

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra Fyziky

Program: Lékařská elektronika a bioinformatika



Akustické modelování v systému ODEON

Room acoustics modeling in the ODEON software

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Milan Gondek
Vedoucí práce: Ing. Marek Brothánek, Ph.D.
Rok: 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gondek** Jméno: **Milan** Osobní číslo: **495581**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**

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 akustické laboratoře včetně učebny a následně provedte jeho akustické analýzy. Prostory lze pojímat jako akusticky vázané, proto problematiku s tím spojenou popište i v teoretické části práce. 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: **31.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

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

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Milan Gondek

Poděkování

Předně poděkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Brothánkovi, Ph.D. za věnování cenných rady, času a trpělivosti při přípravě této práce. Dále bych rád projevil vděčnost mé rodině za podporu v době studia a při psaní této bakalářské práce.

Milan Gondek

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá prostorovou akustikou a její simulací. K problematice práce obsahuje teoretický základ, skládající se z obecných poznatků z akustiky a konkrétních doporučení a požadavků na vnitřní prostory. Práce si dává za cíl seznámit se se softwarovým modelováním a simulací prostorové akustiky v ODEONu pomocí ray-traycingu. Dále usiluje o vytvoření modelu komplexní místnosti obsahující provázané prostory s odlišným použitím. Pro tento účel byl vybrán prostor v budově FEL ČVUT disponující ve spodní části laboratoří a v horní učebnou. Zde byla provedena analýza a došlo k navrhnutí a rozboru akustických úprav s důrazem na zlepšení vlastností učebny.

Klíčová slova: prostorová akustika, ray-tracing, ODEON, akusticky vázané prostory, doba dozvuku

Abstract: This bachelor's thesis focuses on room acoustics and its simulation. It addresses the issue by providing a theoretical foundation, consisting of general knowledge in acoustics as well as specific recommendations and requirements for interior spaces. The thesis aims to explore software modeling and simulation of spatial acoustics using ray-tracing techniques in ODEON. Furthermore, it seeks to create a model of a complex room that includes acoustically coupled spaces with different uses. For this purpose was chosen a room in the FEL ČVUT building with lower part as laboratory and an upper part as classroom. An analysis was conducted, leading to the proposal and analysis of acoustic modifications with a focus on improving the classroom's properties.

Key words: room acoustics, ray-tracing, ODEON, coupled rooms, reverberation time

Obsah

1	Úvod	9
2	Prostorová akustika	11
2.1	Členění akustiky	11
2.2	Akusticky vázané prostory	13
2.3	Materiály	14
2.4	Parametry a jejich měření	18
2.4.1	Měřicí techniky	18
2.4.2	Parametry prostorové akustiky	20
2.5	Příklady software pro modelování akusticky	25
2.6	Doporučení a požadavky na vybrané prostory	27
3	Modelovací software prostorové akustiky ODEON	31
3.1	Pravidla modelování místnosti	31
3.2	Zdroje a přijímače	32
3.3	Materiály v ODEONU	33
3.4	Obsazenost místnosti	35
3.5	Princip výpočtu	35
3.6	Ověření kvality měření	42
3.7	Vizualizace a auralizace	42
4	Simulace konkrétního prostoru	43
4.1	Popis prostoru	43
4.2	Simulace akustických vlastností stávající místnosti	43
4.3	Návrh akustických úprav	53
5	Závěr	61
	Literatura	63
	Přílohy	66
A	Přílohy	67

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá prostorovou akustikou a její simulací. Cílem je uvést problematiku z obecného hlediska a následně znalosti aplikovat na konkrétní prostor. Uceleného obecného přehledu je dále využito při popisu možností a metod výpočtů programu ODEON, který je použit pro simulaci v praktické části práce.

Teorie se v úvodu věnuje základnímu přístupu k akustice a představuje prostor a materiály z pohledu zvuku. Následně pomocí vysvětlených principů uvádí čtenáře do prostorové akustiky a používaných měřicích technik. Z těchto metod vychází řada akustických parametrů, na které jsou následně kladeny nároky národními a mezinárodními normami. Druhá polovina teorie je věnována modelovacímu softwaru ODEON a dává si za cíl popsat možnosti a omezení simulací pomocí vysvětlení principů na kterých probíhají.

V praktické části je ODEON použit k vymodelování a simulaci akusticky provázaných prostor. Hlavní důraz je kladen na část sloužící k výuce, kde dochází k simulování obsazenosti prostoru posluchači a porovnání parametru doby dozvuku s hodnotami předepsanými normami. Následně je uskutečněn návrh akustických úprav zaměřených na zlepšení akustických vlastností učebny. Po dílčím vyhodnocení dopadu jednotlivých úprav na akustické parametry je nasimulován finální návrh. Ten je zkonstruován jako souhrn již rozebraných úprav a finální simulované hodnoty jsou opět porovnány s doporučením norem.

2 Prostorová akustika

V této kapitole je popsáno základní členění aproximací akustiky, které se v prostorové akustice využívá. Dále jsou zde popsány teoretické základy potřebné pro pochopení přístupu akustiky k prostorům a materiálům. Důležitou částí je následně rozbor akustických parametrů, kde jsou uvedeny měřící techniky, definice a hodnoty jakých by měly nabývat.

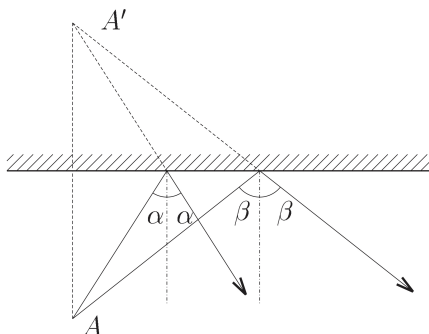
2.1 Členění akustiky

V akustice lze rozložení zvukového pole v prostoru popsat více způsoby aproximující jednotlivé jeho vlastnosti. Za tímto účelem rozlišujeme Geometrickou akustiku, Vlnovou akustiku a Statistickou akustiku, jež jsou podrobně popsáno níže.

Geometrická akustika

Geometrická akustika využívá aproximace zvukových vln za pomoci zvukového paprsku. Tohoto zjednodušení je možné využít v limitním případě, kdy vlnová délka je v porovnání s rozměry místnosti zanedbatelná a tudíž lze opominout difrakci. Při nahrazení vlny za pomoci přímek též neuvažujeme interferenci a suma paprsků probíhá pouze jako součet amplitud zanedbávající fázi.

Za těchto podmínek lze následně řešit šíření zvukového paprsku a jeho odraz za pomoci principu zrcadlení zdrojů. Tento postup je zejména vhodný jsou-li odrážející plochy roviny.



Obrázek 2.1: Odraz paprsků od rovinné stěny. Převzato z [16].

Na obrázku 2.1 je ukázka principu zrcadlení původního zdroje A na zdroj A' . Obdobný přístup lze nalézt i v optice za použití identické aproximace.

V reálném prostředí však stěny nejsou homogenní ani nekonečně veliké a je tedy potřeba brát do úvahy i ohyb a rozptyl zvukových paprsků. Tento případ odrazu je nazýván difuzní nebo částečně difuzní a je popsán Lambertovým kosinovým zákonem. Pomocí rovnice

$$I(r) = I_0 dS \frac{\cos \vartheta \cos \vartheta_0}{\pi r^2} \quad (2.1)$$

lze vypočítat intenzitu odraženého paprsku $I(r)$ ve vzdálenosti r pod úhlem ϑ , když dopadající paprsek na plochu dS má intenzitu I_0 a úhel dopadu ϑ_0 . [16]

Vlnová akustika

Pohled vlnové akustiky vychází z uvažování o zvuku jako o vlně. K řešení šíření zvuku je potom použita vlnová rovnice s definovanými okrajovými podmínkami, jež charakterizují uzavřený prostor.

S využitím vlastností vlny lze následně rozpoznat vlastní kmity prostoru hrající velmi důležitou roli v celkové frekvenční odezvě. V okamžiku buzení místnosti za použití vlastní frekvence může docházet k rezonanci a zesílení daného kmitočtu. Pro dobrý přenos je proto důležité zajistit dostatečný počet vlastních frekvencí v posluchovém a tedy i testovacím frekvenčním pásmu. Pro rozdělení frekvenčního pásma lze využít Schröderovu frekvenci vypočítanou pomocí rovnice (2.2) jakožto předěl mezi nízkofrekvenčním pásmem s převládajícími separovanými módy a vysokofrekvenčním pásmem s převládajícími hustými modálními přesahy se statistickými (Gaussovskými) vlastnostmi [27]. Tento faktor je zpravidla zajištěn pro místnosti větší než 200 m^3 . Z tohoto důvodu se budeme zabývat pouze většími prostory. [16]

Ve vztahu

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

označuje T_{60} dobu dozvuku a V objem prostoru.

Vlnové modely jsou charakteristické velmi přesnými výsledky pro jednotlivé frekvence. V případě simulace akustiky místností je však tato přesnost redundantní a spolu s vysokou výpočetní náročností činí metodu pro toto využití méně efektivní. [24]

Statistická akustika

Statistická akustika vnímá zvuk uzavřený v prostoru jako částice nacházející se v difuzním poli a lze ji uplatnit pouze jsou-li splněny následující podmínky:

1. Objemová hustota akustické energie je ve všech bodech pole konstantní. Toho je docíleno pouze v oblasti, ve které převládá energie odražených vln.
2. Energie v každém bodu je dána pouze součtem středních hodnot energií, které pocházejí odražením od stěn. Uvažují se pouze nekoherentní zdroje z důvodu zanedbání interferenci.
3. Pro zvukové vlny dopadající do libovolného bodu v prostoru jsou všechny dopadové úhly stejně pravděpodobné.

Z těchto podmínek vyvozujeme, že teorie lze využít pouze v dostatečné vzdálenosti od zdroje a energetické veličiny vycházející z těchto předpokladů jsou charakterizovány pouze středními hodnotami.

Metoda statistické akustiky stojí na bilanci energie vyzářené zdrojem a pohlcené stěnami vycházející ze zákona zachování energie. Ve vzniklém difuzním poli tedy dochází k efektu, při kterém je energie vyzářená zdrojem rovna energii pohlcené stěnami a vzduchem. Na této teorii stojí i výpočet mnoha akustických veličin jako je doba dozvuku, jenž je jeden z nejdůležitějších parametrů prostorové akustiky a je blíže popsán v sekci 2.4.2.[16]

2.2 Akusticky vázané prostory

Termín akusticky vázané prostory je použit pro systémy s místnostmi spojenými otvorem o ploše S' . Ta je při porovnání s ekvivalentní absorpční plochou spojovaných místností malá.

Pro úvahu uvažujme systém o dvou místnostech, ve kterých je čas dozvuku T_1 místnosti 1 větší než čas dozvuku T_2 místnosti 2 a spojující plochu lze nazvat v porovnání s plochou stěn malou. Potom v případě, kdy se posluchač nachází v místnosti 1, dochází vlivem spojení pouze ke zvýšení doby dozvuku. Toto je zapříčiněno vlastnostmi spojujícího otvoru, jenž lze připodobnit otevřenému oknu. V okamžiku, kdy však posluchače umístíme do místnosti 2, jeho vnímání začne být silně ovlivněno způsobem excitace prostoru. Když zdroj umístíme do místnosti s kratší dobou dozvuku, dozvuková křivka bude složena ze dvou rovných částí oddělených ohybem nacházejícím se na poklesu ΔL_c dle (2.3). Tento jev je graficky znázorněn na obrázku 2.2. V okamžiku excitace systému z místnosti 1, posluchač v prostoru 2 registruje nežádoucí dozvuk přicházející z první místnosti, který se subjektivně jeví nepřírozně. Ten je patrný hlavně pokud popsáný ohyb mezi dvěma částmi bude v dostatečně vysoké hladině a excitační signál obsahuje impulzní složky jako například bubny. [17]

Rovnice

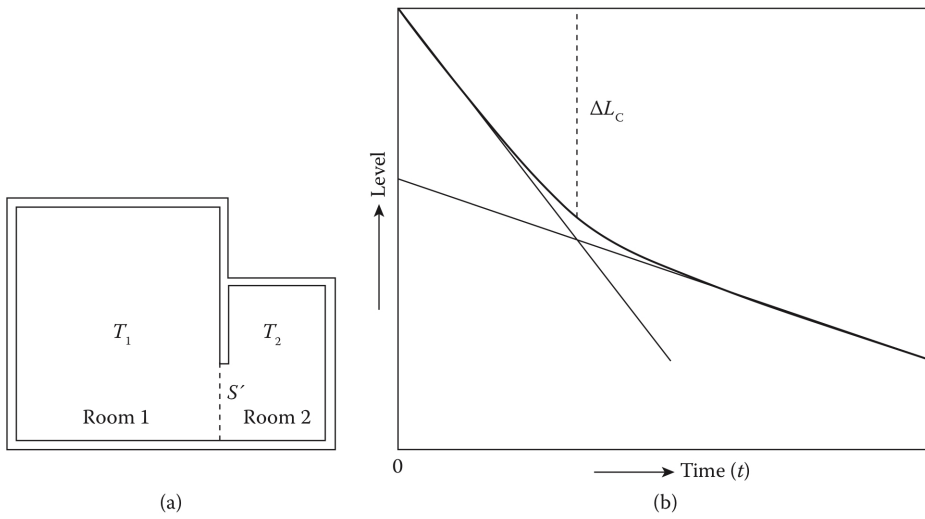
$$\Delta L_c = \frac{10}{1 - (\delta_1/\delta_2)} \cdot \log_{10} 1/C - 3\text{dB} \quad (2.3)$$

disponuje konstantami C , δ_1 a δ_2 , které lze spočítat jako

$$C = \frac{1}{V_1 V_2 (\delta_1 - \delta_2)^2} \cdot \left(\frac{c S'}{8} \right)^2 \quad (2.4)$$

$$\delta_i = \frac{c A_i}{8 V_i} \quad (2.5)$$

kde c je rychlost šíření zvuku ve vzduchu, A je ekvivalentní plocha pohltivosti, V je objem vybrané místnosti, S' je obsah otvoru spojující vázané prostory a index i nabývá hodnot 1 a 2, které stejně jako indexy v (2.3) a (2.4) odpovídají místnostem na obrázku 2.2.



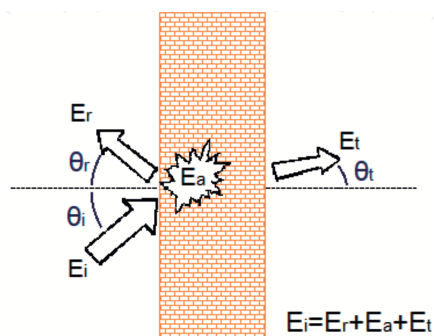
Obrázek 2.2: Vázané prostory: (a) geometrické rozložení místností, (b) ohnutá poklesová křivka složená ze dvou částí, ΔL_c charakterizuje pozici ohybu. Převzato z [17].

2.3 Materiály

Materiál použitý v místnosti je klíčový prvek určující její akustické vlastnosti. Jeho výběrem lze určovat typ a kvalitu povrchů tak, aby prostor byl vhodný pro uvažovaný účel. To zahrnuje harmonické spojení izolace, absorpce a difuznosti zvuku.[13]

Popis bilance energií na rozhraní

Při nárazu zvukové vlny na povrch, dojde z celkové dopadnuté energie E_i k částečnému odražení energie E_r zpět do stejného prostoru, ze kterého přišla. Zbylá energie je potom složená z části, která je pohlcena materiálem E_a a částí, která projde na druhou stranu, kde opět vytvoří zvukovou vlnu.[13] Graficky znázorněno na Obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Rozklad akustické energie při dopadu na povrch. Převzato z [13].

