid. 10.3.2019]

[22] Anon. Расчет времени реверберации помещения. [online]. Dostupné z URL: <http://poznayka.org/s2358t1.html> [vid.20.4.2019]

7 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1: Princip zrcadlení zdroje.....	15
Obrázek 2: Zvukové pole v uzavřené místnosti.....	17
Obrázek 3: Rozdělení zvukové energie při dopadu vlny na překážku [20].....	19
Obrázek 4: Příklad zobrazení závislosti činitele pohltivosti na frekvenci.....	20
Obrázek 5: Definice doby dozvuku.....	22
Obrázek 6: Ilustrace závislosti doby dozvuku na frekvenci.....	23
Obrázek 7: EASE – Hlavní pracovní plocha.....	26
Obrázek 8: Ukázka nástroje pro modelování v EASE.....	26
Obrázek 9: Nastavení místnosti (EASE).....	27
Obrázek 10: Nastavení stěny v EASE.....	28
Obrázek 11: Ukázka výběru materiálu v EASE.....	29
Obrázek 12: Blokové schéma zapojení standardní metody měření doby dozvuku.....	31
Obrázek 13: Znázornění přepočtů doby dozvuku (T_{30}).....	32
Obrázek 14: Blokové schéma generátoru MLS signálu.....	33
Obrázek 15: Příklad impulsní odezvy.....	34
Obrázek 16: Dozvukový pokles – Schroederova křivka.....	34
Obrázek 17: Místnost 554 – pohled zezadu.....	36
Obrázek 18: Ilustrace modelu místnosti 554 v software SketchUp.....	37
Obrázek 19: Upravený model učebny 554 v software EASE.....	37
Obrázek 20: Doba dozvuku v EASE.....	38
Obrázek 21: Vybrané body pro měření impulsové odezvy.....	39
Obrázek 22: Srovnání doby dozvuku pro měření a simulaci v modelu (MATLAB).....	39
Obrázek 23: Posluchárna 309 – pohled zhora.....	41
Obrázek 24: Posluchárna 309 – pohled zezadu.....	42
Obrázek 25: Posluchárna 309.....	42
Obrázek 26: Model 1 – shoebox (horní pohled).....	44
Obrázek 27: Model 1 – shoebox (pohled od katedry).....	44
Obrázek 28: Model 1 – doba dozvuku (EASE).....	45
Obrázek 29: Model 2 – hrubý tvar (pohled zepředu).....	45
Obrázek 30: Model 2 – hrubý tvar (pohled z boku).....	46
Obrázek 31: Model 2 – doba dozvuku (EASE).....	46
Obrázek 32: Model 3- hrubý tvar (pokročilé).....	47
Obrázek 33: Model 3 – doba dozvuku (EASE).....	48
Obrázek 34: Model 4.....	48
Obrázek 35: Model 4 – pohled zepředu a z boku.....	49
Obrázek 36: Model 4 – doba dozvuku (EASE).....	50
Obrázek 37: Model 5.....	50

Obrázek 38: Model 5 – pohled zepředu	51
Obrázek 39: Model 5 – doba dozvuku (EASE)	51
Obrázek 40: Model 6	52
Obrázek 41: Model 6 – pohled z boku	53
Obrázek 42: Model 6 – doba dozvuku (EASE)	53
Obrázek 43: Model 7	54
Obrázek 44: Model 7 – EASE	54
Obrázek 45: Model 7 – doba dozvuku	55
Obrázek 46: Pozice měření posluhárny 309	56
Obrázek 47: Srovnání všech výsledků	58
Obrázek 48: Srovnání č.1	59
Obrázek 49: Srovnání č.2	60
Obrázek 50: Srovnání č.3	61
Obrázek 51: Dodatečný model (č.8 – hrubý model s přidáním laviček)	61
Obrázek 52: Model 8(hrubý s lavicema) – doba dozvuku (EASE)	62
Obrázek 53: Srovnání č.4	62
Obrázek 54: Příklad mapování zvukového pole	63
Tabulka 1: Výsledné zprůměrované naměřené hodnoty doby dozvuku	40
Tabulka 2: Přehled vytvořených modelů	56
Tabulka 3: Příklad výsledků z měření posluhárny 309	57

