



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole**

Bakalářská práce

Akustické modelování v systému ODEON

Radek Wágner

Leden 2024

Vedoucí práce: Ing. Marek Brothánek, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Wágn**er Jméno: **Radek** Osobní číslo: **491911**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akustické modelování v systému ODEON

Název bakalářské práce anglicky:

Room Acoustics Modeling in the ODEON Software

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s objektivními parametry používanými v prostorové akustice. V prostředí ODEON vytvořte model prostoru posluchárny (dle upřesnění vedoucího práce) a následně proveďte jeho akustické analýzy. Základem budou dvě geometricky shodné posluchárny s odlišnými akustickými úpravami. Dejte důraz na akustické vlastnosti použitých materiálů. Zaměřte se dále na způsoby modelování obsazenosti prostoru. Výsledky vyhodnoťte graficky s využitím možností vizualizace programem ODEON. Pro vyhodnocení použijte vhodné objektivní parametry včetně činitele přenosu řeči STI. Výsledky dále zhodnoťte z pohledu požadavků doporučení ČSN 73 0525, ČSN 73 0527 a DIN 18041.

Seznam doporučené literatury:

- [1] SAVIOJA, Lauri; SVENSSON, U. Peter: Overview of geometrical room acoustic modeling techniques, The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, Vol. 138, Issue 2, 708–730, ISSN 0001-4966, dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.4926438>, [cit. 11. 1. 2023].
- [2] KUTTRUFF, Heinrich: Room acoustics. Crc Press, 2016, ISBN 0-419-24580-4.
- [3] HAK, C. C. J. M.; WENMAEKERS, R. H. C.; VAN LUXEMBURG, L. C. J.: Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters, Acta Acustica united with Acustica, 2012, Vol. 98, Number 6, 907–915, ISSN 1610-1928, dostupné z: <https://doi.org/10.3813/AAA.918574>, [cit. 11. 1. 2023].

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Marek Brothánek, Ph.D. katedra fyziky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **02.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Marek Brothánek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych předně poděkovat mému vedoucímu, panu Ing. Marku Brothánkovi, Ph.D., za jeho podporu, trpělivost a přínosné konzultace, které mi pomohly tuto práci dokončit.

Dále bych chtěl poděkovat rodičům a blízkým kamarádům za jejich morální podporu, kterou jsem potřeboval.

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.

V Praze dne 9. 1. 2024

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce se zabývá popisem a následnou simulací prostorové akustiky. V teoretickém úvodu jsou popsány základní principy a veličiny akustiky a jejich význam. Dané veličiny lze taktéž simulovat za pomoci různých softwarů, čemuž se věnuje následující kapitola. Zde jsou popsány principy, jak simulace probíhají. Poté je věnována kapitola konkrétnímu softwaru ODEON, který sloužil jako pracovní nástroj této práce, kde bylo cílem simulovat různé stavy obsazenosti prostoru dvou podobných přednáškových místností. V práci jsou zmíněné kroky, které byly potřebné k dosažení výsledků.

Klíčová slova: ODEON, prostorová akustika, obsazenost, simulace posluchače

This work deals with the description and subsequent simulation of room acoustics. The theoretical introduction describes acoustics' basic principles and quantities and their meaning. The given quantities can also be simulated with the help of various software, which is covered in the following chapter. The principles of how the simulations work are described here. Then, a chapter is devoted to the specific software ODEON, which served as a working tool for this work, where the goal was to simulate different states of occupancy of the room of two similar lecture rooms. The work mentions the steps that were necessary to achieve the results.

Keywords: ODEON, room acoustics, occupancy, listener simulation

Title translation: Room Acoustics Modeling in the ODEON Software

/ Obsah

1 Úvod	1
2 Teorie zvuku a akustiky	2
2.1 Zvuk	2
2.2 Akustické veličiny charakterizující akustiku prostoru	3
2.2.1 Doba dozvuku	3
2.2.2 Další parametry vyhodnotitelné z impulsových odezvy	5
2.2.3 Parametry vhodné pro popis velkých prostorů	6
2.2.4 Index přenosu řeči	7
2.3 Akustické vlastnosti materiálů prostředí	7
2.4 Obsazenost	8
3 Simulace ve virtuálním prostředí	12
3.1 Numerické metody	12
3.2 Ray Tracing	12
3.3 Image Source	13
3.4 Beam Tracing	15
3.5 Hybridní metody	15
3.5.1 Příklady konkrétních softwarů	15
4 Odeon	17
4.1 Princip modelování v Odeonu	17
4.2 Vytvoření modelu a jeho nastavení	18
4.3 Rychlá vyhodnocení	19
4.3.1 Quick Estimate	19
4.3.2 Global Estimate	19
4.4 Vyhodnocení pro konkrétní pozice	19
5 Simulace obsazenosti	21
5.1 Popis místností	21
5.2 Vytvoření modelů	23
5.3 Nastavení parametrů pro simulaci	24
5.4 Simulace variant s rozdílnou obsazeností	25
6 Závěr	28
Literatura	29
A Přílohy bakalářské práce	31

Tabulky / Obrázky

2.1	Pohltivost materiálů	8	2.1	Křivka poklesu hladiny akustického tlaku.....	3
2.2	Pohltivost jednotlivého posluchače dle Kuttrufa	9	2.2	Závislost optimální doby dozvuku	4
2.3	Pohltivost jednotlivého posluchače dle ČSN	10	2.3	Toleranční pásmo doby dozvuku	5
2.4	Pohltivost jednotlivého posluchače dle dopočtení z měřených dat	10	3.1	Názorná ukázka Ray Tracingu .	13
2.5	Pohltivost jednotlivého posluchače- dle DIN.....	11	3.2	Názorná ukázka Image source metody	14
5.1	Pohltivost materiálů v přednáškových místnostech.....	25	5.1	Fotografie zkoumaných místností	21
5.2	Výsledné hodnoty ze simulace místnosti 132	27	5.2	Model učebny 132.....	22
5.3	Výsledné hodnoty ze simulace místnosti 135	27	5.3	Obložení stěn v místnosti 132 .	22
5.4	Výsledné hodnoty STI pro místnosti 135	27	5.4	Ukázka modelu posluchače	23
			5.5	Model obsazeného sálu dle Odeonu	24
			5.6	Porovnání hodnoty STI mezi místnostmi 132 a 135	26
			5.7	Porovnání hodnoty STI mezi prázdnými místnostmi 132 a 135	26
			5.8	Porovnání hodnoty STI mezi modely místnosti 135	26

Kapitola 1

Úvod

Akustika prostorů kolem nás, ve kterých se pohybujeme, působí nejen na zvuk a jeho šíření, ale hlavně na to jak následně na nás působí. Zvuk může být takto ovlivněn jak pozitivně tak negativně. Úkolem akustiky je popsat fyzikální parametry takového šíření, abychom mohli nezávisle na subjektivním pozorování zhodnotit takovéto podmínky.

Jedním z vlivů, na kvalitu prostoru, je i obsazenost prostoru, tedy jak velké množství lidí se zde nachází. Jak bylo již zjištěno mnohými měřeními [1], tak s přidáním dojde ke zlepšení akustických vlastností. To jakým způsobem takto modelovat jednotlivé osoby v přednáškovém sále, nebo obecně prostoru, kde posluchač má předem stanovené místo k sezení, se mi nepodařilo najít. Nejčastěji dochází k dopočtení hodnot pro obsazené prostory z dat popisující prázdný prostor.

V této práci byla provedena rešerše k jednotlivým akustickým parametrům a jejich hodnocení. V následujícím textu jsou popsány jak dochází k simulaci ve virtuálním prostředí a jaká se pro to vztahují pravidla.

Kapitola 2

Teorie zvuku a akustiky

V této úvodní kapitole jsou stručně popsány základní principy šíření zvuku a působení akustiky na takový zvuk. V této kapitole je zmíněno několik proměnných, kterými lze charakterizovat akustiku prostoru, včetně popisu materiálů, které se mohou na daném místě nacházet. Následně je zde popsán i stav obsazenosti prostoru a její vliv na akustiku.

2.1 Zvuk

Základním zkoumaným prvkem je zvuk. Za zvuk lze označit jakékoliv vlnění šířící se prostorem, přenášen libovolným médiem o frekvenci slyšitelné lidským sluchem. Šíří se jak vzduchem, tedy plyny, tak kapalinou i pevnými látkami, nejčastěji je ale uvažován vzduch.

Popis takového vlnění lze popsat jako přenos energie. Dochází zde k drobným výchylkám ve změně tlaku. Během toho se molekuly vzduchu více shlukují u sebe a následně zase oddalují. Tyto výchylky jsou nepatrně větší, než je atmosférický tlak [2].

Základní způsob, jak lze fyzikálně popsat zvuk je za pomoci vlnové rovnice [3].

$$\Delta p' - c_0^{-2} \frac{\delta^2 p'}{\delta t^2} = 0 \quad (1)$$

Pomocí vlnové rovnice je zvuk popsán ve formě kulové, nebo rovinné vlny. Parametr p' označuje akustický tlak, t čas a c_0 rychlost zvuku, která je definována následující rovnicí (2)

$$c_0 = 331,4 + 0,6 \theta \text{ m/s}, \quad (2)$$

kde θ značí teplotu ve stupních Celsia. Nejmenší slyšitelný rozdíl v tlaku pro lidské ucho je $20 \mu\text{Pa}$.

Akustické veličiny, kterými následně popisujeme prostor ve kterém se šíří zvuk, jsou vyjadřovány nejčastěji hladinově, neboť jejich rozsah je několik řádů [4]. Lidský sluch funguje na stejném principu a je schopen zaznamenat jak nepatrné výchylky, tak obrovský rozsah, a tedy hladinové vyjádření lépe reprezentuje výsledné hodnoty.

K popisu konkrétního stavu, nebo k měření, je využívána hladina akustického tlaku (3). Ta vyjadřuje poměr momentálního akustického tlaku p k referenční hodnotě p_0 , která je stanovena na hodnotu $2 \cdot 10^{-5}$ odpovídající prahu slyšení při frekvenci 1 kHz.

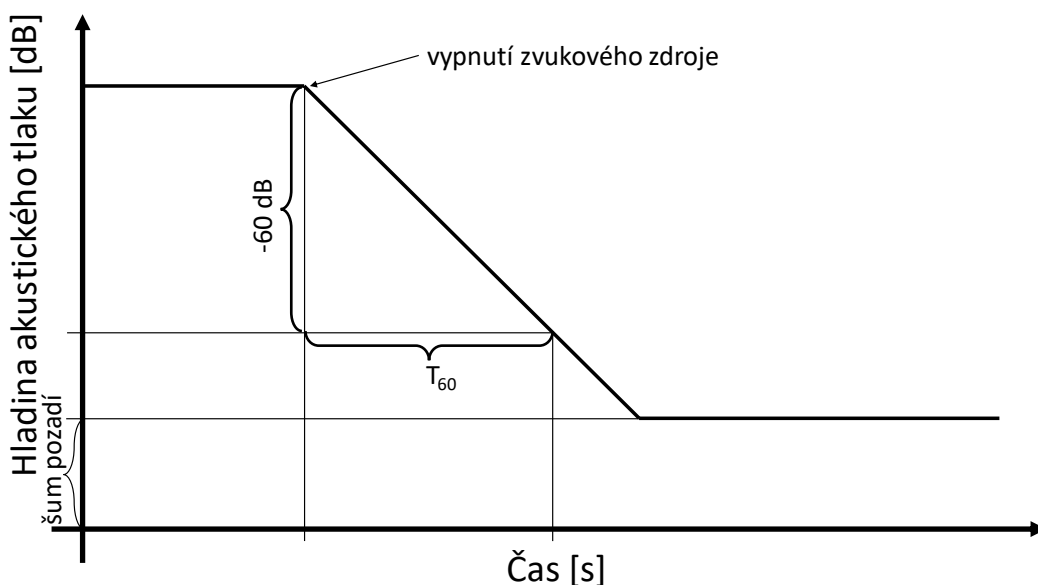
$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

2.2 Akustické veličiny charakterizující akustiku prostoru

Prostor lze popsat několika různými akustickými veličinami, které nám umožní takto charakterizovat konkrétní prostor.