Materál	Frekvence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Cementová vápenná malta	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05
Dveře dřevěné, lakované	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Parketová podlaha, lepená	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Koberec, do výšky 6 mm, na betonu	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	0,35
Linoleum na betonu	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Police na knihy (na m ² plochy)	0,30	0,39	0,39	0,31	0,29	0,21

Tabulka 2.1: Ukázka činitele pohltivosti α pro vybrané povrchy z normy [1].

Činitel zvukové pohltivosti α

Absorpce akustické energie materiálem je zajištěna prostřednictvím přeměny na jiný typ energie jako například mechanickou, tepelnou nebo deformační, jenž je následně rozptýlena.

Pohltivost materiálu je popsána činitelem zvukové pohltivosti α , který je definován jako podíl pohlcené energie a energie dopadu

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}. \quad (2.6)$$

Činitel α je silně frekvenčně závislý a je nejčastěji udáván pro jednotlivé oktávové pásma jak je ukázáno v tabulce 2.1. [13]

Publikum

Akustické vlastnosti prostoru se výrazně mění s množstvím lidí nacházejících se uvnitř měřené místnosti. Proto je potřeba při simulaci a měření uvažovat i faktor pohltivosti lidí v závislosti na rozložení a počtu jedinců v uvažované situaci. Pohltivost lidí je způsobena převážně oblečením a z tohoto důvodu je předpokládána větší pro vysoké frekvence. Přesné hodnoty se však mění v závislosti na množství a typu oblečení, věku osob a pozici v jaké se nacházejí. Pokud je publikum usazeno, pak

Popis	Frekvence (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Jednotlivec ve skupině, stojící. 1 osoba na 6 m ² podlahové plochy; typická maximální hodnota	0,12	0,45	0,80	1,20	1,30	1,40
Osoba sedící na nečalouněném sedadle	0,15	0,30	0,40	0,45	0,55	0,55
Osoba sedící na lehce čalouněném sedadle	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25
Osoba sedící na sedadle s tlustým čalouněním	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15
Děti v předškolních centrech	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,25
Žáci základních škol (do 11 let), sedící v lavicích	0,05	0,10	0,20	0,35	0,40	0,45
Žáci střední školy sedící v lavicích	0,10	0,15	0,35	0,50	0,50	0,55

Tabulka 2.2: Ekvivalentní plocha pohltivosti A pro osobu v m². Hodnoty převzaty z [1].

hodnoty závisí též na typu židlí. Efekt čalounění je patrný hlavně ve zvýšení absorpčnosti pro nízké frekvence, pro hodnoty 1000 Hz a výše se hodnoty v závislosti na vlastnostech židlí nemění. Ukázka hodnot je uvedena v tabulce 2.2.

Kromě zkrácení doby dozvuku z důvodu pohltivosti usazeného obecnstva je zde i efekt útlumu způsobený zvukovými vlnami cestujícími paralelně nebo skoro paralelně se sedícím publikem. Tento jev je pozorovatelný pro nahuštěné plochy k sezení, a to jak obsazené, tak i neobsazené. Útlum se projevuje jako lineární s poklesem hladiny akustického tlaku přibližně o 1 dB na metr publika ve frekvenčním rozmezí 500-2000 Hz.

Nejčastěji se akustické vlastnosti jedince udávají za pomoci ekvivalentní pohltivé plochy A , která je s činitelem pohltivosti provázána vztahem

$$A = \alpha S \quad (2.7)$$

kde S je plocha povrchu s pohltivostí α .

Příklad hodnot A pro posluchače je uveden v tabulce: 2.2. Pro případ výpočtu doby dozvuku pomocí vzorce je potom tato plocha užita pro výpočet středního činitele zvukové pohltivosti $\bar{\alpha}$ vztahem

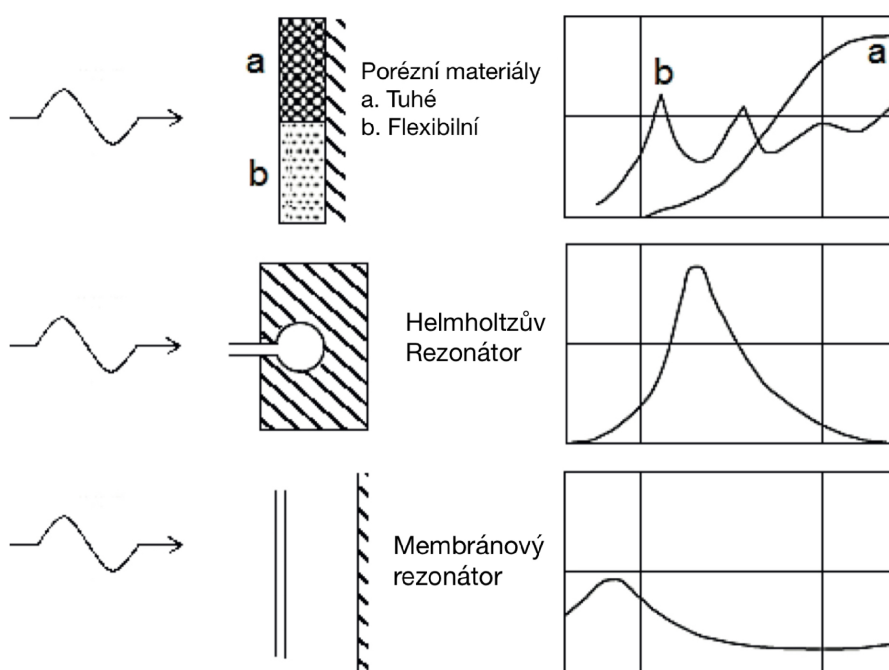
$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \left(\sum_i S_i \alpha_i + N_p A \right) \quad (2.8)$$

kde ekvivalentní pohltivá plocha A je zenásobená odpovídajícím počtem jedinců N_p . [16] [17] Výpočet doby dozvuku je podrobně popsán v sekci 2.4.2.

Difuzory a absorbéry

Akustická kvalita místnosti je úzce spojena s distribucí akustické energie. Při dosažení ideálního homogenního rozptýlení bychom docílili stejné poslechové kvality pro každého posluchače v místnosti. Difuze zvuku je zprostředkována mnohonásobnými odrazy a difrakcemi na nerovnoměrných površích. Ke zlepšení akustiky místnosti v tomto směru se používají difuzory. Ty prostřednictvím vhodné úpravy povrchu výrazně přispívají k rozptylu akustické energie do všech směrů a používají se tak na opravu akustických defektů jako jsou brzké a pozdní odrazy a vlastní módy prostoru. Návrh povrchových nerovností lze provést prostřednictvím aplikace interference akustických vln. [13]

Druhým speciálním typem materiálu jsou absorbéry dělicí se na porézní/vláknité, membránové a rezonátory. Jejich přibližná charakteristika spolu se schématem je uvedena na obrázku 2.4



Obrázek 2.4: Charakteristika a schéma vybraných akustických absorbérů. Převzato z [13].

Porézní/vláknité typy absorbérů pohlcují zvuk pomocí dvou principů.

- Měkké materiály provádí absorpci prostřednictvím deformace povrchu při dopadu vlny.
- Porézní materiály absorbují vibrace vzduchu nacházejícího se uvnitř pórů, kde ztrácí energii prostřednictvím tření o hrany.

Účinnost tohoto druhu absorbérů se zlepšuje se zmenšující se vlnovou délkou dopadajícího zvuku v porovnání s nerovnostmi na povrchu. Ve většině případů je však

tato frekvence dostatečná na pokrytí většiny konverzačních frekvencí. Dalším důležitým faktorem je rozměr materiálu kde platí, že pohltivost akustického tlaku roste lineárně s tloušťkou absorberu. Za porézním materiálem se vytváří uzel akustické rychlosti a první kmitna je následně ve vzdálenosti čtvrtiny vlnové délky ($\lambda/4$) pohlcované frekvence. Z tohoto důvodu je nejlepší účinnost dosažena pro rozměry porézních materiálů s tloušťkou větší nebo rovnou ($\lambda/4$). [16]

Membránové a deskové absorberů fungují na principu za okraje přichyceného materiálu v určité vzdálenosti od pevného povrchu. V okamžiku kdy tvrdost nataženého materiálu je zanedbatelná se jedná o membránový absorber, v opačném případě mluvíme o deskovém. Nejlepší účinnost deskového absorberu je docílena pro rezonanční frekvenci f_r vypočítanou jako

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad (2.9)$$

kde m je plošná hustota a d je vzdálenost panelu od pevné plochy. Tento typ materiálů však většinou dosahuje koeficientu pohltivosti maximálně 0,50 a hodí se pouze pro nižší frekvence.

Posledním zmíněným typem absorberu je rezonátor. Ten se vyznačuje dutinou, jež je spojena s povrchem prostřednictvím zúženého průchodu. Takto je rezonátor schopen rozptýlit energii převážně na své rezonanční frekvenci vypočítanou podle vzorce

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{Vl_e}} l_e = l + 1,7r \quad (2.10)$$

kde S je plocha spojovacího průchodu, V je objem rezonátoru, l je efektivní délka průchodu a r je poloměr průchodu. Vzhledem k této vlastnosti je absorber selektivní a využití nalézá v případě potřeby vyfiltrování dobře známé frekvence. [13]

2.4 Parametry a jejich měření

Pro objektivní zjištění akustických vlastností prostoru je používaná celá řada parametrů dávajících do souvislosti subjektivní vnímání místnosti s fyzikálně měřitelnými veličinami. S jejich pomocí lze následně odhadnout vhodnost užití pro zamýšlený účel, čehož je využito v případě udávání adekvátních hodnot v normách jako je například DIN 18041 nebo ISO 3382-1, 2 a 3.

2.4.1 Měřicí techniky

Podle teorie systémů jsou všechny vlastnosti lineárního přenosu systémem obsaženy v jeho impulzní odezvě nebo po převedení do frekvenčního spektra v přenosové funkci. Díky tomu je používána pro odvození velkého množství akustických parametrů a její měření je tudíž jeden z nejzákladnějších úkonů v experimentální prostorové akustice. Techniky jejího měření jsou proto nesmírně důležité, a to i jako prostředek pro zmírnění dopadů fyzikálních nedokonalostí měřicí aparatury a dalších vyskytujících se limitací. [17]

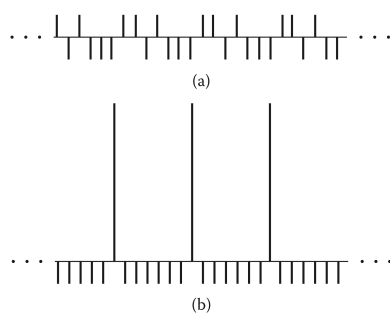
Impulzní odezva

Impulzní odezva je nazýván výstup systému za použití jako excitačního signálu Diracova impulsu. Akustická metoda měření vycházející přímo z definice používá pro excitaci místnosti aproximaci Diracova pulzu v podobě prasknutí balónku, elektrického výboje nebo výstřele z pistole. Stejně tak lze provést měření pomocí reproduktorů za použití například obdélníkového signálu o délce $20 \mu s$ (pokud nás zajímají frekvence do 10 kHz). Je však potřeba počítat s lineárním zkreslením signálu způsobeného použitím reálných reproduktorů. Problematickým u této metody je též docílení dostatečné amplitudy vstupního signálu, kde v případě ideálního Diracova pulzu by měla být nekonečná. [17]

Metoda Maximum Length Sequence (MLS)

MLS je složený z pseudonáhodné periodické sekvence $+1$ a -1 generované posuvným registrem řádu m s počtem elementů v jedné periodě $L = 2^m - 1$. Grafická ukázka MLS a autokorelační funkce je na obrázku 2.5. Pro získání impulzní odezvy je následně potřeba na nahrávku použít cyklickou dekonvoluci za použití původního signálu.

Použití takového pseudonáhodného hluku jako excitačního signálu skýtá velké množství výhod, jako je perfektně ploché spektrum a typicky 100 krát menší maximální amplitudu, oproti metodě používající pouze jeden impuls. Navíc se použitím hodnot lišících pouze znaménkem stává metoda robustní vůči zkreslení na reproduktoru. [17] [25]



Obrázek 2.5: MLS signál pro $m = 3$ ($L=7$). (a) Sekvence, (b) její autokorelační funkce. Převzato z [17].

Metoda Exponential Sine Sweep (ESS)

Přelaďovaný sinus (též nazývaný TSP - Time Stretched Pulse) je signál reprezentovaný sinusoidou, která v čase mění svoji frekvenci. V případě měření impulzní odezvy se s výhodou používá signál $s(t)$ s exponenciální změnou kmitočtu, který lze generovat jako

$$s(t) = \sin \left[K \cdot \left(e^{\frac{t}{L}} - 1 \right) \right], \quad (2.11)$$

kde

$$K = \frac{T \cdot \omega_1}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)}, L = \frac{T}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \quad (2.12)$$

a ω_1 a ω_2 jsou horní a dolní extrémy měřených frekvencí, a T je délka trvání v sekundách. Energie ESS v průběhu času se zvětšující se frekvencí klesá o 3 dB na oktávu, a je proto potřeba pro zachování plochého spektragramu provádět kompenzaci. [18]

Signál $s'(t)$ zaznamenaný po průchodu místností odpovídá rovnici

$$s'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)g(t - \tau) d\tau \quad (2.13)$$

kde $g(t)$ je impulzní odezva a $s(t)$ je excitační vstupní signál. Výpočet samotné impulzní odezvy následně probíhá za pomoci dekonvoluce za použití excitačního signálu. Tento proces je z důvodu efektivity prováděn za pomoci převodu do frekvenční domény. [17]

Poklesová křivka

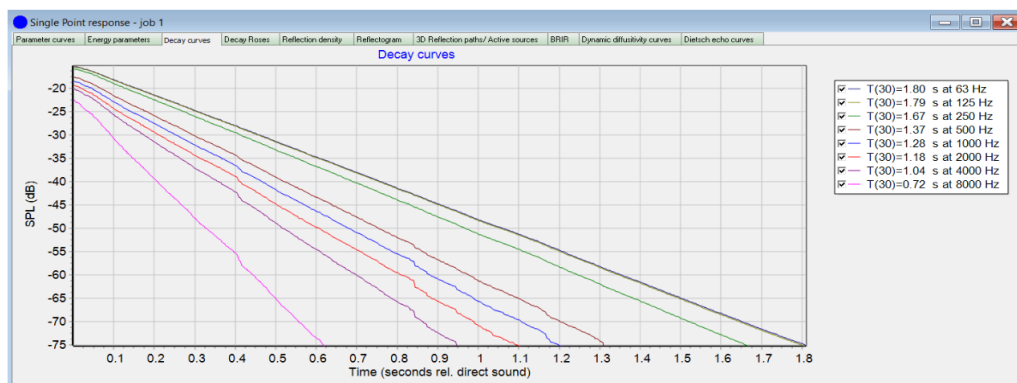
Poklesovou křivkou nazýváme graf znázorňující útlum akustické energie v místnosti po vypnutí zdroje generujícího difuzní pole. Je založena na principu statistické akustiky, kdy po vypnutí zdroje dojde k postupné absorpci akustické energie pomocí vzduchu a stěn.

V případě ODEONu se křivka získává z impulzní odezvy prostřednictvím zpětné integrace pro každé z osmi oktávních pásem v rozmezí od 63 Hz do 8000 Hz zvlášť, znázorněno na obrázku 2.6. V okamžiku nulového hluku v pozadí v simulaci hladina výkonu není důležitá, podstatný je pouze sklon křivky.