8 Přílohy

Seznam příloh:

A: MATLAB skripty (vyhodnocení výsledků)

B: Srovnání modelů – obrázek

C: Elektronická příloha - CD s naměřenými daty, modely ve SketchUp a EASE, obrázky modelů a textem v elektronické podobě

A

„reverbTime554.m“

```
clear all, clc, close all;
%% nactení dat z textových souboru txt
opts = detectImportOptions('1.txt'); %určení parametru importu
opts.Delimiter = '\t'; %oddelovac
% data jsou pojmenována jako "cislo.txt" kde cislo je 1-25
for i = 1:25
    filename = [num2str(i) '.txt'];
    T = readtable(filename, opts);
    % a = importdata('1.txt', '\t')
    data = table2array(T(:, 2:9));
    data = strrep(data, ',', '.');
    EDT(i, :) = str2num(char(data(1, :)))';
    T10(i, :) = str2num(char(data(2, :)))';
    T20(i, :) = str2num(char(data(3, :)))';
    T30(i, :) = str2num(char(data(4, :)))';
end
%% vypocet prumerne doby dozvuku
EDTmean = mean(EDT); %prumerovani hodnot ze vsech mereni
T10mean = mean(T10);
T20mean = mean(T20);
T30mean = mean(T30);
T_EASE_bezlavice = [1.13 1.47 1.53 1.89 2.08 1.39];
T_EASE_lavice = [0.78 1.04 1.1 1.42 1.59 1.11];
t_nazvy = {'EDT [s]'; 'T10 [s]'; 'T20 [s]'; 'T30 [s]'; 'T_EASE [s]'};
T_celkove = [EDTmean(1:6); T10mean(1:6); T20mean(1:6); T30mean(1:6);
T_EASE_lavice];
f = [125 250 500 1000 2000 4000];
T_tabulka = [t_nazvy num2cell(T_celkove)];
T_tabulka{6,1} = 'Frekvence f [Hz]';
T_tabulka(6,2:7) = num2cell(f);
xlswrite('RT_vysledky554', T_tabulka);
%% grafy
figure(1)
osax = 1:6;
% f = string(f);
plot(osax, EDTmean(1:6), '-x', 'Color', 'b')
title('Doba dozvuku - zprumerovana hodnota')
xticks([1:6])
xticklabels(f)
```

```

ylim([0.5 2.1]);
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Doba dozvuku T [s]')
grid on;
grid minor;
hold on;
plot(osax,T10mean(1:6),'-o')
plot(osax,T20mean(1:6),'-*','Color','r')
plot(osax,T30mean(1:6),'-+')
plot(osax,T_EASE_bezlavic,'-x','LineWidth',2)
plot(osax,T_EASE_lavice,'-+', 'LineWidth',2)
legend('EDT','T10','T20','T30','T EASE bez lavic','T EASE s
lavicemi')
hold off;

```

„reverTime309.m“

```

clear all,clc,close all;
%% nactení dat z textových souboru txt
opts = detectImportOptions('1.txt');%určení parametru importu
opts.Delimiter = '\t'; %oddelovac
% data jsou pojmenována jako "cislo.txt" kde cislo je 1-15
for i = 1:15
    filename = [num2str(i) '.txt'];
    T = readtable(filename,opts);
    data = table2array(T(:,2:9));
    data = strrep(data,',','.');
    EDT(i,:) = str2num(char(data(1,:)))';
    T10(i,:) = str2num(char(data(2,:)))';
    T20(i,:) = str2num(char(data(3,:)))';
    T30(i,:) = str2num(char(data(4,:)))';
end
%% vyřazení nemyslných výsledků
% prah byl nastaven na dvě vteřiny, vím že doba dozvuku není
v této místnosti delší než dvě vteřiny (pokud se trefím do modu,
jen to znesnadní výpočet, ale spis kvůli špatnému SNR
[a_radky,b_sloupky] = find(EDT(:,1:6)>2);
a_radky = unique(a_radky);
EDT(a_radky,:) = [];

[a_radky,b_sloupky] = find(T10(:,1:6)>2);
a_radky = unique(a_radky);
T10(a_radky,:) = [];
[a_radky,b_sloupky] = find(T20(:,1:6)>2);
a_radky = unique(a_radky);
T20(a_radky,:) = [];
[a_radky,b_sloupky] = find(T30(:,1:6)>2);
a_radky = unique(a_radky);
T30(a_radky,:) = [];
%% přepočítání pro zavřené dveře
for j = 1:3
    filename_bez = ['dverebojizavrene' num2str(j) '.txt'];
    T_bez = readtable(filename_bez,opts);
    databezdveri = table2array(T_bez(:,2:9));
    databezdveri = strrep(data,',','.');
    EDTbezdveri(j,:) = str2num(char(data(1,:)))';