2.2.1 Doba dozvuku

Základním a nejčastěji uváděným parametrem prostorové akustiky je doba dozvuku T . Doba dozvuku je definována, jako čas, za který dojde k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB po vypnutí zdroje zvuku [5]. Takto lze čas snadno odečíst při záznamu zvuku. Ukázka poklesové hladiny křivky hladiny akustického tlaku je vidět na následujícím obrázku 2.1.

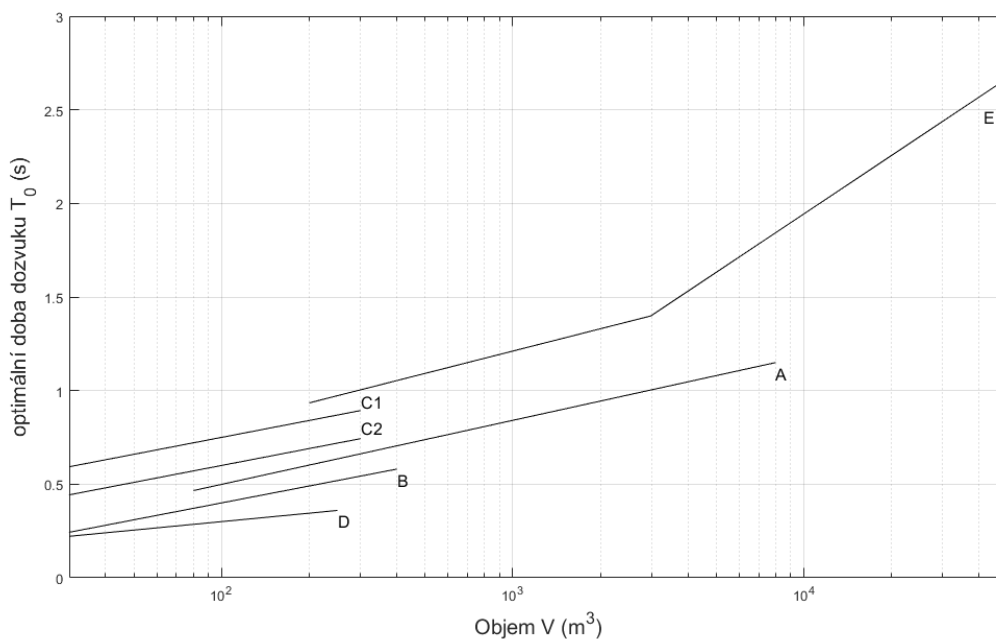


Obrázek 2.1. Křivka poklesu hladiny akustického tlaku.

Doba dozvuku se měří nejčastěji dvěma způsoby. Prvním z nich je vybudení hluku za pomoci všesměrového zdroje. Generovaným signálem je bílý nebo růžový šum, kterými dojde k pokrytí širšího pásma. Druhým způsobem je měření vygenerované Dirac delta funkce. Tímto signálem může být výstřel ze startovací pistole, prasknutí balónku nebo tlesknutí.

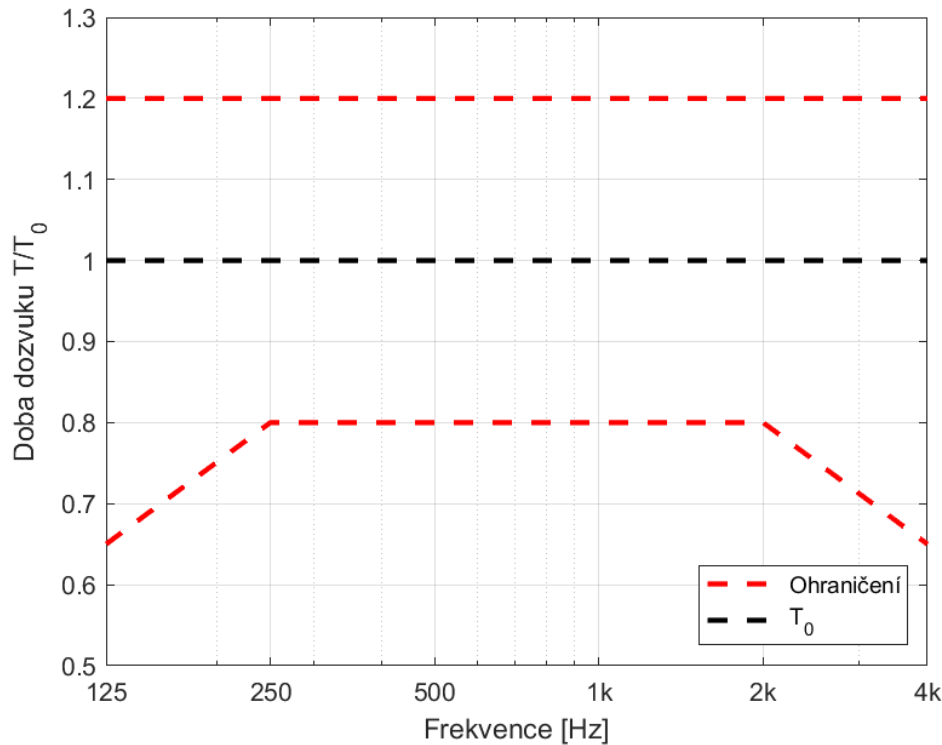
Při většině praktických měření může být obtížné vybudit dostatečně hlasitý zvuk, který by byl větší o 60 dB. V ten okamžik, by byl čas nekonečný, neboť by stále nedošlo k poklesu o požadovanou hodnotu pod hluk pozadí. Z tohoto důvodu se uvádí hodnoty T_{30} a T_{20} , kde dolní index vyjadřuje pokles hladiny. Výsledná časová hodnota je násobena konstantou, aby odpovídala teoretickému propadu o potřebných 60 dB. Při měření je navíc snaha se vyhnout prvotnímu poklesu o 5 dB a 5 dB nad šum pozadí, protože bývá velice často dosti nelineární oproti ideálnímu průběhu jak je vidět zde na obrázku 2.1.

Stanovení ideální doby dozvuku prostoru závisí na rozměrech prostoru a jeho plánovanému využití. Stanovení konkrétní požadované doby dozvuku značené jako T_0 je funkcí těchto dvou vlastností. Pro optimální poslech hudby v koncertním sále bude cílem jiná hodnota, než pro mluvené slovo v open-space kaceráři.



Obrázek 2.2. Závislost optimální doby dozvuku na objemu - školské prostory a prostory pro vzdělávání (A - kmenové a odborné učebny, B - jazykové učebny, C1 - Učebny hry na hudební nástroj - horní mez, C2 - Učebny hry na hudební nástroj - dolní mez, D - učebny hry na bicí, E - Tělocvičny a sportovní haly). Převzato z normy ČSN 73 0527 [6].

Na předcházejícím obrázku jsou znázorněny funkce závislosti objemu místnosti a optimální doby dozvuku pro konkrétní typy využití. Vyobrazené funkce jsou převzaty z české normy ČSN 73 0527 [6] pro školní a edukační prostory. Pro určení hodnot doby dozvuku, které lze brát ještě jako vyhovující, slouží pak vyhodnocení následných mezí na obrázku 2.3. Zde jsou vidět obecné limity doby dozvuku vztahované k poměru T/T_0 .



Obrázek 2.3. Toleranční pásmo doby dozvuku pro řeč pro objem místnosti 500 m³ na základě doporučení [6].

2.2.2 Další parametry vyhodnotitelné z impulsové odezvy

Dalším parametrem, kterého lze využít k popisu prostoru, je parametr EDT (Early Decay Time). EDT udává čas za který dojde k poklesu hladiny akustického tlaku z maximální hodnoty ve špičce o -10 dB. Hodnoty EDT se nejvíc blíží hodnotám T₂₀, kde dochází k poklesu z -5 dB na -25 dB. Čas EDT vypovídá o přímém zvuku bez vlivu odrazů a dozvuku z okolí. Ten má minimální vliv během prvotního poklesu hladiny akustického tlaku. Pokud je zde značný vliv prostředí na celkovou hlasitost v daném místě díky odrazům, a ne přímému zvuku, budou se hodnoty EDT a T₂₀ více lišit. Využívá se například k popisu vlastností v hledišti pro poslech hudby [7].

Parametry zabývající se srozumitelností jsou C₅₀, C₈₀, a C₇. V anglické literatuře jsou označovány za Clarity. Hodnoty těchto parametrů vycházejí z předpokladu, že většina energie dorazí k posluchači během prvních 50 ms nebo 80 ms. Díky dobré jasnosti zvuku lze předpokládat, že bude lépe rozumět řeči, případně lze lépe rozeznat nástroje a jejich tóny u hudby. Jasnost nám tedy udává míru v dB mezi energií v prvních milisekundách stanovené koeficientem vůči zbytku energie po tomto čase [8, 4].

$$C_x = 10 \log \left(\frac{\int_0^x p^2(t) dt}{\int_x^\infty p^2(t) dt} \right) \quad (4)$$

Pro výpočet jasnosti v rovnici (4) se využívá hodnot tlaku $p(t)$ z impulsové odezvy.

Hodnota C₈₀ je využívána pro vyjádření jasnosti hudby. Vysoké hodnoty označují vysokou jasnost a srozumitelnost, ale zároveň spíš suchost zvuku. Pro nižší hodnoty naopak může značit větší plnost hudby. Nejčastější hodnoty jsou mezi -3 dB až +1 dB [9].

Využití C_{50} je pro vyhodnocení jasnosti řeči. Je někdy označován v české literatuře jako míra zřetelnosti. K dosažení dobré míry zřetelnosti by měli být hodnoty pokud možno co nejvyšší. Hodnoty se nejčastěji pohybují na intervalu od -3 dB do +9 dB [10]. Pro vyhodnocení nejmenší slyšitelné změny u tohoto parametru je hodnota 1,1 dB.

Poslední parametr jasnosti zvuku C_7 je využíván pro účely měření a hodnocení signálu blížící se Diracovu impulsu. Udává tedy poměr energie přímého zvuku a odrazů [8].

Velice podobným parametrem jasnosti je parametr zřetelnosti D_{50} (Definition/Deutlichkeit). Hodnotu D_{50} lze určit jako poměr energie, která dorazí k posluchači během prvních 50 ms a celkové energie.

$$D_{50} = \left(\frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (5)$$

Hodnota parametru D_{50} lze taktéž přepočítat z hodnoty zřetelnosti C_{50} . Dnes se již tento parametr tolik nevyužívá a jedná se tedy o parametr zastaralý.

Parametr těžiště udává čas, který je definován jako první moment, ve který dorazí kvadrát energie zvuku impulsové odezvy [3]:

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}. \quad (6)$$

Čas těžiště souvisí s přijatou srozumitelností nebo jasností. Může taktéž vyjadřovat rovnováhu mezi jasností a dozvukem, stejně jako srozumitelností řeči. Nižší hodnoty (30 až 80 ms) indukují dobrou srozumitelnost, s vyššími hodnotami lze naopak očekávat zhoršení. Nejmenší slyšitelný rozdíl je zhruba 10 ms [11].

2.2.3 Parametry vhodné pro popis velkých prostorů

Pro většinu prostorů jsou nejčastěji využívány parametry uvedené v předcházející sekci 2.2.2. Pro větší prostor, typu velkých koncertních sálů, hal, sportovišť nebo stadionů, se využívá k popisu i dalších parametrů. Lze je vyhodnotit i u malých prostor, kde ale jejich význam bude zanedbatelný. Díky těmto parametrům lze lépe popsat velké koncertní sály a charakterizovat akustické vlastnosti pro jednotlivé sekce takovýchto prostorů.