Poklesová křivka se následně používá pro odvození doby dozvuku a dalších akustických parametrů podrobně rozebraných v kapitole 2.4.2. Zároveň je též vhodná jako jeden z ukazatelů kvality měření v kapitole 3.6. [20]

2.4.2 Parametry prostorové akustiky

Za pomoci simulace a měření je možné s pomocí ODEONu získat velké množství parametrů. Ty nejpoužívanější jsou již předdefinovány podle standardů ISO 3382 části 1, 2 a 3. V případě potřeby je možné další dodefinovat nebo upravit již existující.



Obrázek 2.6: Poklesová křivka jako výstup softwaru ODEON. Převzato z [20].

SPL (Sound Pressure Level)

Parametr udává úroveň akustického tlaku v daném místě měření. Výpočet je proveden podle rovnice

$$\text{SPL} = 10 \log E_{0-\infty} \quad (\text{dB}) \quad (2.14)$$

Pro použití v simulaci je potřeba adekvátně nastavit zdroj, aby odpovídal správnému akustickému výkonu. Při nastavení všesměrového zdroje na 31 dB na oktávu, je SPL rovno parametru G uvedenému níže.

Doba dozvuku T_{60}

Doba dozvuku je jeden z nejpoužívanějších parametrů v prostorové akustice. Je definována jako čas, za který zvuk poklesne o 60 dB. Za použití teorie statistické akustiky popsané v sekci 2.1 lze výpočet provést pomocí Sabinova vzorce

$$T_s = \frac{0,164V}{\bar{\alpha}S} \quad (\text{s}) \quad (2.15)$$

kde číslo 0,164 bylo odvozeno empiricky, V je objem místnosti, S je celková plocha povrchů. Průměrná pohltivost povrchů $\bar{\alpha}$ je vypočítaná vztahem

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} \quad (2.16)$$

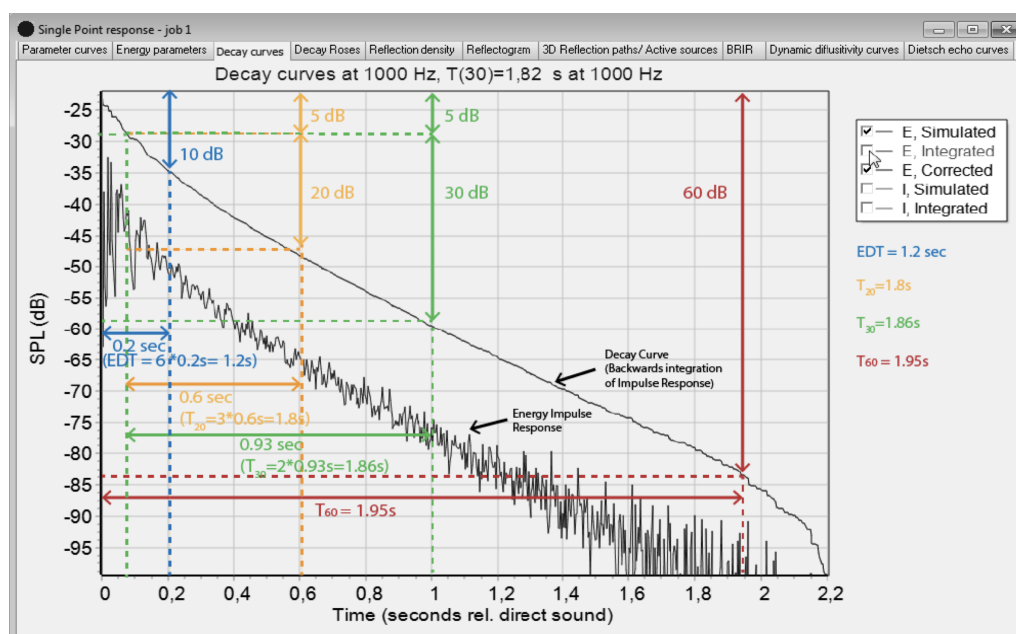
pro plochy S_i s činitelem zvukové pohltivosti α_i . Druhý často používaný vzorec je Eyringův a řeší některé nedostatky Sabinovy rovnice, jako je výpočet doby dozvuku pro $\alpha = 1$. Jeho matematické vyjádření je

$$T_E = \frac{0,164V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (\text{s}) \quad (2.17)$$

Útlum vzduchu je možné do výpočtu zahrnout přičtením ke jmenovateli $4mV$, kde m je činitel útlumu. Ten nabývá hodnot v rozmezí 0,001 až 0,06 v závislosti na frekvencích a relativní vlhkosti vzduchu. [16][12]

V případě měření prováděného v reálném prostředí může být problém zajistit pokles o celých 60 dB. Za tímto účelem jsou použity doby dozvuku T_{15} , T_{20} , T_{30} . Ty vychází z principu výpočtu doby dozvuku pro menší pokles ze zpětně integrované impulzní odezvy a následného znásobení na pokles odpovídající 60 dB. Poklesová křivka však obsahuje ze začátku i přímý zvuk ze zdroje, proto pro výpočet za pomoci zkrácení poklesu a přepočtu je prvních 5 dB vynecháno, jak je patrné na obrázku 2.7. [14]

Optimální doba dozvuku pro uzavřené prostory v závislosti na využití pro 1 kHz je znázorněna na obrázku 2.8 dle normy [8].



Obrázek 2.7: Ukázka výpočtu doby dozvuku. Převzato z [20].

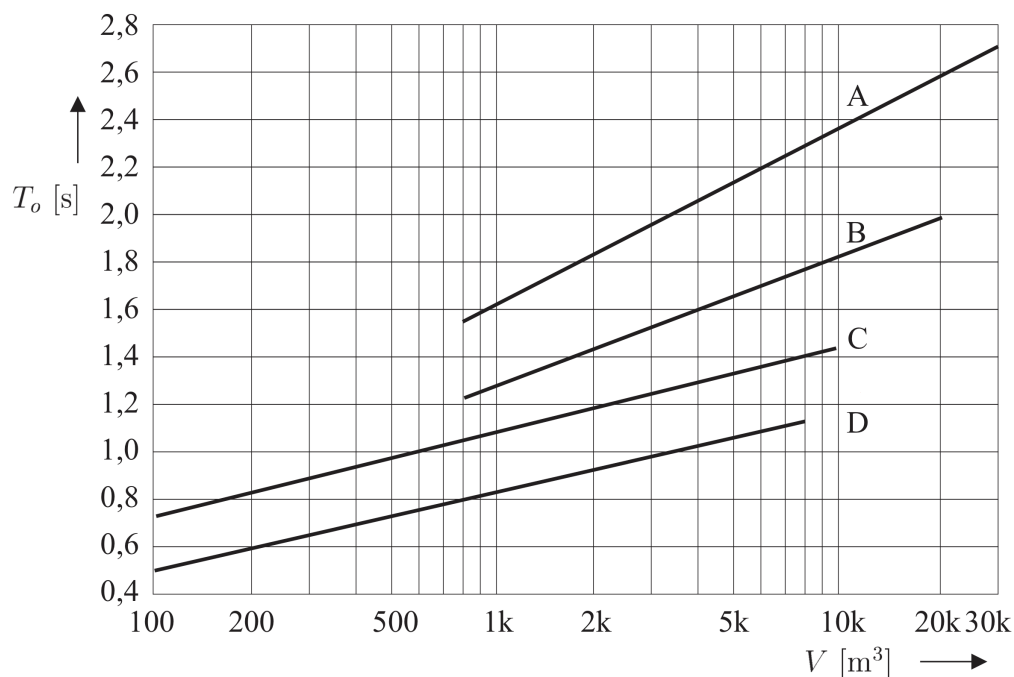
Počáteční doba dozvuku (EDT) též značená jako T_{10} , je parametr, který vyjadřuje pokles hladiny akustického tlaku o prvních 10 dB. Při výpočtu však nedochází k ořezu o prvních 5 dB a je tedy zahrnut i přímý zvuk od zdroje. Díky tomu EDT z pravidla udává nižší hodnoty, než zbylé doby dozvuku. [20]

G (Strength)

Parametr síly zvuku je definován podle normy [10] rovnicí 2.18 a vyjadřuje subjektivní hlasitost. Nabývá hodnot v rozmezí -2 dB až 10 dB.

Výpočet je proveden jako

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{\infty}}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad (\text{dB}), \quad (2.18)$$



Obrázek 2.8: Optimální doba dozvuku v závislosti na objemu místnosti a určení pro frekvenci 1 kHz (A - varhanní hudba, B - orchestrální hudba, C - komorní hudba, D - řeč). Převzato z [16].

kde $p(t)$ je okamžitý tlak impulzní odezvy pořízen v měřícím bodě, $p_{10}(t)$ je okamžitý tlak impulzní odezvy pořízen ve vzdálenosti 10 m ve volném poli.

C (Clarity)

Parametr míry jasnosti C_{50} a míry zřetelnosti C_{80} se zabývá logaritickým poměrem množství energie dorazené před a po určeném čase. C parametr existuje ve dvou variantách: C_{50} , kde mezní čas je 50 ms a užití nachází pro mluvenou řeč a C_{80} s mezním časem 80 ms určenou pro orchestrální hudbu. Míra zřetelnosti je vypočítaná rovnicí

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \left(\frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \right) \text{ (dB)}. \quad (2.19)$$

Podle [20] energie přijatá přijímačem před mezní dobou pomáhá zlepšit jasnost zvuku zatímco energie po daném čase vytváří efekt rozmazání. Hodnoty, jenž by měl parametr C_{50} nabývat pro subjektivní hodnocení „přijatelná“, by měly být vždy větší než 0 dB. Pro C_{80} je potom ideální hodnota 1 ± 2 dB. [8] [17] [14]

T_s (Central time)

Parametr udává čas těžiště kvadrátu impulsové odezvy, jenž je spočítán z rovnice

$$T_s = \frac{\int_0^\infty tp^2(t)dt}{\int_0^\infty p^2(t)dt} = \frac{\int_0^\infty tp^2(t)dt}{E_\infty} \quad (\text{s}) \quad (2.20)$$

a typicky nabývá hodnot mezi 60 ms a 260 ms [10]. Nižší hodnoty odpovídají lepší srozumitelnosti, přičemž pro mluvené slovo by T_s nemělo nabývat hodnot větších než 80 ms, pro hudbu je naopak tolerováno i 150 ms [17] [14].

LF_{80} (Lateral energy Fraction)

Míra počáteční boční energie je podíl energie přicházející z bočních směrů v prvních 80ms. Parametr souvisí s vnímanou šířkou zdroje a dle normy [10] výpočet probíhá ze vzorce 2.21. Ve většině hal nabývá hodnot 0, 1 – 0, 3. [17]

Při použití reálného měření je výpočet proveden vzorcem

$$LF_{80} = \frac{\int_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} p_L^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{80\text{ms}} p^2(t) dt} = \frac{\int_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} p_L^2(t) dt}{E_{0-80}} \quad (-) \quad (2.21)$$

kde $p_L(t)$ je okamžitý akustický tlak impulsové odezvy měřeného prostoru pomocí mikrofону s osmičkovou charakteristikou.

Pro výpočty ze simulace je následně výsledek získán za pomoci nahrazení požadavku specifického mikrofónu funkcí cosinus. Ve vzorci je θ úhel mezi dopadajícím zvukem a pomyslnou osou procházející ušima posluchače čelně postaveného ke zdroji a výpočet vypadá dle [14] takto

$$LF_{80} = \frac{\int_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} (p(t) \cos \theta)^2 dt}{\int_{0\text{ms}}^{80\text{ms}} p^2(t) dt} \quad (-). \quad (2.22)$$

IACC (Interaural cross correlation)

Parametr čísel interaurální vzájemné korelace reprezentuje měření prováděné pomocí umělé nebo skutečné hlavy, kde malé mikrofóny jsou umístěny u vstupů do zvukovodů a souvisí s veličinou "dojem prostorovosti" v koncertním sále.

IACC lze vypočítat použitím normalizované funkce interaurální vzájemné korelace IACF

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (-) \quad (2.23)$$

kde $p_l(t)$ je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a $p_r(t)$ je impulsová odezva na vstupu do pravého ušního kanálu. IACC následně vypočítáme pomocí rovnice

$$\text{IACC}_{t_1, t_2} = \max|\text{IACF}_{t_1, t_2}(\tau)| \quad \text{pro } -1\text{ms} < \tau < +1\text{ms}. \quad (2.24)$$

Pomocí IACC lze měřit nepodobnost signálu přicházejícího do levého a pravého zvukovodu buď pro počáteční odrazy ($t_1 = 0$ a $t_2 = 80$ ms), a nebo pro odražený zvuk ($t_1 = 80$ ms a $t_2 =$ čas větší než doba dozvuku). [10]

STI (Speech transmission index)

Index přenosu řeči je ukazatel kvality přenosu mluveného slova a jeho srozumitelnosti pro příjemce umístěn v místnosti. V softwaru ODEON je výpočet proveden v souladu s normou [9], kde se počítá i s přidáním hladiny hluku v pozadí. [20] Stupnice subjektivního hodnocení číselného výsledku STI je uvedena v tabulce 2.3.

Subjektivní stupnice	STI hodnota
Hodně špatný	0,00 - 0,30
Špatný	0,30 - 0,45
Uspokojivý	0,45 - 0,60
Dobry	0,60 - 0,75
Excelentní	0,75 - 1,00

Tabulka 2.3: Tabulka subjektivního hodnocení srozumitelnosti pro hodnoty STI. Převzato z [20].

2.5 Příklady software pro modelování akusticky

S neustále se zvyšujícím výpočetním výkonem se naskýtají lepší možnosti simulací i tak komplexních polí jako je to akustické. Díky těmto možnostem je na trhu množství kvalitního softwaru se zaměřením na různá témata s často individuálním přístupem k řešení problémů. V této kapitole je uveden přehled a možnosti použití vybraných akustických programů, jenž je možné koupit či stáhnout zdarma.

Comsol

Comsol je všeobecně zaměřený software pro inženýry, výrobce a vědecké pracovníky. Disponuje spojením více fyzikálních simulací v jednom nástroji a možností je uplatnit simultánně. Dále pak lze docílit vyšší specializace prostřednictvím add-on modulů. Ty jsou schopny rozšířit základní jádro o elektromagnetismus, strukturální mechaniku, akustiku, pohyb tekutin a další.

Akustický add-on modul se specializuje na simulaci kvality zvuku a účinnost potlačení hluku. Obecně je navržen na modelování akustiky a vibrací pro reproduktory, mobilní zařízení, mikrofony, senzory, průtokoměry, místnosti a koncertní sály. Dále pak obohacuje multifyzikální jádro o numerické metody Finite element method (FEM), Boundary element method (BEM), ray-tracing a další.

Hlavní výhodou Comsolu je použití multifyzikálního přístupu k jednomu problému dávajícího do souvislosti vícero fyzikálních faktorů. [6]

Simcenter - Siemens acoustic simulation

Simcenter kombinuje podobně jako Comsol více typů simulací do jednoho softwaru. Simcenter je však zaměřen spíše na vývoj produktu od počátku s důrazem na použití jako centrum pro komunikaci, sjednocení a zjednodušení práce. Jedná se o spojení simulací tekutin, teplot, elektromagnetismu a dalších fyzikálních vlastností.

S akustickým modelováním pomáhají v Simcenter pokročilé funkce spolu s připravenými modely různých struktur a tekutin. Výpočet je prováděn použitím numerických metod FEM a BEM. Dále se software zaměřuje na hluk způsobený prouděním vzduchu kolem objektů a získáváním tak akustických vlastností těles. Tento přístup pomáhá nalézt zdroje hluku, přenosové cesty a akustickou odezvu systému. Problematiku vzniku hluku a jeho přenos lze řešit zvlášť, nebo je možné využít hybridní kombinovanou metodu simulující oba problémy najednou.