```



```

    T10bezdveri(j,:) = str2num(char(data(2,:)))';
    T20bezdveri(j,:) = str2num(char(data(3,:)))';
    T30bezdveri(j,:) = str2num(char(data(4,:)))';
end
%% vycet prumerne doby dozvuku
EDTmean = mean(EDT);%prumerovani hodnot ze vsech mereni
T10mean = mean (T10);
T20mean = mean (T20);
T30mean = mean (T30);
T_EDT_bezdveri = mean(EDTbezdveri);
T01_shoebox = [.97 1.25 1.45 1.74 2.01 1.74];
T02_hruby = [.65 1.26 1.41 1.66 1.66 1.61];
T03_hruby2 = [.84 1.33 1.40 1.63 1.82 1.62];
T04_prazdny = [.93 1.24 1.23 1.58 1.85 1.64];
T05_prazdny_sloupy = [.95 1.25 1.19 1.49 1.78 1.56];
T06_uplny_bez_lavic = [1.01 1.27 1.21 1.47 1.73 1.49];
T07_uplny_bez_dveri = [.87 1.10 1.07 1.10 1.18 1.14];
T07_uplny_dvere = [.87 1.13 1.12 1.16 1.23 1.23]; %hodnoty
z EASE...
... EASE dava vysledky v tretinoktavach ne v oktavach
t_nazvy= {'EDT [s]';'T10 [s]';'T20 [s]';'T30
[s]';'EDTbezdveri[s]';'T01_shoebox [s]';'T02_hruby [s]';
'T03_hruby2 [s]';'T04_prazdny [s]';
'T05_prazdny_sloupy [s]';'T06_uplny_bez_lavic [s]';
'T07_uplny_bez_dveri [s]'; 'T07_uplny_dvere [s]'};
T_celkove = EDTmean(1:6);T10mean(1:6);T20mean(1:6);T30mean(1:6);
T_EDT_bezdveri(1:6);T01_shoebox;T02_hruby;T03_hruby2;T04_prazdny;
T05_prazdny_sloupy; T06_uplny_bez_lavic; T07_uplny_bez_dveri;
T07_uplny_dvere];
f = [125 250 500 1000 2000 4000];
T_tabulka = [t_nazvy num2cell(T_celkove)];
T_tabulka{14,1} = 'Frekvence f [Hz]';
T_tabulka(14,2:7) = num2cell(f);
xlswrite('RT_vysledky309',T_tabulka);
%% grafy
figure(1)
osax = 1:6;
plot(osax,EDTmean(1:6),'-x','Color','b')
title('Doba dozvuku - zprumerovana hodnota')
xticks([1:6])
xticklabels(f)
ylim([0.5 2.1]);
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Doba dozvuku T [s]')
grid on;
grid minor;
hold on;
plot(osax,T10mean(1:6),'-o')
plot(osax,T20mean(1:6),'-*','Color','r')
plot(osax,T30mean(1:6),'-+')
plot(osax,T07_uplny_bez_dveri,'-x','LineWidth', 2)
plot(osax,T07_uplny_dvere,'-+', 'LineWidth', 2)
legend('EDT','T10','T20','T30','T EASE uplny bez dveri','T EASE
uplny s dvermi')
hold off;

```

B