Pojem prostorovosti a akustického působení „širokosti“ prostoru označuje parametr LF_{80} (Lateral Energy Fraction, někdy označován LEF) [3].

$$LF_{80} = \frac{\int_5^{80} [g(t) \cos(\theta)]^2 dt}{\int_0^{80} [g(t)]^2 dt} \quad (7)$$

V rovnici pro LF_{80} označuje úhel θ , který svírají osy procházející ušima posluchače a směru přicházejícího signálu k němu. Prostorovost lze tedy následně popsat takto jako poměr energií. Nejčastěji se hodnota počítá z průměru přes čtyři oktávy na středních frekvencích. Hodnoty se nejčastěji pohybují u velkých sálů v rozsahu 0 až 0,5.

Parametr popisující vztah přicházejícího zvuku vůči našemu tělu, konkrétně vůči lidským uším, je označován jako IACC (Inter Aural Cross-Correlation). Měření této hodnoty probíhá za pomoci figuríny a dvou mikrofonů na pozici uší. Hodnoty IACC jsou uváděny nejčastěji v ms. Pro vynikající akustiku velkých koncertních sálů se uvádí hodnoty menší jak 0,3 ms.

2.2.4 Index přenosu řeči

K hodnocení kvality prostoru z pohledu srozumitelnosti řeči nebo hudby se využívá index přenosu řeči - Speech transmission index (označován zkratkou STI). [12] Celková hodnota STI je váhovaná z výsledků v 7 oktávách, ve kterých je frekvenčním rozsahem obsažená lidská řeč. Hodnoty STI vypovídají o srozumitelnosti řeči v daném místě. Pohybuje se na rozsahu 0 až 1, kde 0 označuje nejhorší srozumitelnost a 1 naopak nejlepší. Za ucházející podmínky lze považovat hodnoty větší než 0,45, jako výborné hodnoty větší než 0,75.

Měření se realizuje dvěma metodami. První je metoda přímá. Tato metoda probíhá měřením modulovaného zvuku, který charakteristikou připomíná řeč. Generovaný signál speciálně pokrývá sedm oktáv shodných s řečí. Doporučený je zde minimální odstup od hluku pozadí 20 dB. Druhá metoda je nepřímá. Zde je měřena impulsní odezva a měření modulačního přenosu. Pro měření se využívá všesměrového mikrofону. Přímá metoda má výhodu, že dokáže postihnout a zaznamenat i nelineární rušení jako je clipping, drobné posuny ve frekvenci, přehrání zvuku se špatnou vzorkovací frekvencí, zpětná vazba systému. Výsledná hodnota bere v potaz i lineární rušení na daném místě. Dočasným lineárním rušením lze považovat echo, dozvuk, nebo hluk.

Pro měření i pro simulaci by dle normy [12] měl být vždy stanoven hluk pozadí, který lze očekávat v daném prostředí. V případě simulace, když by byl nastaven hluk pozadí na 0 dB, může být takto negativně ovlivněna výsledná hodnota STI.

Uváděny jsou variace STI, které mohou mít bližší informační hodnotu na základě daného detailnějšího měření. Full STI je komplexní měření, během kterého se měří 98 oddělených testovacích signálů se 14 modulačními frekvencemi. Měření STIPA je zjednodušené měření Full STI, které probíhá primárně přímou metodou.

Využití STI je například pro měření certifikace varovných zvuků a signálů, bezdrátové komunikace, srozumitelnost v hledišti nebo místnosti. Model STI je primárně zaměřen na mluvené slovo muže mluvícího mateřským jazykem bez vady řeči. Pro jiné případy se někde uvádí korekce pro problémy se srozumitelností v podobě vystupujícího, který hovoří jiným než mateřským jazykem. Výpovědní hodnota samotná nevypovídá totiž o celkové srozumitelnosti. Nebere v potaz srozumitelnost samotného řečníka, která lze hodnotit pouze přímými testy posuzované posluchači s konkrétní osobou.

Simulace STI probíhá na základě akustických parametrů prostoru. K výpočtu se využívá přímého pole za využití ray tracingu (více o ray tracingu v kapitole 3.2) pro brzké odrazy a doby dozvuku. Druhou možností je využití přímého pole a statistických výpočtů doby dozvuku. Další variantou je simulace impulsní odezvy systému. Poslední zmíněná metoda je považována jako nejpřesnější.

2.3 Akustické vlastnosti materiálů prostředí

Pro potřeby akustiky jsou materiály v místnostech popsány několika parametry, krom jejich fyzických rozměrů.

Množství energie, kterou materiál pohltí a kterou naopak odrazí zpátky určuje číselný zvukové pohltivosti α . Koeficient α udává poměr těchto dvou energií. Jeho hodnoty se pohybují na rozsahu 0 až 1, kde 0 označuje nulovou pohltivost, tedy veškerá energie se odrazí zpět od materiálu, 1 značí, že se veškerá energie pohltí a zpět se již žádná neodrazí. Maximální hodnoty jsou spíše teoretické, ale lze se k nim pouze přiblížit. Číselný zvukové pohltivosti je frekvenčně závislá veličina [4].

Místo činitele zvukové pohltivosti se v některých případech uvádí pohltivost A , jako ekvivalentní pohltivá plocha. Ta je určena jako součin činitele zvukové pohltivosti α a plochy S . Hodnoty A mohou být oproti α větší než 1.

$$A = \alpha S \quad (8)$$

Za pomoci znalosti materiálů v místnosti a jejich ploch lze určit doba dozvuku T podle Sabina dle následující rovnice (9).

$$T_S = \frac{0,164V}{\alpha S} \quad (9)$$

V této rovnici α zde charakterizuje průměrnou hodnotu hodnotu pohltivosti všech ploch ohraničující prostor. Výpočet je dle průměru vztaženého k velikosti jednotlivých ploch. Stanovení T_S má omezenou platnost, protože výsledné hodnoty vycházejí v limitních případech hodnoty α buď nekonečné a nebo nulové.

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} \quad (10)$$

Doba dozvuku ze znalosti akustických vlastností materiálu lze i dle Eyringova vzorce (11). Zde již nedochází k problému s hodnotami doby dozvuku jako nekonečno. Střední hodnota α je zde vypočtena stejným způsobem (10)

$$T_E = \frac{0,164V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (11)$$

Příklady základních běžně se vyskytujících materiálů a jejich hodnoty. jsou uvedeny v následující tabulce 2.1.

Materiál	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
neomítnutá cihlová zeď	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
mramor, dlažba, lakované	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
linoleum na betoně	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
okno (izolační zasklení)	0,28	0,20	0,11	0,06	0,03	0,02
koberec s výškou do 6 mm na pevném podkladu	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	0,35
sádkartón, 9,5 mm tlustý, 25 mm ode zdi	0,27	0,17	0,10	0,09	0,11	0,12

Tabulka 2.1. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti konkrétních materiálů, převzaty z vícero zdrojů [13–14].

2.4 Obsazenost

Obsazenost prostoru nám udává, jak moc je zaplněn lidmi. Z pozice měřící normy ISO 3382-1 [5] jsou rozděleny situace na tři možnosti. Místnost je prázdná, tedy se

uvnitř nikdo nenachází, obsazení pouze vystupujícími, tedy řečník, zpěváci nebo hudebníci, a nebo stav plně obsazený, kdy je prostor zaplněn z 80-100% maximální kapacity na určených místech k sezení nebo stání.

Pro stanovení hodnot akustických parametrů v obsazených prostorech se využívá dopočtení teoretického obsazení naměřených dat v prázdné místnosti. Takto lze stanovit hodnoty parametrů jako jsou například doba dozvuku, STI, EDT [15]. Díky této predikci lze zjednodušit proces potřebných měření ke stanovení požadovaných hodnot napříč celou místností. Pro tato data ze simulací je doporučeno dělat korekce s reálnými daty.

Pro výpočet obsazených prostor je rovnice doby dozvuku doplněna navíc o ekvivalentní plochu jednotlivého posluchače s konkrétní přiřazenou pohltivostí [3]. Pohltivost jednoho posluchače je nejvíce způsobena oblečením, které má na sobě. Vliv má nejvíce pro střední a vyšší kmitočty. Na nízkých kmitočtech má oblečení naopak zanedbatelný vliv. Vliv oblečení ale nelze jednoznačně stanovit, protože se liší způsob oblékání i na základě ročního období a počasí.

Typ sezení, posluchače	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Muž stojící v těžkém kabátě	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Muž stojící bez kabátu	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Posluchači na dřevěných židlích, dvě osoby na m ²	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87
Posluchači na dřevěných židlích, jedna osoba na m ²	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78
Posluchači na polstrovaných židlích	0,55	0,86	0,83	0,98	0,96	0,87

Tabulka 2.2. Hodnoty koeficientů ekvivalentní pohltivé plochy A v m² pro různé typy posluchačů se sezením. Převzato ze zdrojů [3, 16].

Vliv na hodnoty pohltivosti publika má i typ a tvar sezení, kde se lidé nacházejí. Záleží na faktorech jako je materiál, ze kterého je sezení vytvořeno, zda je polstrované a i jakou elevaci má hlediště. Krom vlivu materiálu je samozřejmě i důležité, jak hustě je sezení zaplněné lidmi.

Stanovení pohltivosti publika existují, dle Kuttrufa, dva základní způsoby. Prvním způsobem je umístit do dozvukové komory konkrétní blok zkoumaného sezení. Měření lze stanovit jak pro prázdné sezení, tak s publikem. V druhém případě probíhá takové měření přímo v sále, kde samotný sál je považován za dozvukový prostor. Takto stanovené hodnoty ekvivalentní pohltivé plochy A se dosadí do následující rovnice (12).

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \left(\sum_i S_i \alpha_i + N_p A \right) \quad (12)$$

V rovnici (12) N_p označuje počet lidí a A ekvivalentní pohltivou plochu jedné osoby. Odtud je pro stanovení doby dozvuku jen dosazeno do rovnice dle Sabina (9), kde s doplněním potřebné plochy, dostaneme následující rovnici (13).

$$T = 0,161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad (13)$$

Typ sezení	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Osoby sedící na nečalouněných židlích	0,15	0,30	0,40	0,45	0,55	0,55
Osoby sedící na mírně čalouněných židlích	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25
Osoby sedící na sedadlech s vysokým čalouněním	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15
Žáci sedící u stolu (místnost bez nábytku)	0,20	0,25	0,35	0,45	0,50	0,55

Tabulka 2.3. Předepsané hodnoty dopočtového činitele pohltivosti α pro různé typy posluchačů se sezením. Převzato z české normy ČSN 73 0527 [6].

Stejný postup pro stanovení hodnot akustických parametrů uvádí i česká norma ČSN 73 0527 [6]. Zde jsou uvedeny i konkrétní hodnoty ne pro ekvivalentní pohltivou plochu A , ale pro α .

Další způsob, jak stanovit hodnoty pohltivosti posluchače, je za pomoci měření doby dozvuku obsazené a neobsazené místnosti a za pomoci rozdílů těchto hodnot tak stanovit A [1]. Ve zmíněném článku probíhala měření doby dozvuku T_{30} v šesti akusticky upravených a šesti neupravených místnostech.

$$A = \frac{0,16V}{N} \left(\frac{1}{T_{obs}} - \frac{1}{T_{neobs}} \right) \quad (14)$$

Tímto měřením bylo zjištěno, že obsazením prostoru publikem má větší vliv v případě horších akustických podmínek místnosti.

Typ místností	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Průměrná hodnota na posluchače z odrazivých místností	0,18	0,33	0,60	0,79	0,80	0,84
Průměrná hodnota na posluchače z pohltivých místností	0,31	0,34	0,63	0,45	0,33	0,26

Tabulka 2.4. Hodnoty ekvivalentní pohltivé plochy A stanovené měřením a průměrováním ve 12 různých učebnách na jednoho posluchače [1].

V tomto článku jsou následně popsány další pozitivní vlivy na akustiku prostoru, jako jsou snížení hluku pozadí a zvětšení hladiny akustického tlaku v odlehlejších částech místnosti. Zlepšení těchto hodnot lze dosáhnout vhodným použitím a rozmístěním pohltivých materiálů, ale i difuzorů.