Simcenter je též díky kombinaci vícero fyzikálních jevů schopné simulovat aeroakustické zdroje, jenž jsou důsledkem turbulentních toků. To umožňuje provádět simulaci hluku v kabině automobilu nebo kokpitu letadla v závislosti na zatížení oken větrem. Další aplikací je výpočet hluku z potrubí topení, ventilace, klimatizace, lodních a leteckých vrtulí a dalších. [28]

Soft DB: RAP-ONE

RAP-ONE (Room Acoustics Prediction and Occupational Noise Exposure) je software určený pro akustické konzultanty, inženýry a průmyslové hygieniky pro analýzu a správu hluku průmyslového prostředí. Využitím simulace lze přesně a rychle určit pro libovolné místo v místnosti úroveň zvuku, příspěvky od každého zdroje a hladinu dávky hluku působícího na pracovníky.

Využití softwaru lze nalézt v analýze hluku pro průmyslové oblasti a v akustickém designu místností. V průmyslu lze simulovat zlepšení při aplikaci akustické úpravy, nebo zhoršení při přidání dalšího zdroje hluku. Pro zlepšení akustiky místností je simulace vhodná pro kulturní prostory a místnosti všech velikostí a typů. Zároveň je software schopen výpočtu doby dozvuku T_{60} . [29]

REW

REW (Room Acoustics Software) je bezplatný software pro měření prostorové akustiky, reproduktorů a audio zařízení. Analýzu prostorů lze využít pro optimalizaci akustiky poslechové místnosti, studia nebo domácího kina a pomůže s nalezením nejlepšího umístění reproduktorů a pozice pro poslech.

Software disponuje nástroji pro generování testovacích zvukových signálů, měření SPL, impedance, frekvenčních a impulzních odezv, zkreslení a vizualizaci výsledků. Pomocí REW lze též vypočítat dobu dozvuku, Thiele-Small parametry a stanovit frekvenci a čas dozívání modálních rezonancí. V případě potřeby lze dokoupit Pro verzi s vylepšenou funkcionalitou. [22]

I-Simpa

I-Simpa je bezplatné grafické uživatelské rozhraní určené pro hostování trojrozměrných numerických kódů pro simulaci šíření zvuku v prostoru. Software je dobře přizpůsoben pro energetické modely jako je ray-tracing, sound-particle tracing, teorie dozvuku a další. V případě potřeby je možné výpočet rozšířit i o vlnový přístup.

Program sám o sobě není celý výpočetní software, ale odpovídá pre- a post-processoru pro akustické kódy. Pro plnou funkčnost je potom potřeba přidat numerické kódy. V současné době je I-Simpa defaultně doplněn o kódy TCR - princip klasické teorie dozvuku a SPPS založeno na sledování částic.

Software je možné aplikovat na řešení a simulaci prostorové a stavební akustiky a průmyslový hluk. Za pomoci vysoké modularity lze však rozšířit využití i na interiéry vozidel, zvuky v dutinách a další. [15]

2.6 Doporučení a požadavky na vybrané prostory

Doporučení udávaná normami se liší v závislosti na velikosti a hlavně určení prostoru, kterého se týkají. Tato sekce bude klást důraz na prostory střední až velké velikosti, hlavně potom na prostory určené k přenosu mluveného slova.

V normě DIN 18041 [1] je tato skupina prostorů označená jako A a jejich akustická kvalita je zabezpečena pomocí správného přizpůsobení doby dozvuku a práce s odrazy v místnosti. Toho je docíleno správným vybalancováním geometrie prostoru, velikosti a vybavení. Pro optimální řečovou komunikaci na střední a velké vzdálenosti za vynaložení mírného úsilí řečníka je potřeba zajistit maximální přenos co nejvíce přímého zvuku a brzkých odrazů do 50 ms. Záměrem je proto potlačení pozdních odrazů bohatých na energii, jež způsobují rušení při porozumění.

Skupinu A lze podle [1] dále rozdělit podle zaměření na

- A1: Hudba
- A2: Proslov/přednáška
- A3: Výuka/komunikace a proslov/přednáška (pro sluchově postižené)
- A4: Výuka/komunikace (pro sluchově postižené)
- A5: Sport.

Toto rozdělení lze následně použít pro určení ideální doby dozvuku T_{Soll} pro daný účel využití prostoru v závislosti na objemu. Nižší doba dozvuku je vnímána jako akusticky příznivější pro komunikaci a preferovaná jedinci se sluchovými indispozicemi. Pro prostor A3 lze tuto cílovou dobu dozvuku vypočítat za pomoci vzorce

$$T_{\text{Soll,A3}} = \left(0,32 \log \frac{V}{\text{m}^3} - 0,17 \right) \quad (\text{s}) \quad (2.25)$$

kde V je objem místnosti v m^3 . Vzorec je platný pouze pro prostory s velikostí $50 \text{ m}^3 \geq V < 5000 \text{ m}^3$. Vypočítaná hodnota následně odpovídá optimální době dozvuku pro 80% obsazenost z normálního stavu místnosti.

Výsledek rovnice (2.25) je nutné vnímat jako frekvenčně závislou hodnotu, která by v ideálním případě měla platit pro všechna oktávová pásma mezi 125 Hz a 4000 Hz. Z důvodu zanedbatelného poklesu akustické kvality místnosti při zvýšení doby dozvuku pro nižší frekvence je tento nesoulad s výsledkem tolerován. Přesné hodnoty tolerance jsou uvedeny v tabulce 2.6.

Norma dále doporučuje konfiguraci zdí a stropu tak, aby podporovaly rozptylování zvuku na základě geometrie místnosti. Pro případ využití místnosti na mluvenou komunikaci, rozdíl mezi velikostí dráhy přímého zvuku a energicky bohatými odrazy by neměl přesahovat 17 m. Dále pak v případě, kdy vzdálenost zadní stěny za posluchači a stěny protější je větší než 9 m, zadní stěna by měla být adekvátně akusticky upravena. Počáteční odrazy zvuku, jenž přispívají jasnosti a zřetelnosti lze posílit za použití zvukově odrazivého povrchu uprostřed stropu.

Dále pak je třeba se vyhnout paralelním povrchům, které je v případě výskytu nutné akusticky ošetřit pomocí částečné absorpce, difuze nebo vytvořením náklonu minimálně o 5° . Hraniční plocha prezentační zóny by měla být odrazivá nebo by měla sloužit jako nízko-frekvenční absorbéry.

Pro prostory do 250 m^3 sloužící jako zasedací místnost, učebny, skupinové místnosti v dětských denních centrech, které primárně slouží mluvené komunikaci, se v důsledku malých rozměrů obecně neuvažuje možnost přetlumení za použití přílišné pohltivosti. V takto malých místnostech může docházet k rušivému dunivému efektu pro nízké frekvence, který lze neutralizovat pomocí prostředků pohltivosti nebo výběru vhodných proporcí místnosti. Pro středně velké místnosti s objemem

od 250 m³ do 5000 m³ je kromě správného rozložení zvuk absorbujícího materiálu důležité i zajistit vychýlení a zpoždění škodlivých odrazů. [1]

V normě ČSN 73 0525 [8] je také uvedena doporučená doba dozvuku v závislosti na použití prostoru a objemu pro frekvenci 1000 Hz s plnou obsazeností prostoru. Hodnoty jsou totožné s grafem 2.8. Stejně jako v [1] je zde tolerováno odchýlení se od požadované hodnoty. V obou případech se tolerance udává jako podíl doby dozvuku prostoru k doporučené době dozvuku $T / T_{\text{doporučená}}$. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.6.

Norma	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	4000
ČSN 73 0525	0,65 - 1,20	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2	0,65 - 1,2
DIN 18041	0,65 - 1,45	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2	0,65 - 1,2

Tabulka 2.4: Tolerance poměru $T/T_{\text{doporučená}}$ udávaná v %. Hodnoty pro ČSN 73 0525 uvedeny pro obsazený prostor určený k přednesu řeči, vychází ze [8]. Hodnoty pro DIN 18041 uvedené pro prostory A1 až A4, vychází ze [1].

Norma ČSN EN ISO 3382-1 [10] disponuje tabulkou 2.6 s akustickými veličinami přiřazeným subjektivním vjemům poslechu, frekvence, ze kterých se hodnoty počítají pomocí průměrování, právě poznatelný rozdíl a rozpětí hodnot, jenž je typické a vypočítaná hodnota by měla být v těchto mezích.

Subjektivní hledisko poslechu	Akustická veličina	Jednočíselné průměrování	Právě poznatelný rozdíl	Typické rozmezí
Subjektivní úroveň zvuku	Síla zvuku G v decibelech	500 až 1000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Vnímaný dozvuk	Počáteční doba dozvuku (EDT) v sekundách	500 až 1000	Rel. 5%	1,0 s; 3,0 s
Vnímání jasnosti zvuku	Míra jasnosti C_{50}	500 až 1000	1 dB	-5 dB; +5 dB
Vnímání jasnosti zvuku	Čas těžiště T_s v milisekundách	500 až 1000	10 ms	60 ms; 260 ms
Zdánlivá šířka zdroje (ASW)	Podíl počáteční boční energie J_{LF} nebo J_{LFC}	125 až 1000	0,05	0,05; 0,35
Obestření posluchače (LEV)	Pozdní hladina bočního zvuku L_J v decibelech	125 až 1000	Neznámý	-14 db; +1 dB

Tabulka 2.5: Akustické veličiny ve skupinách podle poslechových hledisek. Hodnoty převzaty z [10].

3 Modelovací software prostorové akustiky ODEON

ODEON je software specializovaný na prostorovou akustiku velkých poslechových sálů a koncertních sálů. V této kapitole je popsán styl, jakým by se měla reálná místnost modelovat. Dále pak pravidla pro přiřazení správných vlastností použitých materiálů v modelu a představení konceptu přijímačů a zdrojů. Pro pochopení schopností a limitací softwaru je vysvětlen princip simulace a možnosti, jež ODEON nabízí.

3.1 Pravidla modelování místnosti

V softwaru je možné nalézt nástroj na vytvoření a úpravu 3D modelu. Obecně je však předpokládán import již hotové místnosti z jiného CAD programu, jako je například SketchUp (doporučeno [20]), pro který existuje i speciálně vytvořený plugin. Při použití doporučeného software dochází k automatickému splnění podmínek kladených na importovaný model jako jsou: pouze rovné povrchy, žádné opakované body, žádné povrchy s nulovou plochou, rozložení komponentů, skupin a další.

K docílení maximální přesnosti za relativně krátkou výpočetní dobu je potřeba dodržet základní principy pro modelování místnosti.

1. Z důvodu aplikace při výpočtu teorii geometrické akustiky, rozpracované v sekci 2.1, by použité plochy měly být veliké. Z tohoto důvodu by většina použitých ploch měla mít rozměry nad vlnovou délkou střední frekvence tj. 0,34 m.
2. ODEON pracuje pouze s rovnými plochami, všechny zakřivení je nutno modelovat za pomoci vícero rovných ploch. Těm je následně přidán typ stěny *fractional*, díky němuž bude při výpočtu vícero rovných ploch vnímáno jako zakřivená stěna.
3. Pro udržení jednoduchosti modelu a tudíž i zkrácení výpočetního času je dobré modelovat nábytek a předměty pouze pokud jsou-li blízko zdroje nebo dostatečně veliké. V případě vzdálenějších objektů je žádané zjednodušení či úplné vynechání, přičemž pohltivost a rozptyl je částečně přenesen na okolí.

Vzhledem k aproximacím, které ODEON používá je potřeba dbát na objem místnosti, a s tím spojenou minimální frekvenci, na kterou je možné se při výpočtech

spoléhat. Pro úspěšné provedení měření je nutné zajištění dostatečného překryvu stojatých vln, aby byl zachován požadavek na difuzivitu zvukového pole vznesený v sekci 2.1. Výpočet této minimální frekvence v závislosti na objemu a vlastnostech místnosti je proveden pomocí rovnice (2.2). Pro udržení kvality výpočtu i pro nižší oktávová pásma je potom možné simulovat pouze střední a velké prostory. [20]

3.2 Zdroje a přijímače

V ODEONu je možné jako simulovaný zdroj použít všesměrový bodový zdroj, hovořící osobu, reproduktor, silnici s provozem, průmyslový stroj a další. Podle potřeby je software vybaven čtyřmi druhy zdrojů: bodový, čárový, povrchový a pole vícero zdrojů.

- Bodový zdroj je nejčastěji používaný typ, přičemž zvuk je vyzařován sféricky z jednoho bodu. Za použití definice směrovosti a zjednodušení jej lze aplikovat pro velké množství reálných zdrojů. Použití je tedy možné pro hovořící osobu, hudební nástroje nebo samostatně stojící reproduktor.
- Čárový zdroj vyzařuje zvuk po celé délce čáry a využití má jako model dopravní komunikace nebo trubky vedoucí tekutinu.
- Povrchový zdroj vyzařuje zvuk z celé plochy v prostoru. Používá se pro modelování průmyslových strojů a hustý dav lidí.
- Typ zdroje reprezentující pole zdrojů je používán pro simulaci pevné reproduktorové soustavy.

Bodový zdroj se dále rozlišuje na dva typy, obecný a přirozený. Obecný je všesměrový nebo částečně všesměrový, typicky je definován matematicky a užití nalézá při výpočtu frekvenční odezvy a akustických parametrů. Přirozený reprezentuje zvuk jako je lidský hlas nebo hudební nástroj a používá se pro aurealizaci a výpočet akustických parametrů závislých na zvukovém výkonu jako je STI.

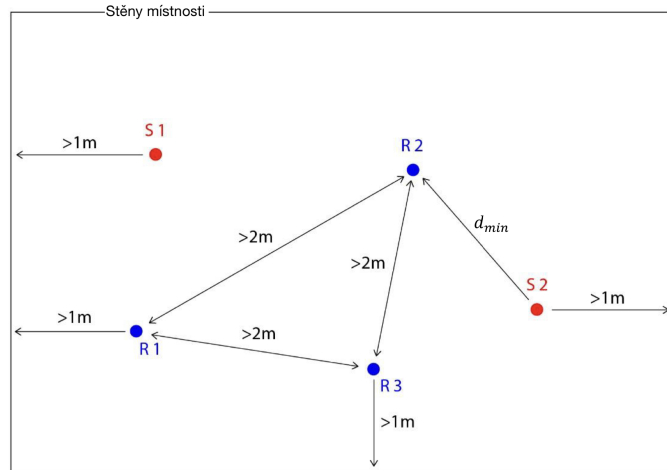
Přijímače jsou modelovány pouze jako body se směrovostí. Ta je důležitá hlavně pro potřeby aurealizace a grafického znázornění rozložení energetických zisků. [20]

Umístnění zdrojů a přijímačů pro simulaci doby dozvuku

Zdroje lze umístit na očekávané místo reálného zdroje jako lidského řečníka nebo reproduktoru. V případě menšího prostoru nebo v momentě, kdy neexistuje místo reálného zdroje vzhledem na použití místnosti by jeden zdroj měl být umístěn v rohu. Minimální vzdálenost mezi přijímači je standardně 2 m. Vzdálenost od jakékoliv odrazové plochy jako je stěna či podlaha by pro obvyklé frekvenční pásmo neměla být menší než 1 m. Minimální rozteč mezi zdrojem a přijímačem by měla odpovídat rovnici

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}}, \quad (3.1)$$

kde V je objem místnosti, T je doba dozvuku a c je rychlost zvuku ve vzduchu. Na obrázku 3.1 jsou graficky znázorněny potřebné odstupy zdrojů a přijímačů.