Německá norma DIN 18041 [13] popisuje stav místností jako neobsazený a obsazený (jako obsazený stav je zde uvedeno více než 80% kapacity). Pro stanovení hodnoty obsazených prostor, krom měření, stanovuje možnost dopočítat hodnotu doby dozvuku vzorcem (15), kde vychází z měřené hodnoty neobsazeného prostoru a přidání ekvivalentní pohltivé plochy A , která je zde navíc oproti neobsazenému stavu.

$$T_{obsazená} = \frac{T_{neobsazená}}{1 + \frac{T_{neobsazená} \Delta A_{osoby}}{0,16V}} \quad (15)$$

Typ sezení, posluchače	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Osoba stojící ve skupině, jedna osoba na 6 m ²	0,12	0,45	0,80	1,20	1,30	1,40
Osoba sedící na nepolstrovaném sezení	0,15	0,30	0,40	0,45	0,55	0,55
Osoba sedící na sezení s tlustým polstrováním	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15

Tabulka 2.5. Hodnoty koeficientů ekvivalentní pohltivé plochy A v m² pro různé typy posluchačů se sezením. Převzato ze zdroje [13].

Kapitola 3

Simulace ve virtuálním prostředí

Modelování ve virtuálním prostředí nám umožňuje zjistit akustické vlastnosti libovolného prostředí, jehož model bude k dispozici. Díky tomu lze určit hodnoty akustických parametrů bez nutnosti měření. Výsledné hodnoty mohou sloužit k porovnání s naměřenými hodnotami reálného prostoru a následné kalibraci simulace, simulaci plánovaného nového prostoru nebo úprav současných prostor. Lze tedy například takto simulovat několik potencionálních návrhů ke zlepšení akustických vlastností.

Simulování může být realizováno několika různými metodami, nebo jejich případnou kombinací. Těmito metodami jsou numerická řešení vlnové rovnice, Ray Tracing (sledování paprsků), Beam Tracing (sledování kuželů) a Image Source metoda (metoda zrcadlení zdrojů).

3.1 Numerické metody

Prvním přístupem k analýze prostorové akustiky je využití numerického řešení vlnové rovnice. Pracuje převážně tedy v tlakové doméně šíření zvuku. Existuje několik metod, které využívají tento přístup. Nejčastěji používané metody jsou: metoda konečných prvků FEM (Finite Element Method), metoda konečného rozdílu v časové doméně FDTD (Finite Differences in Time Domain) a metoda hraničních prvků BEM (Boundary Element Method) [17]. Tyto metody se liší ve způsobu diskretizování a výpočtu parametrů prostoru.

V dnešní době s nárůstem početního výkonu, který je k dispozici pro takové simulace, vznikají i další obdobné metody [18].

Tímto způsobem lze exaktně určit akustické vlastnosti prostoru, ale pouze za specifických podmínek. Přesnost výpočtů závisí na přesnosti parametrů prostoru, které budou zadány pro tyto metody. Nevýhodou je, že pro dosažení přesných výsledků v širším frekvenčním pásmu, například konkrétní oktávu, vyžaduje značné množství výpočtů [19].

Tato metoda je vhodná pro frekvenční rozsah od nízkých hertzů do několika kilohertzů, protože při vyšších frekvencích je poměr vlnové délky v porovnání s prostředím příliš veliký. Využití má především na nízkých kmitočtech, kde lze díky tomu popsat a určit módy prostoru nebo řešení vibrací [17].

3.2 Ray Tracing

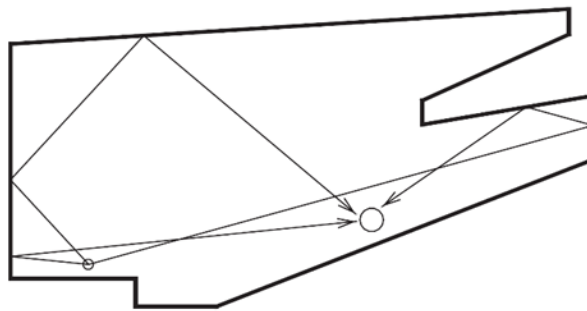
První z metod geometrické akustiky je metoda Ray Tracing – metoda sledování paprsků. Tato pravděpodobnostní metoda je užívána v simulování nejen zvuku, ale v obdobné podobě i k simulaci světla a jeho šíření.

Tato metoda využívá velké množství částic, které jsou emitovány z bodového zdroje do různých směrů. Vyslání částic může být všesměrové, nebo se může dopředu definovat, kterými směry budou vyslány částice. Částice jsou následně sledovány ve svém pohybu po prostoru. Každá částice je vyslána s určitou energií, kterou následně postupně ztrácí

při odrazech v prostoru. Množství ztracené energie souvisí s koeficientem pohltivosti dané překážky pro danou frekvenci, od které se odrazí. K odrazu dochází nejčastěji obdobně jako v optice dle Snellova zákona [20]. Některé softwary dokáží pracovat i s reflektivností daného materiálu.

K detekci částic dochází v předem určeném prostoru, který je vymezen. Nelze k zaznamenávání využít jen jeden konkrétní bod, protože by se jen velice nepravděpodobně podařilo zachytit libovolnou částici právě do tohoto bodu. Takto by nebylo možné zaznamenat ostatní těsně procházející částice, které rovněž budou ovlivňovat výsledné hodnoty. Z tohoto důvodu pro detekci slouží větší oblast s určitým objemem. Primárně se užívá kulová oblast, a to i z důvodu podobnosti lidské hlavy.

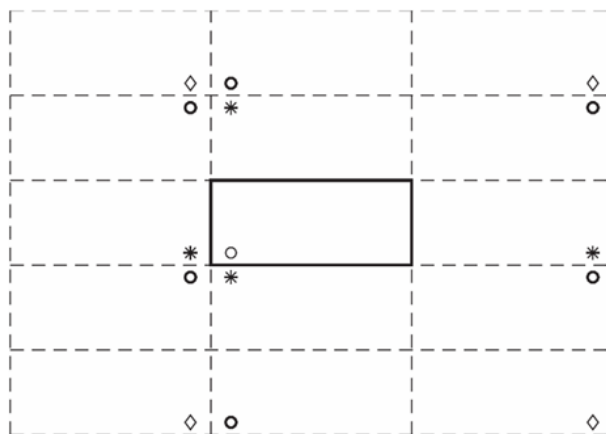
Částice mají omezený čas, po který se mohou šířit prostorem. Jejich pohyb může být ukončen několika různými způsoby. Buď při poklesu pod stanovenou energetickou hladinu, nebo je terminována po předem definovaném počtu odrazů. Částice nezaniká však po protnutí finálního bodu posluchače. Zde tímto bodem projde beze změny a pokračuje dál. V případě, že se po odrazu dostane znovu do této oblasti, tak může být následně váhována, nebo kompletně opomíjena.



Obrázek 3.1. Názorná ukázka Ray Tracingu.

3.3 Image Source

Metoda Image Source je druhou významnou metodou užívanou k simulaci v prostředí založeném na geometrické akustice. Tato metoda je založena primárně na vytváření zrcadlových zdrojů za zdmi našeho prostoru, které jsou zrcadlovým odrazem zdroje předcházejícího. Tento princip probíhá vždy zrcadlovým překlopením našeho zdroje za každou stěnu našeho prostoru. Při překlopení vzniká takto zdroj nový, který se následně zaznamenává. Takto lze pokračovat v jednotlivých úrovních, kde se dodržuje stromová hierarchie postupného vytváření dalších zdrojů. Takto vzniklá stromová struktura lze provádět opakovaně.



Obrázek 3.2. Názorná ukázka Image Source metody. Převzato z [21].

Na obrázku je jednoduchá ukázka této metody pro jeden bodový zdroj v jednoduchém obdélníkovém prostoru. V prostředním zvýrazněném obdélníku je označen zdroj *o*. První úroveň zrcadlových zdrojů je po překlopení jednotlivými směry označena *, druhá úroveň *o* a třetí úroveň \diamond .

Během tohoto způsobu vytváření dalších zdrojů dochází s každou další úrovní k jejich exponenciálnímu nárůstu. Z tohoto důvodu se i dodržuje hierarchie k jejich lepšímu přehledu, kde kořenem je počáteční zdroj zvuku v místnosti.

V této metodě nedochází k žádným difuzním odrazům, ale jen dokonalým odrazům odpovídajícím Snellovu zákonu. Předpokladem této metody totiž je, že veškeré povrchy v prostoru jsou rovné a odrazivé. Difrakce paprsků zde tedy není brána v potaz. Koeficient odrazu, jakožto vlastnost povrchu, ale v potaz brát lze. Plocha je brána za odrazivou za předpokladu, že nejmenší plocha je větší než trojnásobek vlnové délky [22].

Po vytvoření těchto zdrojů dochází k výpočtu vzdáleností mezi zdrojem a posluchačem. Zde se v potaz bere i odrazový koeficient jednotlivých stěn. Následně už pokračuje výpočet určením zpoždění z jednotlivých zdrojů a vyhodnocení doby dozvuku a případně dalších parametrů.

Tato metoda ale může tímto způsobem generovat i několik falešných zdrojů a tím dát špatné hodnoty. Z tohoto důvodu jsou nutné korekce, které jsou prováděny dvěma metodami. První kontrolní metoda se zabývá tím, zda se tyto zrcadlové zdroje nachází před odrazivou plochou. Všechny za tímto zdrojem by měli být zahozeny. Obdobně by neměli být generovány další zdroje, pokud se nacházejí za přecházejícím odrazem. To vše probíhá nezávisle na pozici posluchače a je tedy následná stromová struktura zdrojů platná pro celý prostor [21].

Druhá kontrolní metoda kontroluje viditelnost jednotlivých zdrojů. Zde je již nutná pozice posluchače. Vytvoří se cesty od zdroje k posluchači. Tato cesta musí trefit všechny odrazové stěny uvnitř hranic a zároveň by neměla protnout další stěny, jinak není vidět z dané pozice posluchače.

Nevýhodou této metody je její velká náročnost, kvůli exponenciálnímu růstu dalších zdrojů zvuku s každou úrovní. Díky tomuto problému se stává vysoce náročnou pro výpočty. Nárůst nutných zdrojů bude taktéž s rostoucím počtem stěn v místnosti, nebo případných jiných odrazových ploch.

Benefitem této metody je její přesnost a snadná konstrukce pro jednoduché místnosti, nebo brzké odrazy. Při nízkých úrovních se vyvaruje velikému množství zdrojů a tedy jsme schopni je snadno vyhodnotit [20].

3.4 Beam Tracing

Beam Tracing lze považovat za metodu Ray Tracingu, která má jiný přístup k emitování a následné detekci zvuku. Základní princip této metody totiž není vyslání jednotlivých částic, ale celého svazku libovolným směrem. Sledujeme tedy pohyb celého svazku a nikoli jen jedné konkrétní částice. Výhodou je snadná detekce, kde není nutný žádný objem a lze tedy pro detekci užít konkrétní bod. Touto metodou lze snadno pokrýt celý prostor, a tedy odstranit hluchá místa v prostoru a určení jejich hodnot [23].

Jsou dva základní principy, kterými se na tento způsob modelování dá pohlížet. Liší se typem svazku paprsků, kterým jsou generovány. Paprsky jsou formulovány buďto do kuželovitého svazku, nebo ve svazku tvaru jehlanu. Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody. Kuželovitý svazek lze snáze zjednodušit na jeden vektor jdoucí středem kuželu. Případným zjednodušením mohou vznikat problémy s překryvem jednotlivých svazků. Komplikací je rovněž rozdělení svazku, když dojde jen částí k odrazu od stěny, kde zbylá část paprsku pokračuje mimo stěnu dál. Tento problém právě nenastává u svazku jehlanovitého tvaru, kde se snadno dá rozdělit svazek a dále pokračovat ve výpočtech.

Nevýhodou jsou kalkulace jednotlivých svazků celým prostorem a řešení jejich případného překrývání. Výhodou naopak je velice dobré pokrytí prostoru, na rozdíl od metody Ray Tracingu, obzvláště u větších prostor.

3.5 Hybridní metody

Nejčastěji se lze setkat s metodami hybridními. Každá metoda v důsledku svých kladů a záporů je vhodná pro jiné účely. Pro zpracování všech potřebných parametrů a optimalizaci výpočetní rychlosti využívá většina dnešních softwarů různou kombinaci zmíněných metod.

3.5.1 Příklady konkrétních softwarů

Software Odeon nabízí kombinaci metody Image Source a Ray Tracingu. Pracuje tedy v energeticky založeném prostředí. Metoda Image Source je zde využívána pro brzké odrazy, a tak vytváří prvotní pokrytí prostoru pomocí sekundárních zdrojů. Pro odrazy vyšších řádů je následně využito Ray Tracingu. Díky této kombinaci poskytuje výsledky v krátkém čase. Využití má primárně pro simulování akustických vlastností koncertních sálů, openspace kanceláří, konstrukčních hal, nebo i otevřených prostor v okolí industriálních strojů.

Více informací k principům fungování tohoto softwaru, který byl využit pro modelování i pro tuto konkrétní práci, je popsáno v následující kapitole Odeon 4.

Další software nese název COMSOL. Ten pracuje ve třech směrech, a to v tlakové části akustiky, Ray Tracingu a řešení akustické difuzní rovnice [24]. Tlakovou část využívá ke kalkulaci módů místnosti. Tímto způsobem řeší nízké kmitočty, které jsou jinak neřešitelné pro nízké kmitočty formou geometrické akustiky. Ray Tracing a řešení difuzních prostor již zde probíhá na úrovni řešení v geometrické akustice.

Software CATT-acoustic používá metody geometrické akustiky. Využívá konkrétně metodu nazvanou Cone Tracing, tedy variantu Beam Tracingu. Založen byl nicméně primárně na metodě Image Source. V některých případech využívá občasně i Early Reflections nebo metodu Secondary Edge Source [25].

Posledním zmíněným softwarem je Raven (Room Acoustics fo Virtual Enviroments). Raven pracuje na obdobném principu jako Odeon [26]. Rozděluje tedy výpočty v pro-

středí na sekci brzkých a pozdějších odrazů. Raven oproti Odeonu v brzké části neprodukuje druhotné zdroje, ale rekurzivním algoritmem počítá nové zdroje pro impulzní odezvu. Pro část pozdějších výpočtů rovněž využívá Ray Tracing. Počítá navíc s rozptýlenou energií v pozdější části impulsové odezvy.

Kapitola 4

Odeon

V této sekci bude zmíněno víc o softwaru Odeon Room Acoustics (dále již jen Odeon). Je zde popsán postup, jakým probíhá simulace od zhotovení modelu po výsledná data. Zmíněny jsou zde i jednotlivé principy a funkce, které Odeon nabízí a využívá, zejména ty, které byly využity pro zhotovení této práce.

4.1 Princip modelování v Odeonu

Odeon je založen na výpočtech prováděných v energetickém principu. V tlakové oblasti nepracuje. Pracuje kompletně na principech geometrické akustiky, tedy reprezentace zvuku jako paprsku. Odrazy od povrchů jsou reprezentovány za pomoci obrazů (image) a sekundárních zdrojů. Není při výpočtech využívána informace o fázi zvuku.

Odeon využívá metody nazvané: Image Source 3.3, Early Scattering, Ray Tracing 3.2 a Ray Radiosity. První dvě zmíněné metody se zaměřují na výpočet brzkých odrazů, zbylé dvě pro výpočet pozdních odrazů.

Brzké odrazy se stanoví pro celou místnost nezávisle na následném rozmístění posluchačů nebo měřicích míst. Early Scattering pomáhá upřesnit hodnoty poskytnuté metodou Image Source. Obě metody poskytují výsledky do předem stanovené hodnoty odrazů, kde následně dochází k dopočtení pozdních odrazů za pomoci zbylých dvou metod. Pohyb paprsku prostorem může být ukončen, i kromě stanoveného počtu odrazů, vypršením času, který je částici přiřazen, odpovídající zániku energie zvuku ve vzduchu [27]. Základní nastavení přechodu mezi těmito metodami jsou dva odrazy a je tak doporučeno ponechat. Nicméně metody se vzájemně mohou prolínat i mimo danou hranici.

Metody pro určení pozdních odrazů jsou zjednodušeně metodami Ray Tracingu. Druhá zmíněná metoda, Ray Radiosity, je Odeonem upravenou variantou Ray Tracingu. Pozdní odrazy poskytují konkrétní hodnoty jednotlivých míst stanovené pro posluchače. Při simulaci libovolného místa je vždy individuálně proveden výpočet. Pro brzké odrazy se vytváří stromový seznam vygenerovaných zdrojů, které ukládá do paměti. Při tomto procesu je prováděna i kontrola duplicitních zdrojů a zda je zdroj možné brát jako viditelný z pozice posluchače. Pro ověření Ray Tracingu se kontroluje zpětně od posluchače ke zdroji pohyb paprsku.

Pro posouzení věrohodnosti výsledných hodnot ve frekvenčním rozsahu pro konkrétní místnost lze využít Schroderovu frekvenci (1), kde pro výpočet je využita doba dozvuku T a objem místnosti V . Tato frekvence popisuje minimální frekvenci, při které je jisté, že dochází k dostatečnému překryvu módů místnosti. Pro řešení módů a stojatých vln je nutné využít jiný způsob, než simulaci za pomoci geometrické akustiky.

$$f_{Sch} = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (1)$$

4.2 Vytvoření modelu a jeho nastavení

Při tvoření modelu pro následnou simulaci platí několik doporučení a doporučených přístupů, které jsou stanoveny v manuálu [8]. Tyto požadavky slouží k dosažení co nejpřesnějších výsledných hodnot. Při nedodržení některých zásad se může vyskytnout chyba, díky které budou výsledky zkreslené.

K vytvoření modelu lze využít libovolný software typu CAD. Lze importovat v několika různých formátech. Nejvhodnější k tvorbě modelu je program Sketch Up, pro který Odeon dodává plug-in SU2Odeon, díky kterému je model snadno importován, včetně informací k jednotlivým objektům, kde lze přiřadit již popis nebo typ k jednotlivým povrchům a tím usnadnit přiřazení materiálů v Odeonu. Vytvořit model, nebo případně provést nějaké úpravy, lze i v samotném Odeonu.

Při tvorbě modelu je doporučeno zanedbat nebo zjednodušit malé plochy a hrany. Optimální je zanedbat veškeré plochy s rozměry menší než 20 cm, nebo alespoň 10 cm. V případě, kdy je těchto ploch málo v porovnání s počtem ploch zbylých objektů v prostoru, je možné je ponechat. Přílišná detailnost modelu je nežádoucí. Výsledkem mohou být zavádějící hodnoty, delší výpočetní čas simulace nebo vzniknou mezery v samotném modelu.

Při tvorbě modelu jsou taktéž nahrazovány veškeré zakřivení, oblouky, válce a kulové plochy. Tento typ ploch by byl jinak velice náročný pro simulaci a je tedy nahrazován přímkami nebo rovnou plochou. Pro válcovou plochu je doporučeno ji nahradit kvádrem se základnou šesti- až osmi-úhelníku. Následně před simulací se v programu přiřadí pro kompenzaci typ plochy jako *fractional*.

Po importování modelu je doporučeno provést jeho kontrolu, tedy že model neobsahuje mezery, kterými by při simulaci mohli paprsky unikát. První možnost je si prohlédnout 3D model, zda si nevšimneme takového místa. Použitím 3DGeometry Debuggeru lze zkontrolovat přesahy a různá odchylení jednotlivých povrchů od sebe. Poslední metodou je zkouška „vodotěsnosti“ za pomoci 3D kontrolních paprsků. Ty jsou vyslány ze zdroje a pozoruje se, zda některé opustí místnost. Pro vyhodnocení je nutné přiřadit libovolný materiál všem plochám.

K simulaci je zde možnost využít několik typů zdrojů. Na výběr je zde bodový zdroj, zdroj reprezentovaný úsečkou, zdroj reprezentovaný plochou a zdroj v podobě reproduktoru. Jako bodový zdroj může být i přirozený lidský hlas. Lze importovat i specifikace konkrétních reproduktorů nebo jiných zdrojů.

Dalším krokem je po importování modelu přiřazení již konkrétních materiálů k jednotlivým plochám. K dispozici je zde základní knihovna materiálů, lze ale přidat další knihovny nebo samotné konkrétní materiály. Materiál obsahuje informace o činiteli zvukové pohltivosti α v oktávových pásmech od 63 Hz po 8 kHz.

Parametrem každého materiálu je i *scattering coefficient* - koeficient rozptylu. Ten souvisí s jeho povrchem a strukturou. Využití má pro uvážení nerovnosti konkrétních povrchů nebo výrazného členění, které bylo zanedbáno a nahrazeno při tvorbě modelu, jako například závěs nebo schody. Jeho hodnoty se uvádí na rozsahu 0 až 1, které jsou uvedeny pro frekvenci 707 Hz. Pro zbylé frekvence dochází k jeho automatickému přepočítání. Konkrétní hodnoty pro hladké povrchy, jako například hlazený beton po aplikaci nátěru, náleží rozsahu 0,01 až 0,05. Koeficient v rozsahu 0,05 až 0,1 pro zeď, hodnota 0,3 odpovídá poličce s knihami, 0,3 až 0,4 kazetovému stropu, velké povrchové rozdíly na intervalu 0,3 až 0,5 metru má doporučený rozsah 0,4 až 0,5 a pro oblast publika 0,6 až 0,7.

Pro každou plochu lze nastavit úroveň transparentnosti na rozsahu 0 až 1, tedy jak moc zvuk může danou plochou projít. Slouží ke zkoumání hluku z okolí pronikajícího do místnosti nebo opačným směrem, stejně jako pro průzvučné materiály v místnosti jako je například závěs. Při nastavení transparentnosti je doporučeno se vyhnout koeficientu větší než 0,95. Pro tyto případy je lepší konkrétní plochu odebrat.

Pro lepší výsledky lze nastavit 1 ze 4 typů zdí: *Normální*, *venkovní*, *dílčí* a nebo *přenosovou*. Normální nemá žádný speciální vliv, pro venkovní dochází ke generování méně odrazů na nižších frekvencích, u dílčích (fractional) slouží pro označení povrchů, které jsou součástí většího zakřiveného celku jako je kruh nebo oblouk, a poslední přenosová pro povrchy, přes které přenášíme hluk do dalšího prostoru, který chceme zkoumat.

Při modelování hlediště a obecně je vytvoření celistvého bloku v místech, kde se nachází sezení. Tento blok má vrchní stěnu rovnoběžnou s podlahou ve výšce 0,8 metru. Tento přístup je doporučen primárně k aplikaci u koncertních sálů a obdobných velkých prostor.

4.3 Rychlá vyhodnocení

Slouží jako prvotní odhad daného prostoru a modelu. Těmito rychlými vyhodnoceními jsou zde dva principy a to Quick Estimate a Global Estimate. Pro vyhodnocení je nutné mít přiřazené materiály k plochám, nastavení zdroje a počet vyslaných částic pro tuto simulaci. Těmito výpočty lze určit pouze dobu dozvuku a neslouží k vyhodnocení vlastností pro konkrétní místa posluchačů, pouze pro místnost jako celek.

4.3.1 Quick Estimate

První ze dvou metod rychlých vyhodnocení je Quick Estimate. Funguje na analytických principech výpočtu doby dozvuku dle Sabina a Eyringa. Neřeší tedy vůbec geometrické vlastnosti modelu. V potaz je brán pouze počet pohltivých ploch a objem prostoru.

Simulace probíhá vysláním paprsků ze zdroje náhodnými směry a pozorování na které plochy dopadají. U ploch, kde dochází k četnějším nárazům, je přiřazována daným povrchům větší váha. Hodnotí je vlastním parametrem, kterým je následně váhován pro celkový výpočet α .