Obrázek 3.1: Ukázka odstupů červených zdrojů a modrých přijímačů pro inženýrskou přesnost výpočtu. Převzato z [20].

V závislosti na požadované přesnosti je podle [7] potřeba vybrat minimální množství zdrojů a přijímačů uvedené v tabulce 3.1.

	Orientační	Inženýrské	Přesné
Kombinace zdroj-přijímač	≥ 2	≥ 6	≥ 12
Počet zdrojů	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Počet přijímačů	≥ 2	≥ 2	≥ 3

Tabulka 3.1: Počet zdrojů a přijímačů v závislosti na požadované přesnosti měření doby dozvuku. Převzato z [7]

3.3 Materiály v ODEONU

ODEON používá pro popis akustických vlastností povrchu v simulaci takzvané materiály. Ty jsou vedeny v knihovně materiálů pod unikátním číslem a obsahují v sobě specifikaci s popisem a odkazem na dokumentaci, tabulku s koeficientem pohltivosti pro jednotlivá oktávová pásma a vážený koeficient pohltivosti $\alpha(w)$ jakožto širokopásmový parametr.

Z knihovny jsou následně materiály přiřazeny jednotlivým povrchům uvedených v seznamu povrchů. Dále lze povrchu přiřadit rozptylovost dle tabulky 3.2 v závislosti na

nerovnosti povrchu, a v případě předpokladu částečného průchodu zvuku povrchem i transparentnost.

Materiál	Koeficient rozptylovosti pro střední frekvenci (707 Hz)
Oblast publika	0,6-0,7
Hrubé stavební struktury 0,3 - 0,5 m hluboká	0,4-0,5
Kazetový strop	0,3-0,4
Police s knihami	0,3
Zdivo s otevřenými spárami	0,1-0,2
Zdivo, spáry vyplněné, ale neomítnuté	0,05-0,1
Hladké povrchy, obecně	0,02-0,05
Hladký lakovaný beton	0,005-0,02

Tabulka 3.2: Doporučená rozptylovost pro některé základní povrchy. Převzato z [20]

ODEON disponuje sadou tří speciálních materiálů, které nelze měnit. Transparentní materiál používaný k odstranění objektů z výpočtu, úplně pohltivý materiál sloužící k provádění výpočtů venkovních situací, jako například prostor bez střechy a úplně odrazivý materiál, jenž všechnu energii odrazí zpět.

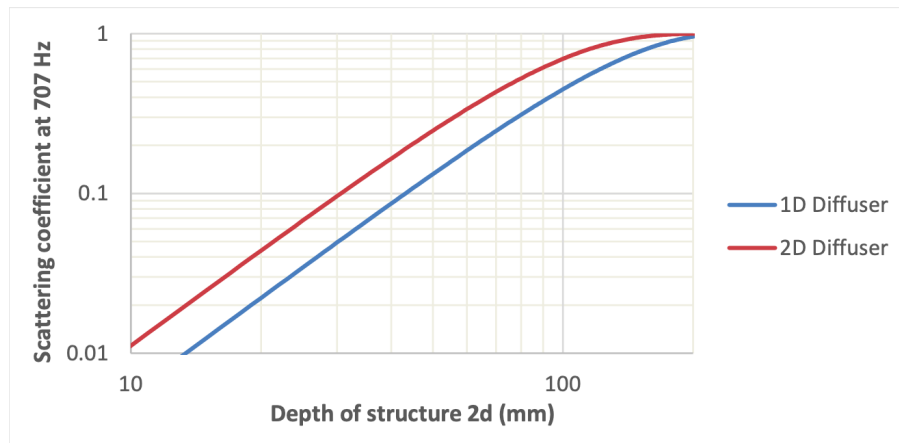
Další materiály lze přidávat vícero způsoby. Je možné je přímo definovat v ODEONu pomocí α , zkombinovat již stávající materiály a tím vytvořit nové, nebo přidat materiál ve formátu xls nebo csv. Též lze použít vestavěnou funkci *Material calculator*, s jejíž pomocí je možné vytvořit nový materiál překryvem vícero vrstev již existujících materiálů. Podrobný popis této metody se nachází v [20].

Koeficient rozptylovosti

Za použití rozptylovosti lze určit způsob odrazu zvukového paprsku při dopadu. Chování lze rozdělit do třech skupin: zrcadlový odraz, plně difuzní odraz a smíšený. První druh odpovídá Snellovu zákonu, kde úhel dopadu je roven úhlu odrazu a tento případ je graficky znázorněn na obrázku 2.1. Přesný opak je odraz difuzní kde úhel paprsku je čistě náhodný a nezáleží na dopadajícím zvuku.

Koeficient rozptylovost nabývá hodnot mezi 0 a 1, kde 0 odpovídá plně difuznímu odrazu a 1 značí zrcadlový odraz. Jeho hodnota je udávaná pouze pro frekvenci 707 Hz, ODEON si jej následně pro ostatní kmitočty dopočítá.

Hodnotu koeficientu je pro klasické povrchy možné odhadnout pomocí tabulky 3.2. Pro difuzory jej lze určit z teoretického modelu za pomoci změřené dvojnásobku hloubky nerovností pyramidového difuzoru D1 a odečtení z grafu 3.2. Pro hloubku $2d = 15$ mm odpovídá přibližně 1%. [20] [23]



Obrázek 3.2: Graf závislosti koeficientu rozptylovosti na hloubce pyramidového difuzoru. Převzato z [20].

3.4 Obsazenost místnosti

Pro místnosti, kde by očekávaná obsazenost mohla měnit vlastnosti prostoru je potřeba do modelu zahrnout publikum. Dle [20] je doporučené povrch publika velmi zjednodušit což vzhledem k metodě simulace nevede na pokles kvality výpočtů. Doporučené je modelovat hustě sedící obecnstvo za pomocí bloku s výškou přibližně 0,8 m. Tomu je následně potřeba připsat odpovídající materiál, jenž závisí na faktorech popsaných v sekci 2.3. Doporučený koeficient rozptylovosti je 0,7 jak je uvedeno v tabulce 3.2. Mikrofon je potom možné umístit 0,4 m nad povrch.

Dalším možným přístupem je použití vznášející se desky, přisouzení odpovídající materiál podlaze a modelace jednotlivých lidí pomocí kvádrů (válců). Tyto přístupy byly zkoumány a podle [21] je nejlepším řešením individuální model každého člena publika. Tento fakt je však podmíněn adekvátní implementací difrakce v softwaru, která musí brát v potaz závislost na frekvenci. V případě ODEONu je tato závislost popsána v sekci 3.5.

3.5 Princip výpočtu

Výpočty softwaru ODEON jsou prováděny pouze v energetické doméně za použití zvukových paprsků. Ty jsou použity na výpočet optimalizovanými metodami zrcadlení zdrojů a ray-tracing. Toto zjednodušení zvuku zaručuje i pro velké prostory krátkou dobu výpočtu a velkou přesnost.

Kromě hlavního výpočtu za pomocí zdrojů a přijímačů ODEON disponuje i dalšími dvěma možnostmi výpočtu útlumu místnosti. Ty slouží jako velmi dobrý první odhad vlastností modelovaného prostoru a jsou nazývány Rychlý odhad (Quick estimate) a Globální odhad (Global estimate). [20]

V podkapitole jsou rozebrány možnosti výpočtu útlumu prostoru, následně jsou

rozebrány základní metody používané pro hlavní výpočet prostřednictvím zdrojů zvuku a přijímačů. Ke konci jsou uvedeny pomocné podprocesy hlavních metod.

Rychlý odhad

Rychlý odhad je výpočet času dozvuku pomocí analytických vzorců Sabina (2.15), Eyringa (2.17) a Arau-Puchadese, které používají pouze absorpčnost místnosti a objem. Výpočet je obohacen o váhy přiřazené za pomoci průzkumu ray-tracingem podle četnosti dopadu paprsků na povrch. Výpočet průměrného činitele pohltivosti $\overline{\alpha'}$ je potom podle vzorce

$$\overline{\alpha'} = \frac{\sum_i H_i \alpha_i}{\sum_i H_i} \quad (3.2)$$

kde H_i je počet dopadů průzkumných paprsků na i -tý povrch místnosti o činiteli pohltivosti α_i . Vypočítané hodnoty doby dozvuku pomocí takto upraveného koeficientu pohltivosti jsou označeny jako *Modified*. Objem V potřebný pro výpočet T_{30} je získán za pomoci střední volné dráhy l ze vzorce

$$V = \frac{lS}{4} \quad (3.3)$$

kde S je celková aktivní plocha. Ray-tracing provedený za účelem výpočtu objemu prostoru předpokládá všechny povrchy v místnosti s koeficientem rozptylovosti rovným 1.

Rychlý odhad je vhodné použít pro nastavení délky impulzní odezvy v Nastavení místnosti jako 2/3 odhadnuté doby dozvuku. [20]

Globální odhad

Globální odhad je nástroj, který používá ray-tracing pro výpočet doby dozvuku T_{20} a T_{30} . Díky tomu je mnohem přesnější než Rychlý odhad a zároveň je schopný odhadnout i globální poklesovou křivku.

Výpočet je proveden vysláním částic od zadaného zdroje do náhodných směrů. Ty jsou následně odráženy na základě Vektorové metody rozptylu popsané v sekci 3.5 a jejich ztráta energie je pro každou částici zaznamenána jako funkce času ovlivněná pohltivostí povrchu a vzduchu. Poklesová křivka je dosažena sečtením energií přes velké množství částic a upravením energie na základě zkrácení křivky. Tento princip výpočtu byl navržen a je podrobně popsán v [26].

Výpočet bodové odezvy

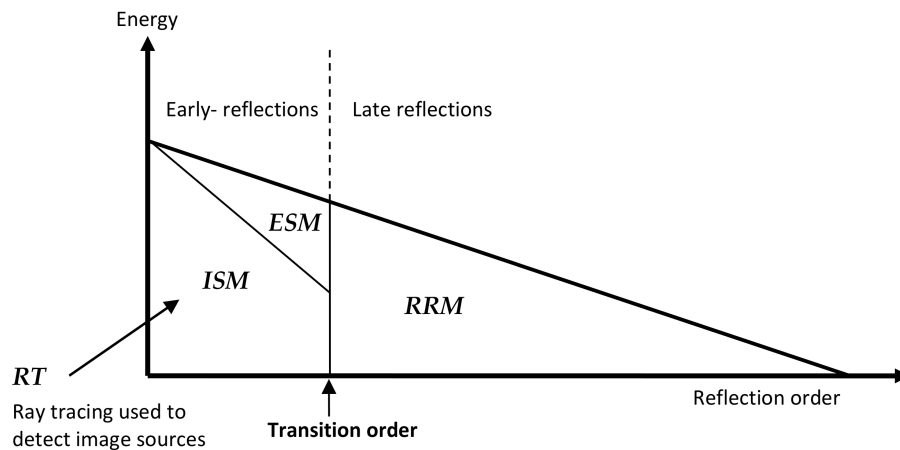
Bodová odezva je hlavní metoda OEDONu založená na použití zdrojů a přijímačů rozmístěných v místnosti dle sekce 3.2. Výsledkem je Jednobodová odezva používa-

jící všechny aktivní zdroje a jeden specifikovaný přijímač, Vícebodová odezva, která používá všechny aktivní zdroje a všechny přijímače a Mřížková odezva. Ta využívá definovanou mřížku, ve které každé pole představuje přijímač zaznamenávající paprsky vysílané všemi aktivními zdroji.

Tato simulace si klade za cíl replikovat reálné měření impulzní odezvy, ač je výpočet prováděn v energetické doméně a reálné měření je prováděno v doméně tlakové. Z tohoto důvodu impulzní odezva ODEONu odpovídá druhé mocnině měřitelné impulzní odezvě a je na rozdíl od reálného měření pouze kladná.

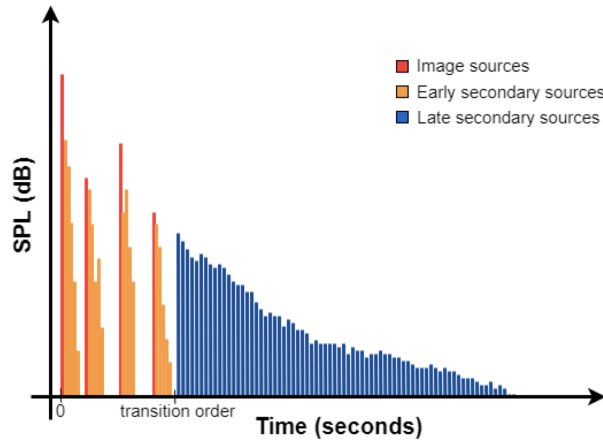
Samotný výpočet je prováděn pomocí kombinace vícero různých metod: Image Source Method (ISM), Early-Scattering Method (ESM), Ray-Tracing (RT) a Ray-Radiosity Method (RRM). Z toho se první tři používají pro brzké odrazy a poslední na pozdní odrazy. Pro bodový zdroj jsou aplikovány metody všechny, na částice vyzářené z čárového a povrchového zdroje je potom pohlíženo pouze jako na pozdní odrazy.

Pro určení přechodu mezi brzkými a pozdními odrazy je použit řád vycházející z počtu odrazů od stěn. Standardně je toto číslo nastaveno na 2, nicméně v případě potřeby je možnost hodnotu změnit. Užití jednotlivých metod lze přehledně zhlédnout na obrázku 3.3. [20]



Obrázek 3.3: Graf užití metod výpočtu. Převzato z [20].

Souhrně lze hustotu přidávání odrazů do impulzní odezvy znázornit pomocí obrázku 3.4. Zde je možné pozorovat, že paprsky z brzkých druhotných zdrojů posilují paprsky ze zrcadlových zdrojů a po dovršení přechodového řádu dojde k přechodu na odrazy zprostředkované pomocí pozdních druhotných zdrojů. V reálu se však jednotlivé metody překrývají a dochází tak k vytvoření dozvuku bez nečekaných skoků. [20]

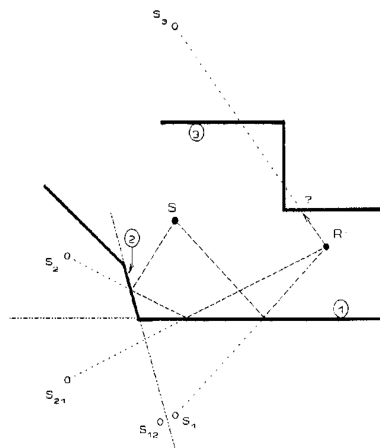


Obrázek 3.4: Znázornění příspěvků reflektogramu v čase. Převzato z [20].

Image Source Method (ISM)

Tato metoda využívá k získání odraženého paprsku zrcadlení zdroje za stěnu. Po provedení zrcadlení nastává kontrola viditelnosti, kde se testuje, zda je zrcadlený zdroj viditelný přijímačem. Pokud ano, je přidán do kombinačního stromu. Tento přístup vede v případě složitějších místností na velké množství zrcadlových zdrojů, ze kterých je však nemalá část nakonec při testu viditelnosti odstraněna.

V ODEONu je z optimalizačních důvodů metoda implementována v upravené verzi. Počet brzkých paprsků stanovený ODEONem je vyslán ze zdroje a pomocí zrcadlových odrazů je dosažen řád přechodu. Pro každou plochu, která je použita k odrazu je do kombinačního stromu přidán zdroj. Následná kontrola viditelnosti je provedena pomocí sledování cesty zpět ke zdroji, pokud cesta je bez překážek a odraz je proveden pomocí správné stěny, zdroj je přidán do impulzní odezvy.