4.3.2 Global Estimate

Druhá metoda rychlého vyhodnocení využívá metod Ray Tracingu. Dojde k vypočtení celkové doby dozvuku pro danou místnost. Tato metoda je přesnější než Quick Estimate. Výsledek závisí na použití typu zdroje, ale nezávisí na poloze posluchače.

Dojde ke stanovení hodnot T_{20} a T_{30} podle Schroedera. Vyšle náhodně paprsky různými směry, které se odráží podle vektorově založené rozptylové metody, během ní odebírá energii jednotlivých paprsků. Ta je odebírána při šíření vzduchem a kontaktem s povrchy. Potřebný počet paprsků je možné určit i na základě křivky poklesu hladiny akustického tlaku 2.1. Zde by se neměl vyskytovat velký propad na intervalu potřebném ke stanovení doby dozvuku.

4.4 Vyhodnocení pro konkrétní pozice

Poslední metoda simulace slouží k vyhodnocení již konkrétních pozic v místnosti pro posluchače a zdroj zvuku. Lze využít k vyhodnocení i více zdrojů. Při simulaci jednotlivé zdroje generují Dirac delta funkci.

Vyhodnocení lze graficky vyobrazit v mřížce. Je nutné před simulací definovat parametry mřížky. Nezbytná je velikost plochy, na které se má mřížka nacházet, typicky pro oblast publika, v jaké výšce nad povrchem a velikost jednotlivých částí mřížky. Při nastavení menších čtverců získáme detailnější přehled, jak se mění hodnoty jednotlivých parametrů v prostoru, to je ale na úkor delšího výpočetního času. Vyhodnocení parametrů takto probíhá na barevné stupnici.

Pro vyhodnocení jednotlivých pozic, které jsou stanovené umístěním posluchačů v místnosti, kteří jsou reprezentováni jedním bodem, který by měl být umístěn zhruba ve výšce uší člověka, slouží vícebodová odezva. Vypočte veškeré hodnoty pro všechny umístěné body v místnosti jako jsou například EDT, C_{50} a další, které jsou zmíněné v kapitole 2.2.2. Lze nastavit jednotlivé parametry, které se mají simulovat. Je zde možnost je upravit a nebo přidat vlastní.

Lze vyhodnotit i pro jeden konkrétní bod za pomoci jednobodové odezvy. Dostaneme výsledné hodnoty jako pro vícebodovou, ale s lepší přesností v číselné podobě i v grafech.

Kapitola 5

Simulace obsazenosti

V této sekci je popsán postup a konkrétní simulace přednáškových místností, které jsem prováděl. V závěru jsou uvedeny získané výsledné hodnoty, které jsou porovnány s doporučenými hodnotami norem ČSN 73 0525, ČSN 73 0527 a DIN 18041.

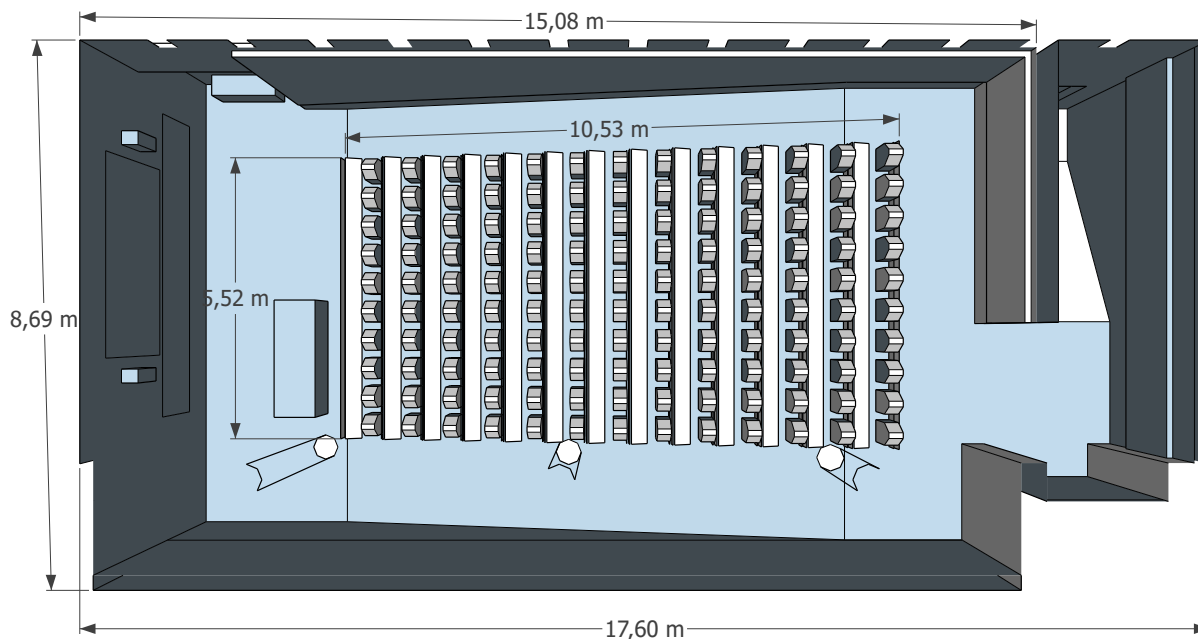
5.1 Popis místností

Objektem zkoumání této práce jsou dvě konkrétní přednáškové posluchárny v prostorách školy ČVUT FEL. Jedná se jmenovitě o přednáškové prostory nesoucí označení čísla 132 a 135 (Dále již jako místnosti 132 a 135). Obě tyto místnosti se nacházejí v prvním patře budovy školy ČVUT FEL na adrese: Praha 6 - Dejvice, Technická 1902/2. Půdorysy těchto místností jsou totožné. Rozložení vnitřních prostor a orientace se rovněž shodují. V obou případech došlo v minulosti k úpravě akustiky. Úpravy proběhly v časovém odstupem a bylo zde užito rozdílných úprav. Tento rozdíl v provedených úpravách je jedním z cílů porovnání.



Obrázek 5.1. Fotografie zkoumaných přednáškových učeben. Vlevo na fotografii místnost s označením 132, vpravo místnost s označením 135.

Místnosti mají obdélníkový půdorys. Ze zadní části místnosti je vstup vedoucí po schodech nahoru. Vstup se schody je oddělen příčkou od zbytku místnosti. Odsud dál již vedou kaskádovitě schody směrem dolů k prostoru pro přednášející. Na každém stupni se nachází jedna řada sezení pro deset lidí. Těchto řad se zde nachází dvanáct. Celková maximální kapacita poslucháren je sto dvacet posluchačů. Na levé členěné stěně (z pohledu směrem k tabuli) se nachází okna. V dolní části místnosti je stůl s počítačem a multimediálním systémem pro danou místnost. Za přednášejícím se nachází tabule, odpovídající šířkou šířce sezení posluchačů, a projekční plátno se sadou reproduktorů po stranách, pro multimediální obsah spojený s přednáškou nebo jinou prezentací, které se zde konají. V blízkosti oken jsou tři sloupy spojující podlahu se stropem.

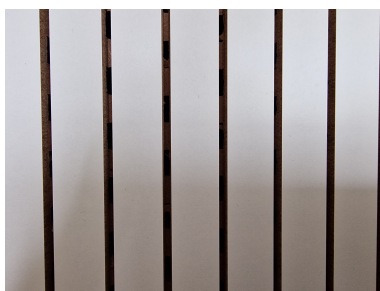


Obrázek 5.2. Podoba modelu místnosti 132 v prostředí Sketch Up.

Stěny místností jsou zděné a omítnuté. Výjimkou je pouze stěna s tabulí a plátnem, která je postavena ze sádkokartonu před samotnou zdí. Tato se zde nachází jako součást akustické úpravy. Na podlaze je položeno linoleum. Pod okny je kamenný parapet. Okna samotná jsou velice dobře izolovaná a odhlučňena z trojskla. Okna je možné v místnostech zastříít tenkým závěsem. Místnost je vybavena lavicemi s oddělenými sklápěcími sedadly.

V obou místnostech byla provedena montáž akusticky pohltivých panelů na boční stěny stropních trámů. Volba materiálu pro jednotlivé místnosti je ale rozdílná.

V místnosti 132, na jedné straně těchto trámů, byly použity pohltivé desky. Ty se nacházejí jen na jedné straně, konkrétně na pohledové straně z pozice přednášejícího. Z druhé strany těchto trámů jsou naopak umístěny desky z difuzního materiálu. Dalším akustickým prvkem v místnosti jsou pohltivé panely, které se nachází na boční stěně naproti oknům, na zadní stěně za posluchači, a na zadní stěně nad schody vstupního prostoru, opět jen na pohledové stěně z pozice řečníka. Tyto panely jsou umístěny ve výšce 90 cm nad podlahou. Výška panelu v zadní části posluchárny je 1,7 m. Spodní hrana bočního obložení klesá společně s řadami posluchačů, horní hrana je stále ve stejné výšce. Tloušťka tohoto akustického obložení je 10 cm.



Obrázek 5.3. Ukázka obložení bočních stěn místnosti 132.

Na obrázku 5.3 je ukázka použitého materiálu. Jedná se o dřevěné pravidelně podélně děrované obložení o tloušťce 10 cm. Uvnitř těchto panelů se nachází vrstva absorpčního materiálu.

Místnost 135 se odlišuje akustickou úpravou, jak bylo zmíněno. V této místnosti jsou stropní trámy obloženy stejným typem materiálu po obou bočních stěnách. Jedná se o plátno natažené na rámu. Boční stěna místnosti naproti oknům zde není nikterak upravována. Stěna za posluchači je celá obložená perforovanou sádkartonovou deskou, za kterou se nachází minerální izolace. Stejnou úpravu má i levá stěna podél příchozích schodů v místnosti.

5.2 Vytvoření modelů

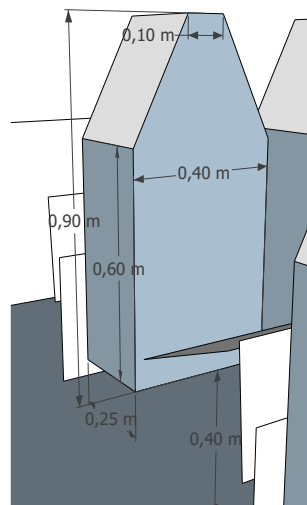
Prvním krokem, který předchází simulaci akustických vlastností těchto prostor, je vytvoření grafického 3D modelu obou místností. Pro simulaci v prostředí Odeon je doporučeno prostředí programu Sketch Up. Lze využít obecně i jiné 3D modelové softwary typu CAD.

Model jsem vytvořil ve zjednodušeném provedení. Držel jsem se doporučení uvedených v manuálu k softwaru Odeon [8] zmíněných v sekci 4.2. Přeneseny byly jen důležité a prostorově významné objekty v místnosti. Konkrétně jsem nahradil schody v místnosti nakloněnou rovinou, zanedbal detailnost prvků lavic a zábradlí celkově. Elektronika, která se zde nachází jako je například kamera, projektor, monitor, zde nebyla modelována. Nevnášel jsem do modelu tloušťku projekčního plátna, tabule, lavic a sezení. Sezení jsem se rozhodl reprezentovat jako celistvou plochu v každé řadě, namísto individuální sklápěcí plochy.

Zjednodušení se týkalo i sloupů, které se v místnosti nacházejí v blízkosti oken. Válcový sloup byl nahrazen kvádrem s podstavou pravidelného osmiúhelníku. Kompenzace zakřivení je následně nastavena v Odeonu.

Na obrázku 5.2 je ukázka vzhledu modelu místnosti 132 z prostředí Sketch up. Pro získání všech rozměrů potřebných k vytvoření tohoto modelu jsem měřil fyzické rozměry v dané místnosti za pomoci dálkoměru.

Model jsem vytvořil stejným způsobem i pro druhou místnost. Rozměry místnosti jsou: délka přednáškového sálu 15,07 metrů, šířka 6,68 m, výška v horní části místnosti je 3,25 m a v dolní 5,10 m.



Obrázek 5.4. Reprezentace posluchače v místnosti.

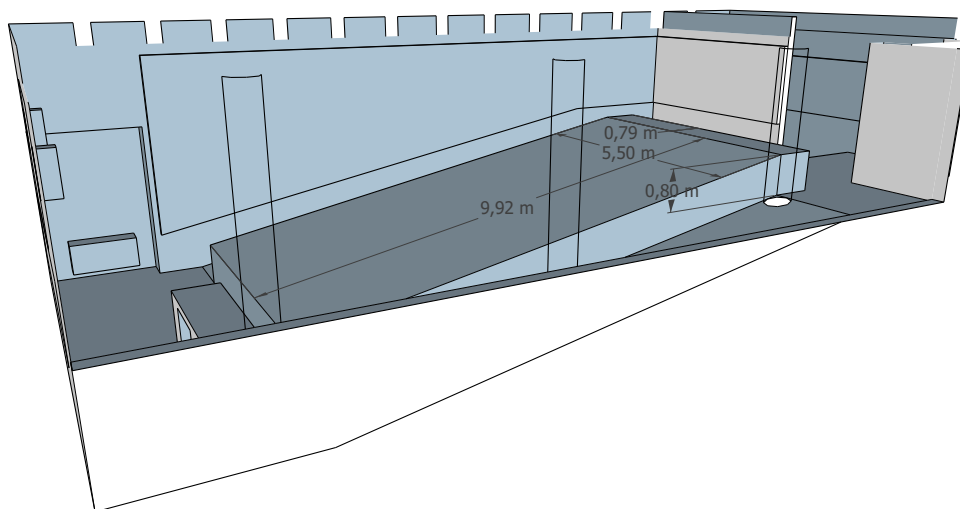
Dalším krokem bylo nutné vytvoření posluchačů a jejich rozmístění.

Pro vytvoření konkrétního posluchače jsem zvolil tvar kvádrů, který bude svými rozměry připomínat posluchače, jak je názorně ukázáno na obrázku 5.4. Kvádr byl zvolen jako nejsnazší možná reprezentace vhodná k simulaci v Odeonu. Reprezentace válcem by nebyla vhodná s ohledem na doporučení se vyhýbat co nejvíce takovýmto plochám. Členitost posluchače budeme kompenzovat následně v Odeonu při nastavení vlastností povrchu.

Umístění tohoto kvádrů bylo na místě sezení. Sedátko po sklopení se nachází v přednáškové místnosti 40 cm nad podlahou, kde je umístěna spodní stěna kvádrů. Rozměry kvádrů jsem následně zvolil následující: šířka 40 cm, hloubka 25 cm a výška 60 cm, nad kterým jsem vytvořil špičatý hranol s výškou 40 cm, kde jsem pak odebral vrchních 10 cm. Díky tomu má celkový objem tento kvádr $78,75 \text{ l}^3$, což lze považovat za přibližný objem dospělého jedince. Výška 1,2 m nad podlahou je specifikována normou jako přibližná poloha uší sedícího dospělého člověka [5]. Povrch modelu po odečtení plochy sezení je $1,01 \text{ m}^2$.

Tímto způsobem byli vymodelováni a rozmístěni všichni sedící posluchači, odpovídající plné kapacitě místnosti. Pro jednotlivé varianty obsazenosti byli následně ubíráni k dosažení konkrétní požadované procentuální obsazenosti.

Druhý způsob, kterým jsem modeloval plně obsazený prostor, je dle doporučení Odeonu. Konkrétně bylo nahrazeno veškeré sezení a posluchači celistvým útvarem. V místě sezení byl umístěn kvádr, který vycházel z podlahy a dosahoval výšky 0,8 m, jak je ukázáno na následujícím obrázku 5.5.



Obrázek 5.5. Model obsazeného sálu dle doporučení Odeonu.

5.3 Nastavení parametrů pro simulaci

Před zahájením simulace bylo nutné přiřadit konkrétním plochám jednotlivé materiály. Využil jsem hodnot pro obecné a běžně se vyskytující materiály, jejichž vlastnosti jsou zmíněny v sekci 2.3. Některé hodnoty materiálů se již nacházeli v*knihovně Odeonu, zbylé bylo nutné přidat. Nutné bylo přidat hlavně materiály akustických obložení, závěsu a projekčního plátna. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 5.1.

Mimo základní seznam běžně se vyskytujících materiálů, jejichž hodnoty akustické pohltivosti se nacházejí v teoretické části 2.3, se v přednáškových místnostech vyskytuje několik dalších materiálů, jejichž parametry jsou nezbytné pro provedení simulace.

Jedná se především o materiály použité pro akustické úpravy místností, závěs, Hodnoty koeficientu akustické pohltivosti těchto materiálů jsou shrnuty do následující tabulky 5.1.

Materiál	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
obložení bočních stěn v místnosti 132	0,45	0,90	0,90	0,80	0,55	0,45
obložení bočních stěn v místnosti 135	0,45	0,60	0,60	0,55	0,50	0,55
obložení stropních trámů 132 - pohltivý	0,40	0,75	0,85	0,75	0,65	0,60
obložení stropních trámů 132 - difuzní	0,08	0,08	0,05	0,04	0,04	0,04
obložení stropních trámů 135 plátno	0,40	0,60	0,82	0,90	0,84	0,82
plátno	0,10	0,13	0,36	0,31	0,29	0,20
závěs s hustotou 130g/m ² , 15 cm před pevným povrchem	0,05	0,35	0,70	0,75	0,78	0,80

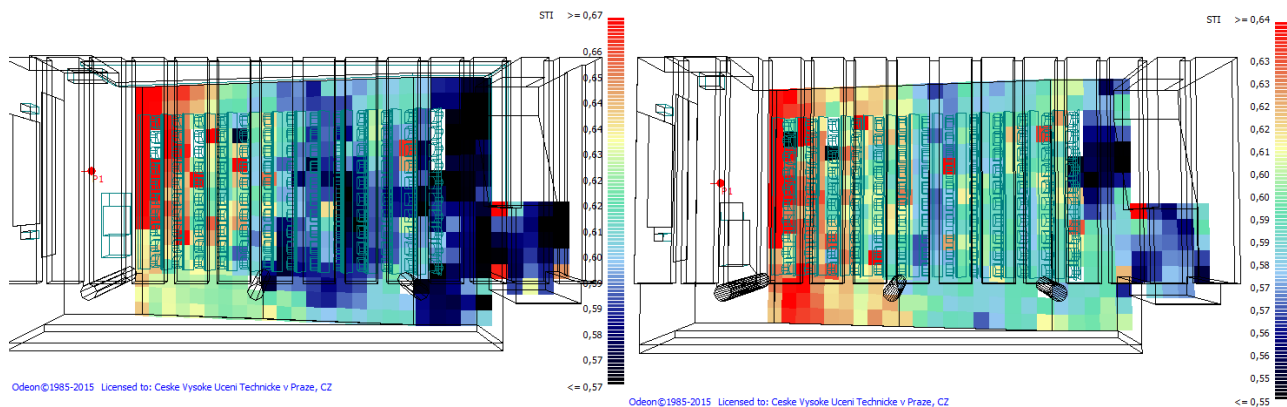
Tabulka 5.1. Hodnoty koeficientů pohltivosti materiálů, které se vyskytují v přednáškových místnostech [28–30].

Pro model posluchače bylo nutné stanovit α , jehož plocha modelu je 1,01 m². Je to povrch modelu po odečtení ploch, které reprezentují dřevěné sezení. Využil jsem hodnoty stanovené dle článku [1] uvedené v tabulce 2.4, protože se mi jeví jako nejvěrnější pro posluchače samotného, nezávisle na sezení. Konkrétně byli použity hodnoty z pohltivých místností, ty které byly akusticky upraveny, jako jsou akusticky upraveny a naše konkrétní místnosti. Pro Odeon došlo samozřejmě k přepočtu z hodnot ekvivalentní pohltivé plochy na činitele zvukové pohltivosti. Koeficient rozptylu jsem nastavil na 0,2, jako mezi krok mezi stanovenými hodnotami Odeonem pro knihovnu a zdí, kde tento model odpovídá obdobné členitosti.

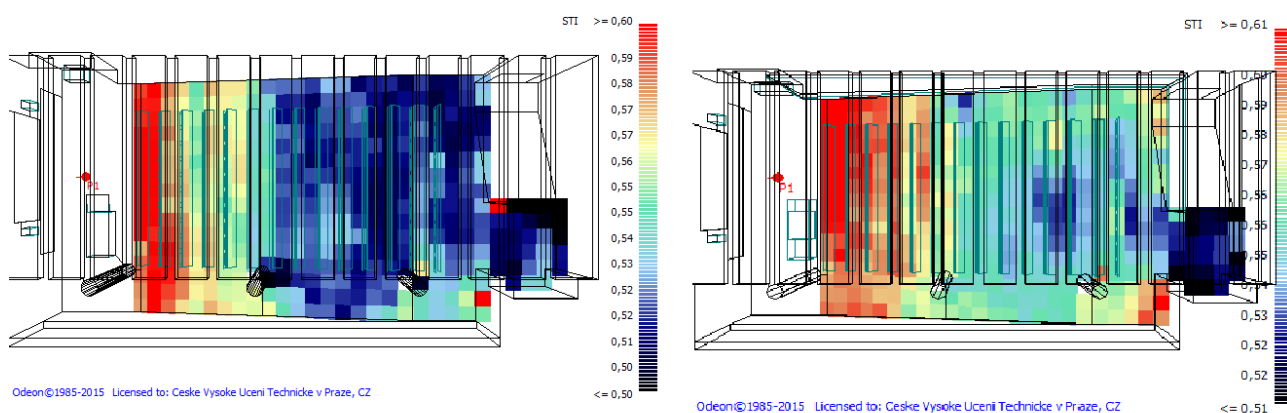
Nastaven byl zdroj jako point source v oblasti katedry, v místech, kde se běžně pohybuje přednášející, do výšky 1,7 metru. Rozmístění měřících bodů jsem zvolil na pozice v oblasti, kde se nacházejí posluchači ve výšce 1,2 metru zmiňováno v sekci 4.2.

5.4 Simulace variant s rozdílnou obsazeností

Provedl jsem několik simulací pro různé stavy obsazenosti, včetně maximální a prázdné místnosti. Pro plnou obsazenost jsem vyzkoušel vymodelovat taktéž model dle návodu Odeonu k tvorbě oblasti publika.

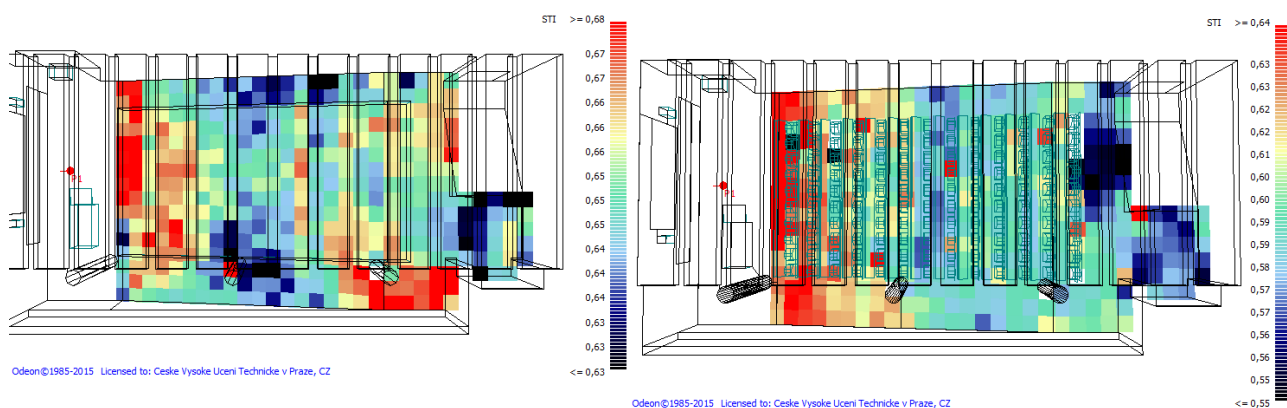


Obrázek 5.6. Graficky reprezentované rozložení hodnot STI v místnostech 132 (vlevo) a 135 (vpravo).