Obrázek 3.5: Ukázka kontroly zdrojů. Převzato z [20]

Na obrázku 3.5 je znázorněn zdroj S , přijímač R , zrcadlové zdroje prvního odrazu

S_1 , S_2 , S_3 a druhého S_{12} , S_{21} . Je zde možné pozorovat zdroj S_2 , kterého spojnice s přijímačem R neprochází odpovídající stěnou 2, a tedy stejně jako zdroje S_3 a S_{12} není validní. Naopak zdroje S_2 a S_{12} jsou v pořádku a do impulzní odezvy se počítají. [20]

Early Scattering Method (ESM)

Pro každý validní zrcadlový zdroj je vygenerován rozsah brzkých druhotných zdrojů na odpovídající ploše. Z těchto zdrojů jsou následně vyslány brzké rozptylové paprsky v závislosti na parametru Počet brzkých rozptylových paprsků, které jsou sledovány až do přechodového řádu odrazů. Každý z viditelných brzkých zrcadlových zdrojů je přidán do impulzní odezvy.

Útlum je vypočítán pomocí několika faktorů: směrovosti původního zdroje, koeficientu pohltivosti daného povrchu, pohltivosti vzduchu a rozptylovosti materiálu. [20]

Ray-radiosity method (RRM)

Ray-radiosity je metoda upraveného ray-tracingu, která výpočet dělí na dvě části: vykreslování a shromažďování.

Vykreslování je část výpočtu nezávislá na přijímačích, kde dochází ke generování specifikovanému počtu pozdních paprsků ze zdroje. Ty se následně podle metody vektorového rozptylu odráží, dokud řád nedosáhne maxima specifikovaného v Nastavení místnosti. Zároveň v okamžiku překročení přechodného řádu od brzkých k pozdním paprskům se při odrazu vygeneruje vždy jeden pozdní druhotný zdroj. Takto se vytvoří mapa pozdních druhotných zdrojů po celé místnosti, přičemž jejich směrovost může být dána Lambertovým kosinovým zákonem, Šikmým Lambertem popsaném v sekci 3.5, nebo mohou mít jednotný směr v závislosti na nastavení výpočtu.

Shromažďování je druhá polovina Ray-radiosity metody závislá na poloze přijímače. Sestává z rozhodování, zda každý jeden druhotný zdroj je z daného přijímače viditelný. Pokud ano, přidá jej do impulzní odezvy. Pro případ více přijímačů je jednoduše shromažďování použito opakovaně pro každý přijímač zvlášť. V případě zahrnutí více zdrojů je výsledná odezva na přijímači superpozicí zdrojů, které jsou vhodně zpožděny.

Závislost absorpce na úhlu dopadu

Závislost absorpce zvuku materiálem na úhlu dopadu je v ODEONu řešená za pomoci rozdělení materiálů do dvou skupin podle průměrného koeficientu pohltivosti. Pro průměr 0 je materiál označen jako tvrdý, pro 1 je materiál měkký a střed je nastaven pro 0,3. Přechody jsou zajištěny jako lineární interpolace v závislosti na

umístění na škále. Pohltivost je zároveň závislá na frekvenci a je odlišná pro 1 kHz, 2 kHz a 4 kHz oktávová pásma. Obecně platí:

- Pro tvrdé materiály pohltivost se zvětšujícím se úhlem dopadu roste a zároveň úhel nejvíce postihuje vyšší frekvence.
- Pro měkké materiály pohltivost se zvětšujícím se úhlem dopadu klesá a zároveň úhel nejvíce postihuje vyšší frekvence.
- Pro materiály přesně na hranici je aplikován náhodný dopadový koeficient pohltivosti dle seznamu materiálů a bude platný pro všechny úhly dopadu.

Podrobné grafy přechodů mezi úhly lze nalézt v [20].

Rozptylovost

V ODEONu je výpočet rozdělen na brzkou a pozdní část a v každé se rozptyl řeší jiným způsobem. Zároveň je závislý jak na rozměrech povrchu, tak i na frekvenci.

Pro brzké paprsky platí, že při dopadu se na povrchu vytvoří jak zrcadlový zdroj, tak i další brzké druhotné zdroje, jenž zajišťují rozptylovost. Směrnost brzkých druhotných zdrojů nultého řádu odrazu se řídí pomocí Lambertova kosinova zákonu uvedeného v sekci 2.1. Pro vyšší řád až do přechodného se směr brzkých druhotných zdrojů řídí pomocí Šikmého Lambertova podrobně popsáno v sekci 3.5. Zároveň je v závislosti na rozptylovosti udělené povrchu roz distribuovaná energie, pro případ 100% budou aktivní pouze brzké druhotné zdroje, pro 0% bude aktivní pouze zrcadlový zdroj.

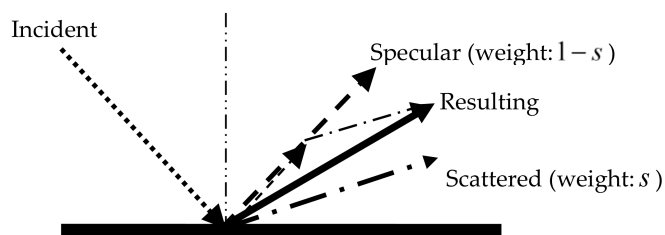
V případě pozdních paprsků je zajištěna směrnost pomocí vektorové metody rozptylu. [20]

Vektorová metoda rozptylu

Vektorová metoda rozptylu je nástroj implementace rozptylu o velikosti s pro pozdní paprsky. Směr odraženého paprsku je vypočítán pomocí sečtení zrcadlového odrazu s váhou $(1-s)$ a rozptýleného vektoru o velikosti dle Lambertovy distribuce ideálního rozptylu ($\sin 2\Phi$) převáženého pomocí s . Pro případ $s = 0$ je potom odraz pouze zrcadlový, pro $s = 1$ je odraz čistě náhodný. Grafické znázornění součtu paprsků je znázorněno na obrázku 3.6. [20] [24]

Koeficient rozptylu založený na odrazu

Po zapnutí možnosti v Nastavení místnosti, ODEON bude provádět výpočet rozptylu při odrazu způsobeném velikostí povrchu, úhlem dopadu, délkou dopadového paprsku a difrakcí na hraně. Koeficient rozptylu zadaný uživatelem potom odpovídá pouze nerovnostem povrchu.



Obrázek 3.6: Ukázka odrazu pro koeficient rozptylovosti 50%. Převzato z [20].

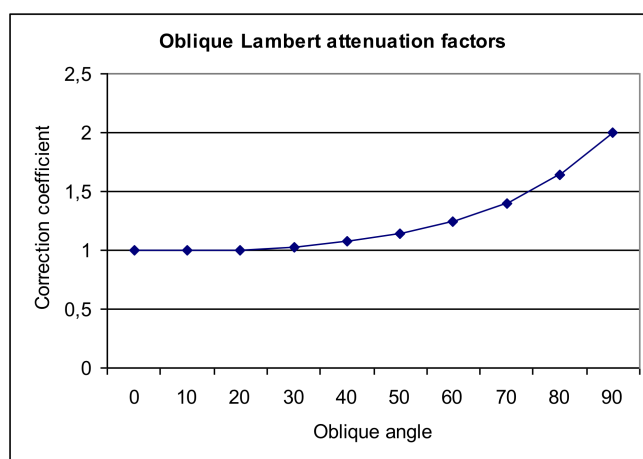
Výpočet výsledného koeficientu rozptylu založeného na odrazu s_r je proveden vzorcem

$$s_r = 1 - (1 - s_d) \cdot (1 - s_s) \quad (3.4)$$

kde s_s je koeficient rozptylovosti způsobený nerovností povrchu a s_d je koeficient rozptylovosti zapříčiněný difrakcí při dopadu paprsku. [20]

Šikmý Lambert

Metoda používá princip Vektorové metody rozptylu, kde pro $s = 0$ je odraz vypočítán pomocí zákonů odrazu, pro $s = 1$ je směr odrazu zcela náhodný a pro koeficient mezi krajními hodnotami je směr dán metodou vektorového rozptylu. Následně je provedena kompenzace ztracené energie způsobené náklonem směrového balónu při odrazu. Kompenzační koeficient je vyobrazen na 3.7. [20]



Obrázek 3.7: Graf koeficientu pro kompenzaci energie. Převzato z [20].

3.6 Ověření kvality měření

Jedním z dobrých ukazatelů správnosti provedeného měření je poklesová křivka popsána v sekci 2.4.1. V optimálním případě by její hladkost měla odpovídat obrázku 2.6. V případě, kdy toto není dodrženo, chybou je nízký počet pozdních paprsků a řešením je navýšení jejich počtu v Nastavení místnosti. Pro bližší pohled je možné si v ODEONu zobrazit graf hustoty odrazů, který by se pro spolehlivý výsledek výpočtu neměl dostat pod 25 odrazů/ms. Okem viditelná chyba je též výskyt skoků. Ty jsou často způsobeny nedodržením předepsaných minimálních vzdálenosti zdrojů a přijímačů použitých pro výpočet.

Dalším ukazatelem kvality výpočtu je parametr C (Curvature) indikující rovnost křivky poklesu. Jeho výpočet je proveden podle rovnice

$$C = 100 \left(\frac{T_{30}}{T_{20}} - 1 \right) \quad (3.5)$$

V ideálním případě by křivka měla být co nejrovnější, což by parametr indikoval jako 0. Ve většině případů však první část poklesové křivky je strmější a parametr zakřivení nabývá kladných hodnot. Zatím co hodnoty do 10% jsou plně přijatelné, čísla nad 15% již jsou problémem a je potřeba je řešit prostřednictvím několikanásobného navýšení pozdních paprsků. Parametr je, stejně jako i křivka poklesu, udáván pro každé oktávové pásmo zvlášť. [20]

V okamžiku měření akusticky vázaných prostor se však nerovnost poklesové křivky předpokládá a parametr tak nepovede v ideálním případě na 0.

3.7 Vizualizace a auralizace

Velmi užitečnou funkcí ODEONu je schopnost vizualizace akustických parametrů pro celou místnost nebo pouze část prostoru. Pomocí přehledného zobrazení změn v prostoru lze tak odhalit místa akustických defektů.

Vizualizace je docílena definováním mřížky na zvolených površích. Jednotlivá mřížková pole obsahují ve středech přijímače, jenž reprezentují celé pole. Ke zlepšení rozlišení lze následně dojít pouhým zjemněním definované mřížky, čímž se však také zvýší čas výpočtu.

Výsledná mapa je reprezentována pomocí tří parametrů: rozsah, barva, označení a všechny lze v případě nevyhovujícího standardního nastavení upravit.

Druhou možností jak simulaci přiblížit lidským smyslům je použitím auralizace. Je to simulace prožitků akustických jevů a je docílena za pomoci kombinace zvukového souboru neobsahujícího žádné zkreslení prostorem a akustikou místnosti.

ODEON využívá reprezentaci akustiky místnosti vytvořenou specifickým přijímačem a zdrojem/zdroji, takže je auralizace citlivá jak na místo tak i směr použitého přijímače. [20]

4 Simulace konkrétního prostoru

Pro účely simulace byla vybrána učebna spojená s laboratoří nacházející se v budově ČVUT Fakulty elektrotechnické na adrese Technická 2, 166 27 Praha v bloku H1 pod označením T2:H1-129. Jedná se o prostor aktivně využívaný k výuce a pro provádění akustických měření.

4.1 Popis prostoru

Místnost na výšku zabírá dvě patra, strop je tvořen šikmou střechou s prosklenými okny, stěny v přízemí jsou z omítnutého betonu a ve druhém patře je stěna mezi laboratoří a chodbou tvořena skleněnými tabulemi. Prostor má přibližně tvar kvádrů, do kterého je vložena bezodrazová komora přiřazená ke stěně. Zároveň je místnost členěná výškově na spodní patro, jenž má kvůli bezodrazové místnosti tvar do L, dále označovaném jako laboratoř a učebnu nacházející se na výškové úrovni prvního patra.

Přibližně je zkoumaný prostor rozložený přibližně na 218 m^2 , z toho však laboratoř zaujímá pouze 116 m^2 a učebna umístěna nad laboratoří 39 m^2 . Celkový objem zkoumaného prostoru při odečtení objemu bezodrazové komory činí přibližně 1060 m^3 .

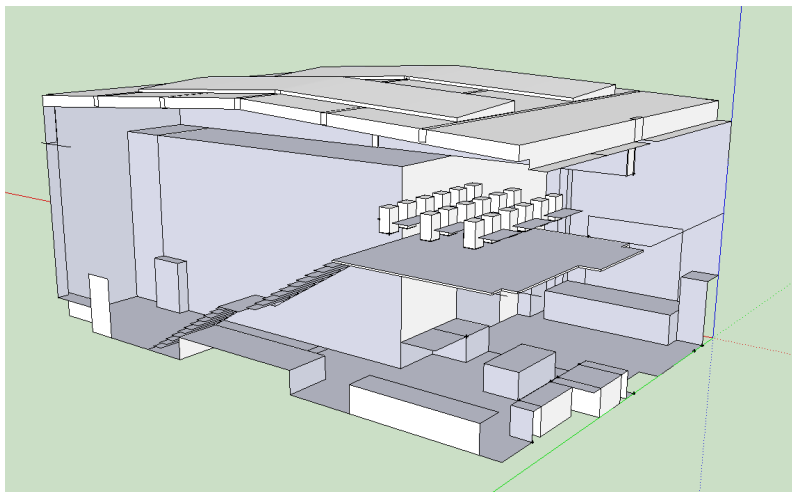
V současné době není na učebnu ani na laboratoř aplikován žádný speciální akustický materiál, nebo jiné opatření sloužící ke zlepšení akustických vlastností. V prostoru učebny není v případě výuky či při běžném hovoru problém s porozuměním, je však znatelný dozvuk přicházející z velkého objemu náležícího k laboratoři. Ta v případě mluveného projevu trpí dozvukem způsobeným velkými rozměry prostor i když i zde nedochází k velkým problémům při porozumění mluvenému slovu na kratší vzdálenosti.

4.2 Simulace akustických vlastností stávající místnosti

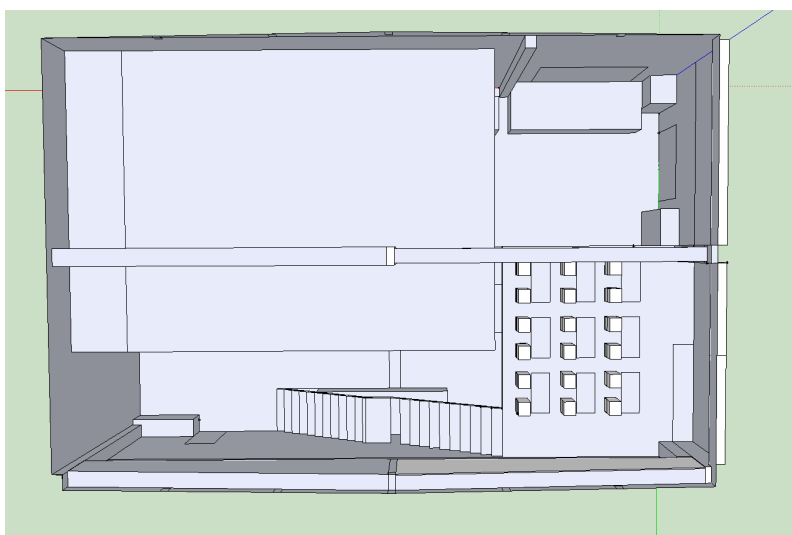
Počítačový model byl vytvořen na základě rozměrů změřených laserovým dálkoměrem Bosch DLE 73 Professional. Do modelu bylo kromě stávající geometrie zahrnuto i maximální možné obsazení učebny studenty dále označováno též jako obsazenost celého simulovaného prostoru.

Modelování prostoru

Prostory byly nejprve vymodelovány v softwaru SketchUp, jenž je doporučen manuálem ODEONu. Použity byly pouze planární plochy jak je popsáno v sekci 3.1. Obsazenost třídy byla dosažena přidáním jednotlivých studentů v podobě kvádrů na židle dle sekce 3.4. Export byl následně proveden pomocí pluginu SU2Odeon oficiálně distribuovaného ODEONem. Ukázka výsledného modelu je na obrázcích 4.1 a 4.2.



Obrázek 4.1: Ukázka modelu v softwaru SketchUp.



Obrázek 4.2: Ukázka modelu v softwaru SketchUp, pohled shora.

Po importu do ODEONu byl model otestován na těsnost, při kterém byla všem povrchům přisouzena odrazivost 100% odrazivost, zadefinováním testovacího zdroje a spuštění 3D Investigate rays.

Použité materiály

Po úspěšném importu a otestování těsnosti modelu bylo možné přiřadit plochám odpovídající materiály z knihovny materiálů. Zde byly použity materiály ze standardní knihovny ODEONu nebo bylo čerpáno ze zdrojů: [1], [19], [2], [30], [3], [31], [5], [4]. Při vybírání hodnot pohltivosti probíhala vždy kontrola s ostatními uvedenými zdroji.

Největší plochy prostoru jsou: omítnuté stěny s materiálem číslo 4000, betonová podlaha, překlady a nosníky materiálu 100, beton pokrytý kobercem z materiálu 7202, schody z materiálu 5002, strop z materiálu 104 s okny z materiálu 10006 a stěna ze skleněných tabulí z materiálu 100016.

Jako vybavení místnosti byly vymodelovány dveře o materiálu 10007, školní židle a stoly o materiálu 11101, plechový ventilační tubus o materiálu 5001, skříň o materiálu 3120 a odložené vybavení laboratoře, stejně tak jako pokryté stoly laboratoře pracovními předměty o materiálu 3121.

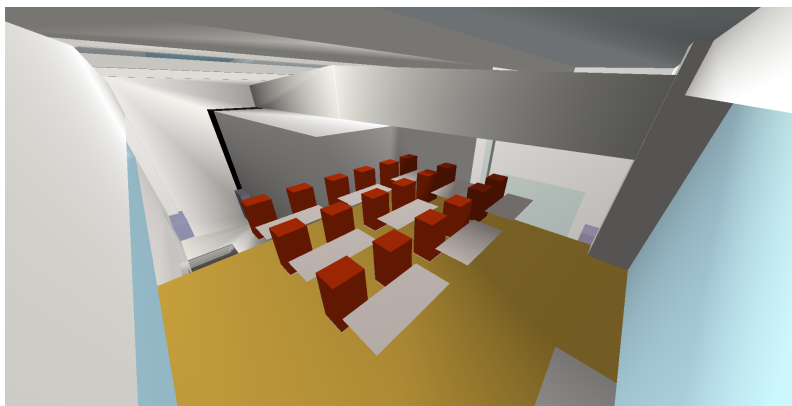
Výpočet je ulehčen použitím speciálního materiálu 1 na zakrytí prostoru za bezodrazovou komorou, který se vlastnostem tohoto materiálu velmi blíží. Další speciální materiál 0 je použit na odstranění jednotlivých studentů z výpočtu.

Na studenty sedící v lavicích byl použit materiál 11060, jehož vlastnosti byly zadány jako ekvivalentní pohltivá plocha a činitel pohltivosti byl dopočítán za použití plochy sedícího studenta $S \approx 1.01 \text{ m}^2$ ze vzorce 2.7. Tyto hodnoty jsou v tabulce 4.1 spolu s dalšími použitými materiály. Rozložení materiálů ve 3D modelu s barvou jako indikátorem pohltivosti je vidět na obrázcích 4.3 a 4.4.

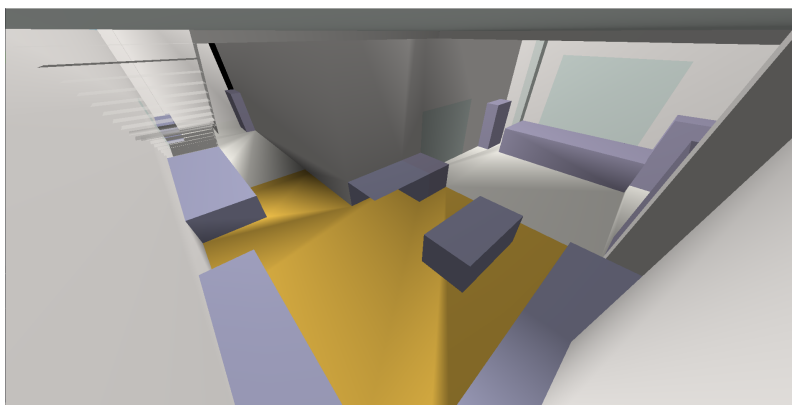
Identifikační číslo	Popis materiálu	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
7202	Koberec na pevné podlaze výška 7-10 mm	0,04	0,07	0,14	0,30	0,51	0,78
104	Betonový blok, s omítkou nebo bez ní, natřený	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
10006	Sklo, obyčejné okenní sklo	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
100	Hrubý beton	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
4000	Omítka vápenocementová	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
10007	Masivní dřevěné dveře	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
5002	Tvrdé povrchy průměrné	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
11101	Individuální dřevěná židle	0,07	0,07	0,10	0,14	0,14	0,14
5001	Ocelové palubky	0,13	0,09	0,08	0,09	0,11	0,11
3121	Hromada náradí	0,30	0,39	0,37	0,27	0,26	0,17
100016	4 mm skla	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02
3120	police na knihy v knihovnách (na m^2 plochy)	0,30	0,39	0,39	0,31	0,29	0,21
11060	Jedna osoba ve skupině, sedící, 1 na 6 m^2	0,12	0,44	0,79	0,89	0,94	0,99

Tabulka 4.1: Materiály použité v simulaci.

Spolu s typem materiálu bylo zapotřebí všem plochám přiřadit odpovídající koeficient rozptylovosti na základě tabulky 3.2, a v případě potřeby i transparentnost. Ta



Obrázek 4.3: Ukázka modelu učebny v softwaru ODEON, po přiřazení materiálů.



Obrázek 4.4: Ukázka modelu laboratoře v softwaru ODEON po přiřazení materiálů.

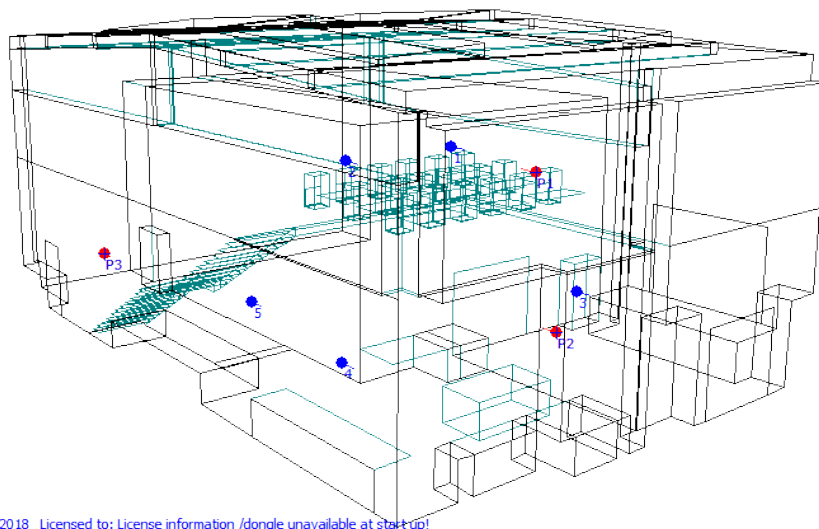
se uplatnila hlavně v případě schodů jejichž povrch je tvořen železnou mříží.

Po přiřazení všem plochám odpovídající vlastnosti bylo možné použít Rychlý odhad na výpočet odhadované doby dozvuku ze vzorců Sabina a Eyringa. Zde bylo možné nalézt odhadovaný objem prostoru. Pro plně obsazenou místnost je doba dozvuku podle Sabina pro frekvenční pásmo 1000 Hz $T_S = 1,15$ s a odhadnutý objem je přibližně 1000 m^3 . Tyto údaje lze následně využít při výpočtu prováděném pro potřeby rozmístování zdrojů a přijímačů.

Zdroje a přijímače

Po přidělení všech vlastností povrchům bylo potřeba určit počet, polohu zdrojů a přijímačů. Na základě minimálních požadavků normy [7], jež jsou uvedené v tabulce 3.1, byly v prostoru umístěny 3 zdroje a 5 přijímačů. Jejich rozmístění bylo dáno předpokládaným použitím místnosti a pravidly dostatečných rozestupů uvedených přehledně na obrázku 3.1. Minimální rozteč d_{\min} lze vypočítat za pomoci vzorce (3.1) dosazením hodnot získaných v minulé sekci: $V = 1000 \text{ m}^3$, $T_S = 1,15$ s, $c = 343 \text{ m/s}$. d_{\min} potřebné dodržet je v tomto případě 3,18 m.

Rozložení zdrojů (Z1 - Z3) bylo vybráno s ohledem na geometrii prostoru, aby došlo k pokrytí zvukovým polem celého prostoru a zároveň se umístění a směr podobal reálnému využití prostoru. Vzhledem k předpokladu, že všechny zdroje při použití prostoru budou řečníci, byla použita směrovost BB93_Normal_Natural odpovídající řečníku s normálním úsilí řeči s hladinou akustického tlaku řeči $L_{W,A} = 68,4$ dB. Mikrofony (M1 - M5) byly umístěny na místa potenciálních posluchačů po celé místnosti. Jejich rozložení je vidět na obrázku 4.5 zobrazujícím rozmístování zdrojů a přijímačů, bližší pohled je možné zhlédnout na obrázcích A.2 a A.3 vygenerovaných pomocí funkce OpenGL.



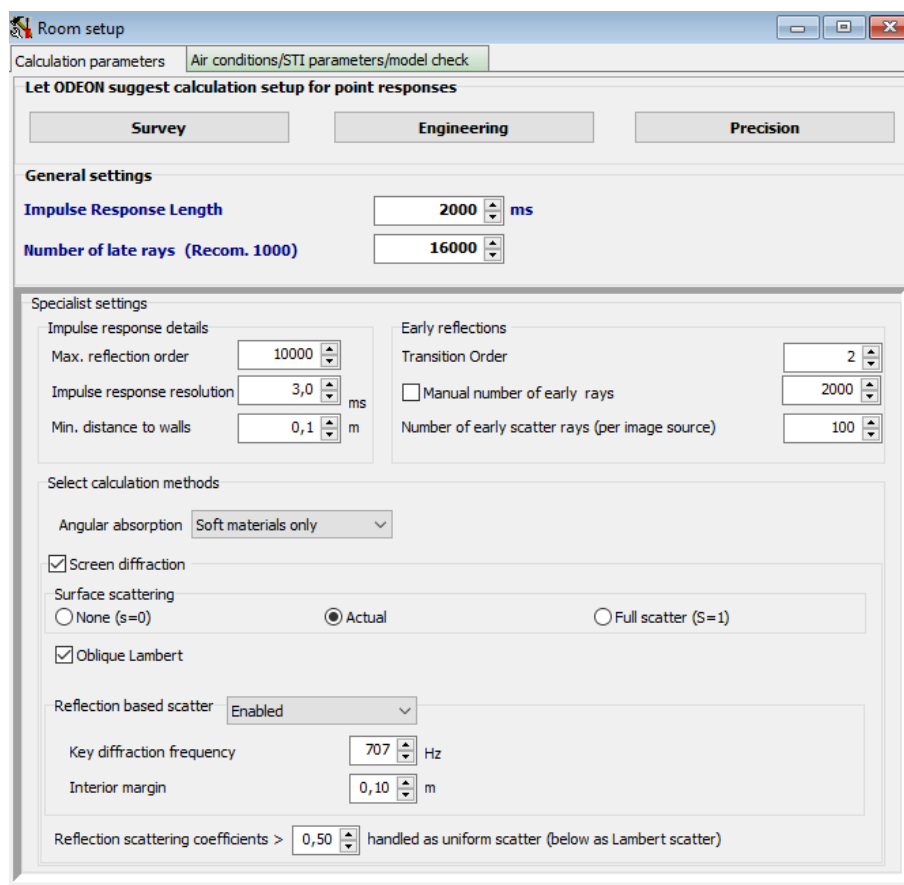
Obrázek 4.5: Ukázka rozmístování zdrojů Z a mikrofonů M v programu ODEON.

Nastavení parametrů simulace

Před spuštěním simulace bylo potřeba upravit nastavení místnosti. Zde došlo k nastavení délky impulzní odezvy na 2000 ms jakožto dostatečné délky pro provedení všech výpočtů. Počet pozdních paprsků byl nastaven na 1600 a pomocí Globálního odhadu došlo k ověření, zda je číslo dostačující. Všechny ostatní parametry byly ponechány v přednastaveném profilu Přesné. Souhrn použitých hodnot je uveden na obrázku 4.6.

Vyhodnocení modelu reálné místnosti

Simulace byla provedena pro vícero kombinací zdrojů a přijímačů odpovídající celkovým vlastnostem místnosti, případu přednášejícího učitele v učebně a hovořícího člověka v laboratoři. Jejich správnost byla zkontrolována dle sekce 3.6, a v případě nesrovnalostí došlo k vysvětlení. Vypočítané výsledky jsou přehledně zpracované do grafů a tabulek.



Obrázek 4.6: Použité nastavení místnosti.

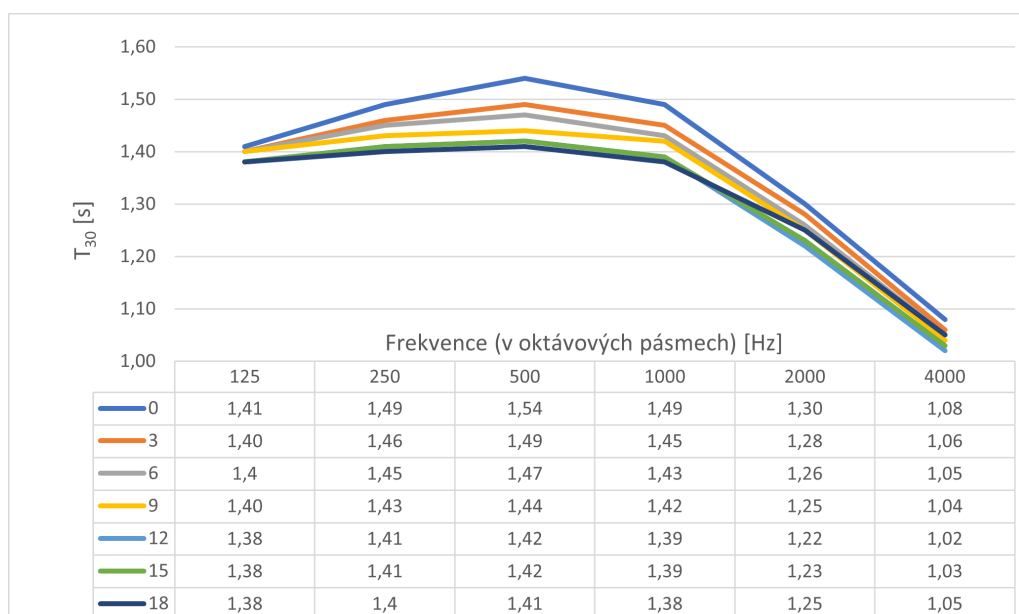
Použité zdroje a přijímače v závislosti na simulovaném použití:

- Celá místnost: zdroje Z1 - Z3; přijímače M1 - M5
- Učebna: zdroj Z1; přijímač M1
- Laboratoř: zdroj Z2; přijímač M4.