Obrázek 5.7. Graficky reprezentované rozložení hodnot STI v prázdných místnostech 132 (vlevo) a 135 (vpravo).

Na následujícím obrázku se nachází vyobrazené hodnoty STI pro porovnání mezi dvěma typy modelu místnosti 135.



Obrázek 5.8. Graficky reprezentované rozložení hodnot STI v místnosti 135 pro model vytvořený dle doporučení Odeonu (vlevo) a mého modelu (vpravo).

Průměrná hodnota STI pro místnost 132 při plně obsazeném stavu činila 0,62 dB a pro prázdný stav 0,56 dB.

Hodnoty STI vycházejí lépe pro místnost 132 než pro místnost 135. Hodnoty budou ale pravděpodobně ve skutečnosti nižší, neboť do simulace nebyl zahrnut hluk na pozadí.

parametr pro obsazenost	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
EDT [s] (obsazená)	0,97	0,82	0,71	0,81	0,9	0,87
T ₃₀ [s] (obsazená)	0,95	0,73	0,67	0,69	0,85	0,84
C ₅₀ [dB] (obsazená)	-0,7	0,8	2,4	1,1	-0,2	0,3
C ₈₀ [dB] (obsazená)	2,3	3,9	5,9	4,2	2,9	3,4
EDT [s] (prázdná)	1,18	0,98	0,97	1,06	1,19	1,07
T ₃₀ [s] (prázdná)	1,07	0,80	0,79	0,91	1,03	0,95
C ₅₀ [dB] (prázdná)	-1,9	-0,3	-0,1	-0,8	-1,7	-1,0
C ₈₀ [dB] (prázdná)	1,3	3,1	3,4	2,5	1,5	2,2

Tabulka 5.2. Výsledné hodnoty ze simulace místnosti 132 pro prázdný a plný stav.

parametr pro obsazenost	Frekvence [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
T ₃₀ [s] (0%)	0,97	1,04	1,07	1,17	1,30	1,04
C ₅₀ [dB] (0%)	1,2	1,5	1,1	0,7	1,0	0,9
T ₃₀ [s] (30%)	0,88	0,94	0,91	1,04	1,17	1,00
C ₅₀ [dB] (30%)	0,2	-0,1	0,6	-0,6	-1,7	-0,6
T ₃₀ [s] (50%)	0,86	0,87	0,79	0,91	1,06	0,92
C ₅₀ [dB] (50%)	0,1	0,0	1,1	-0,1	-1,3	-0,2
T ₃₀ [s] (80%)	0,84	0,85	0,73	0,81	0,96	0,86
C ₅₀ [dB] (80%)	0,5	0,5	2,0	0,7	-0,8	-0,1
T ₃₀ [s] (100%)	0,86	0,85	0,77	0,81	0,92	0,86
C ₅₀ [dB] (100%)	0,8	0,8	2,2	0,9	-0,4	0,2
T ₃₀ [s] (100% - Odeon)	1,01	0,95	0,73	0,67	0,68	0,62
C ₅₀ [dB] (100% - Odeon)	-0,4	0,2	2,4	3,2	3,3	4,0

Tabulka 5.3. Výsledné hodnoty parametrů T₃₀ a C₅₀ ze simulace místnosti 135 při rozdílném zaplnění.

	obsazenost					
	0%	30%	50%	80%	100%	100% - Odeon
STI [dB]	0,54	0,56	0,58	0,59	0,60	0,66

Tabulka 5.4. Výsledné hodnoty STI pro místnosti 135 v závislosti na různém obsazení.

Pro srozumitelnost C₅₀ vycházejí hodnoty blízké nule, některé kladné, jiné záporné. Norma ČSN 73 0525 ale uvádí požadavek, pro hodnocení stavu jako dobrý, aby hodnoty byly kladné.

Hodnoty doby dozvuku T₃₀ vycházeli obdobně pro obě místnosti. V neobsazeném stavu se výsledky nacházeli mimo doporučené hranice a na optimální dobu bylo dosaženo až při plném obsazeném stavu místností dle požadavků normy ČSN 73 0527 pro vyhodnocení využití našeho případu, konkrétně použití místnosti pro řeč jako kmenové učebny s objemem místnosti 500 m³.

Kapitola 6

Závěr

Tato práce se zabývá zkoumáním modelování v akustice. Cílem bylo vytvořit modely dvou přednáškových místností o stejném půdorysu s rozdílnými akustickými úpravami. Bylo nezbytné provést rešerši k potřebným akustickým veličinám a problematice simulování prostorové akustiky. Provedl jsem rovněž rešerši k pohltivosti různých materiálů, především akustických prvků nacházejících se v místnosti. Posléze bylo nutné stanovit tvar, rozměry a činitel zvukové pohltivosti jednotlivých posluchačů pro možnost modelování konkrétní obsazenosti.

Výsledné hodnoty obou místností i přes rozdílné akustické úpravy nejevili velké rozdíly ve výsledných hodnotách. Větších rozdílů bylo dosaženo mezi prázdnou místností a jejím postupným zvyšováním obsazenosti. Díky vyšší obsazenosti výsledné hodnoty vyhovovali požadavkům normy. Větší rozdíly nastali u při porovnání modelu tvořeného individuálních postav při plně využití kapacitě, oproti modelu s modelovaným sezením, které bylo tvořeno po vzoru hledištěm dle doporučení Odeonu.

Literatura

- [1] CHOI, Young-Ji. Effect of occupancy on acoustical conditions in university classrooms. *Applied Acoustics*. Elsevier, 2016, ročník 114, s. 36–43.
- [2] EVEREST, F. Alton. *Master handbook of acoustics, fourth edition*. McGraw-Hill Education, 2001.
- [3] HEINRICH, Kuttruff. *Room Acoustics*. Fifth Edition vyd. Spon Press, 2009. ISBN 0-203-87637-7.
- [4] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. české vysoké učení technické, 2002.
- [5] 3382-1, ČSN EN ISO. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*.
- [6] ČSN 73 0527. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely*.
- [7] LEE, Doheon, Densil CABRERA a William L MARTENS. Accounting for listening level in the prediction of reverberance using early decay time. *Acoustics Australia*. 2012, ročník 40, č. 2.
- [8] CHRISTENSEN, CL. ODEON, room acoustics software version 17 manual. 2021. Dostupné na www.odeon.dk.
- [9] AHEARN, MJ, MJ SCHAEFFLER, RD CELMER a MC VIGEANT. The just noticeable difference of the clarity index of music, C80. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009, ročník 126, č. 4, s. 2288–2288.
- [10] BRADLEY, John S., R. REICH a SG. NORCROSS. A just noticeable difference in C50 for speech. *Applied Acoustics*. Elsevier, 1999, ročník 58, č. 2, s. 99–108.
- [11] HAK, Constant CJM, Remy HC WENMAEKERS a LCJ VAN LUXEMBURG. Measuring room impulse responses: Impact of the decay range on derived room acoustic parameters. *Acta Acustica united with Acustica*. S. Hirzel Verlag, 2012, ročník 98, č. 6, s. 907–915.
- [12] 60268-16, ČSN EN IEC. *Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*.
- [13] 18041, DIN. *Hörsamkeit in Räumen—Anforderungen, Empfehlungen Und Hinweise für die Planung (Acoustic Quality in Rooms—Specifications and Instructions for the Room Acoustic Design)*.
- [14] HANSEN, CH, BIF GOELZER a GA SEHRNDT. Engineering Noise Control, Occupational Exposure to Noise: Evaluation. *Prevention and Control*. 1996, ročník 10, s. 245–296.
- [15] HODGSON, Murray. Rating, ranking, and understanding acoustical quality in university classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Acoustical Society of America, 2002, ročník 112, č. 2, s. 568–575.
- [16] BERANEK, Leo L a Takayuki HIDAOKA. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. *The Journal of the*

- Acoustical Society of America*. Acoustical Society of America, 1998, ročník 104, č. 6, s. 3169–3177.
- [17] VORLÄNDER, Michael. Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. *The Journal of the Acoustical Society of America*. Acoustical Society of America, 2013, ročník 133, č. 3, s. 1203–1213.
- [18] PIND, Finnur, Allan P ENGSIG-KARUP, Cheol-Ho JEONG, Jan S HESTHAVEN, Mikael S MEJLING a Jakob STRØMANN-ANDERSEN. Time domain room acoustic simulations using the spectral element method. *The Journal of the Acoustical Society of America*. AIP Publishing, 2019, ročník 145, č. 6, s. 3299–3310.
- [19] LAM, Yiu Wai. Issues for computer modelling of room acoustics in non-concert hall settings. *Acoustical science and technology*. Acoustical Society of Japan, 2005, ročník 26, č. 2, s. 145–155.
- [20] RINDEL, Jens Holger. The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of vibroengineering*. Vibromechanika, 2000, ročník 3, č. 4, s. 219–224.
- [21] SAVIOJA, Lauri a U Peter SVENSSON. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*. AIP Publishing, 2015, ročník 138, č. 2, s. 708–730.
- [22] KIRSZENSTEIN, Jakub. An image source computer model for room acoustics analysis and electroacoustic simulation. *Applied Acoustics*. Elsevier, 1984, ročník 17, č. 4, s. 275–290.
- [23] FUNKHOUSER, Thomas, Nicolas TSINGOS, Ingrid CARLBOM, Gary ELKO, Mohan SONDHI, James E WEST, Gopal PINGALI, Patrick MIN a Addy NGAN. A beam tracing method for interactive architectural acoustics. *The Journal of the acoustical society of America*. Acoustical Society of America, 2004, ročník 115, č. 2, s. 739–756.
- [24] COMSOL. *Modeling Room Acoustics with COMSOL Multiphysics*. Dostupné na www.comsol.com. Přístupný web: 3.1.2023.
- [25] HONEYCUTT, Richard. *Predictive acoustics and acoustical modeling software: Catt-Acoustic*. Dostupné na <https://audioxpress.com/article/predictive-acoustics-and-acoustical-modeling-software-catt-acoustic>. Přístupný web: 3.1.2023.
- [26] BRANDÃO, Eric, Edna SO SANTOS, Viviane SG MELO, Roberto A TENENBAUM a Paulo H MAREZE. On the performance investigation of distinct algorithms for room acoustics simulation. *Applied Acoustics*. Elsevier, 2022, ročník 187, s. 108484.
- [27] NAYLOR, Graham M. ODEON—Another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics*. Elsevier, 1993, ročník 38, č. 2-4, s. 131–143.
- [28] PIEREN, Reto, Beat SCHÄFFER, Stefan SCHOENWALD a Kurt EGGENSCHWILER. Sound absorption of textile curtains—theoretical models and validations by experiments and simulations. *Textile Research Journal*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2018, ročník 88, č. 1, s. 36–48.
- [29] *Akustika a design v interiéru- Podklady pro projektování*. Dostupné na <https://www.rigips.cz>.
- [30] *Canvas: A very powerful noise absorber that you can fully trust to solve your bigger rooms' acoustic problems. Perfectly measured*. Dostupné na <https://www.mute.design>.

Příloha **A**

Přílohy bakalářské práce

Dodatečné přílohy bakalářské práce.

model-132.skp	model místnosti 132
model-135.skp	model místnosti 135
model-132-Odeon.skp	model plně obsazené místnosti 132 dle Odeonu
model-132-Odeon.skp	model plně obsazené místnosti 135 dle Odeonu
katolog-AKUSTIKA_A_DESIGN_10_22.pdf	Katalog firmy Rigips [29]
canvas.pdf	Katalog firmy Canvas [30]