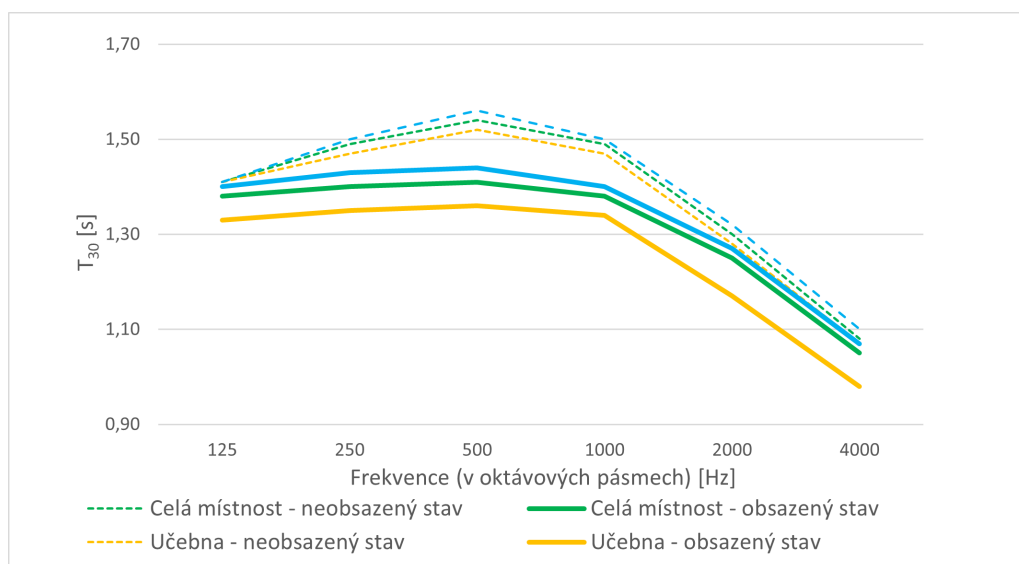
Simulované použití	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	4000
Celá místnost - neobsazený stav	1,41	1,49	1,54	1,49	1,30	1,08
Celá místnost - obsazený stav	1,38	1,40	1,41	1,38	1,25	1,05
Učebna - neobsazený stav	1,41	1,47	1,52	1,47	1,28	1,07
Učebna - obsazený stav	1,33	1,35	1,36	1,34	1,17	0,98
Laboratoř - neobsazený stav	1,41	1,5	1,56	1,50	1,32	1,1
Laboratoř - obsazený stav	1,40	1,43	1,44	1,40	1,27	1,07

Tabulka 4.2: Závislost T_{30} na simulovaném použití.

Z grafu 4.7 je možné pozorovat předpokládaný trend klesající doby dozvuku při zvyšování obsazenosti učebny. Největší skok je při změně stavu z neobsazené místnosti na obsazenost 17 %. Nejvýraznější změna se odehrává pro oktávy 500 Hz a 1000 Hz.



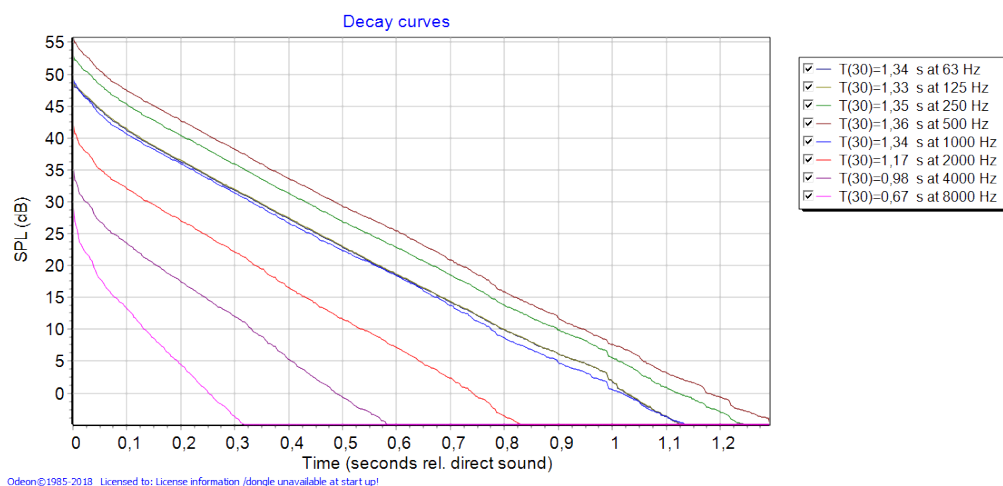
Obrázek 4.7: Závislost T_{30} na obsazenosti pro simulování celé místnosti.



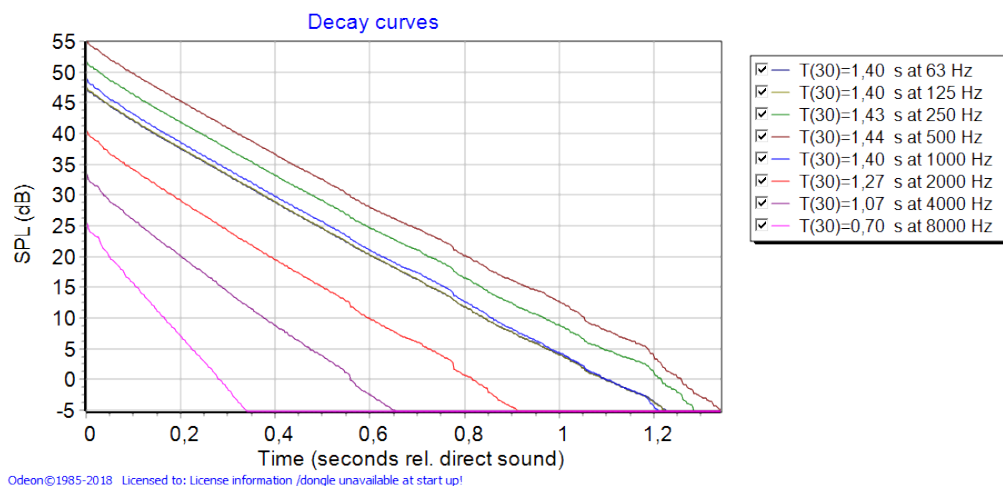
Obrázek 4.8: Závislost T_{30} na simulovaném použití. Grafické zpracování tabulky 4.2.

Na grafu 4.8 je možné pozorovat změnu doby dozvuku T_{30} v závislosti na simulovaném užití prostor. Z grafu vyplývá, že ač se s použitím místnosti doba dozvuku mění, mnohem výrazněji na ni působí obsazenost. Nejnižší nasimulovaná T_{30} odpovídá učebně, pro laboratoř a celková místnost potom nabývá podobných hodnot.

Při kontrole poklesové křivky z obrázku 4.9 je viditelný zlom způsobený akustickou provázaností prostorů. Ten je patrný hlavně při porovnání s poklesovou křivkou laboratoře. Doba dozvuku učebny je však pouze nepatrně nižší vůči celkové době dozvuku. Důvodem je při výpočtu odstranění počátečního poklesu o 5 dB, ve kterém tento zlom leží.



Obrázek 4.9: Poklesová křivka plně obsazené učebny.

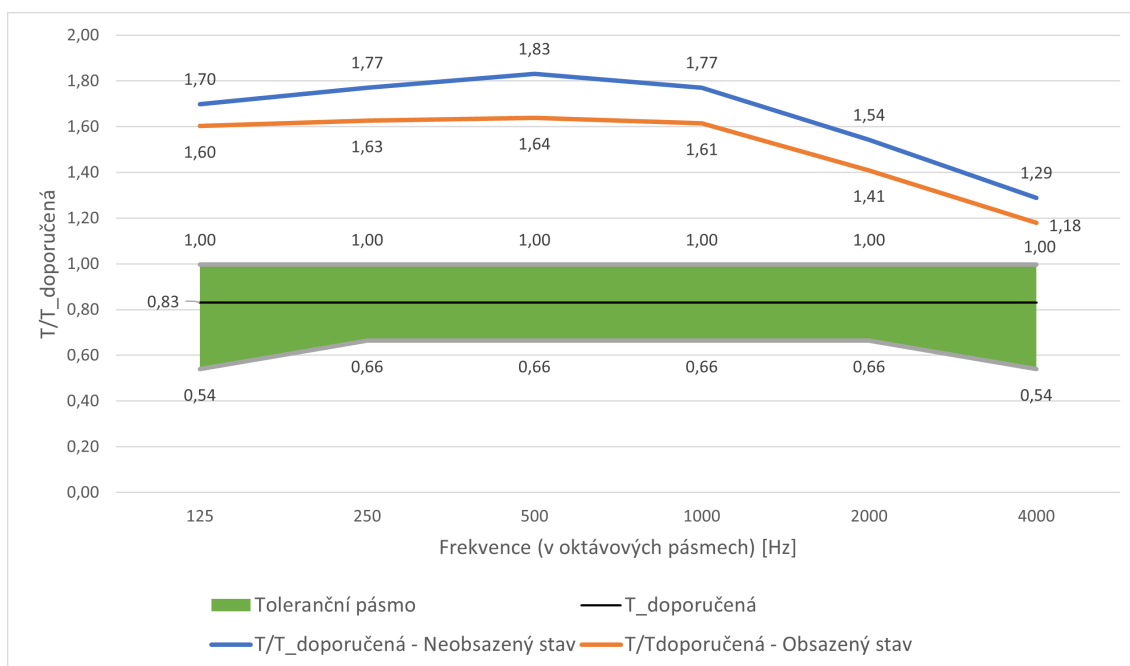


Obrázek 4.10: Poklesová křivka laboratoře pro plné obsazení.

V tabulce 4.3 a na grafu 4.11 je vyobrazeno vyhodnocení stavu podle normy ČSN 73 0525 pro prostor určený k řeči, která předpokládá plně obsazený prostor. Doporučená hodnota byla odečtena z grafu 2.7 pro objem $V = 1060 \text{ m}^3$. Toleranční pásmo bylo určeno z tabulky 2.6. K vyhodnocení byly použity hodnoty doby dozvuku uvedeny v tabulce 4.2 jako Učebna.

Vyhodnocení učebny dle ČSN 73 0525	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	4000
T ₃₀ - neobsazený stav	1,41	1,47	1,52	1,47	1,28	1,07
T ₃₀ - obsazený stav obsazenost	1,33	1,35	1,36	1,34	1,17	0,98
T_doporučená_min	0,54	0,66	0,66	0,66	0,66	0,54
T_doporučená_max	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
T_doporučená	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
T/T_doporučená - Neobsazený stav	1,70	1,77	1,83	1,77	1,54	1,29
T/T_doporučená - Obsazený stav	1,60	1,63	1,64	1,61	1,41	1,18

Tabulka 4.3: Vyhodnocení doby dozvuku T₃₀ učebny podle normy ČSN 73 0525.



Obrázek 4.11: Vyhodnocení doby dozvuku T₃₀ učebny podle normy ČSN 73 0525.

Další sledované parametry jsou uvedeny v tabulkách pro neobsazený prostor 4.4 a pro plnou obsazenost 4.5. Z těch je patrná důležitost parametrů, které ukazují i na vzdory velké době dozvuku přijatelné hodnoty. Též je mnohem více pozorovatelný rozdíl mezi laboratoří a učebnou, kde například počáteční doba dozvuku (EDT), beroucí v potaz i počáteční pokles 5 dB, se liší pro učebnu a laboratoř mnohem více než T₃₀. S přidáním publika do učebny se rozdíly mezi horním a dolním patrem ještě zvětšují.

Prostor	Akustický parametr	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
Učebna	EDT	0,99	1,1	1,15	1,05	0,87	0,64
Laboratoř	EDT	1,26	1,32	1,36	1,28	1,12	0,92
Učebna	C_{50}	2	1,7	1,6	2,3	4,4	6,2
Laboratoř	C_{50}	-0,2	0	-0,2	0,4	1,1	2,5
Učebna	T_s	63	67	70	63	45	32
Laboratoř	T_s	85	86	88	82	72	57
Učebna	LF_{80}	0.219	0.221	0.239	0.254	0.201	0.179
Laboratoř	LF_{80}	0.395	0.388	0.388	0.402	0.388	0.389
Učebna	SPL	49	54,1	57,6	50,9	43,4	36,5
Laboratoř	SPL	47,4	51,7	55,1	48,9	40,4	33,5
Učebna	STI	0,66					
Laboratoř	STI	0,59					

Tabulka 4.4: Doplnující parametry pro neobsazený prostor pro simulaci učebny a laboratoře.

Prostor	Akustický parametr	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
Učebna	EDT	0,92	0,91	0,86	0,80	0,65	0,46
Laboratoř	EDT	1,25	1,26	1,26	1,20	1,08	0,90
Učebna	C_{50}	2,20	3,00	3,80	4,30	6,40	8,30
Laboratoř	C_{50}	-0,30	0,00	0,00	0,50	1,20	2,60
Učebna	T_s	60	54	49	47	33	23
Laboratoř	T_s	84	83	83	77	69	55
Učebna	LF_{80}	0.232	0.219	0.232	0.248	0.187	0.165
Laboratoř	LF_{80}	0.392	0.386	0.386	0.399	0.385	0.387
Učebna	SPL	48,80	53,00	55,80	49,30	42,40	35,70
Laboratoř	SPL	47,40	51,60	55,00	48,80	40,30	33,40
Učebna	STI	0,71					
Laboratoř	STI	0,60					

Tabulka 4.5: Doplnující parametry pro obsazený prostor pro simulaci učebny a laboratoře.

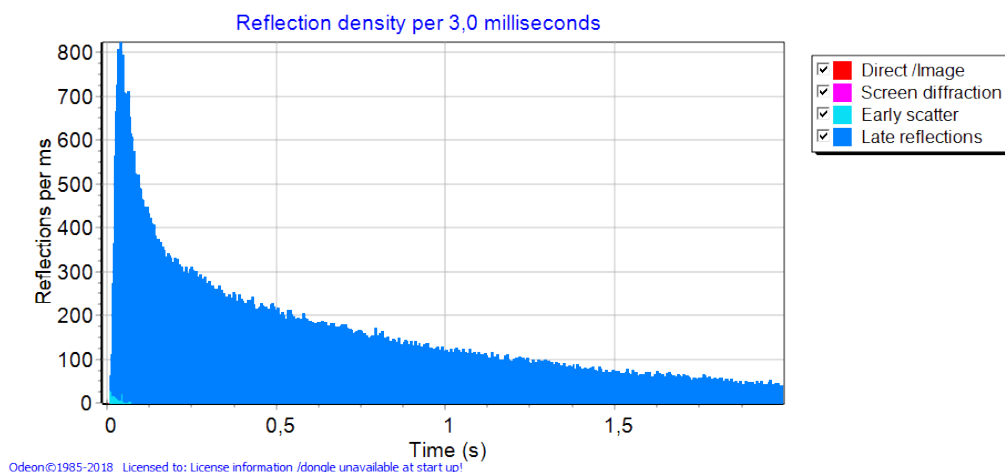
Kontrola kvality simulace

Kvalitu simulace lze posoudit použitím zásad sepsaných v sekci 3.6. Při pohledu na poklesovou křivku plně obsazené učebny 4.9, která bude nejvíce náchylná k chybám, lze usoudit, že křivka je relativně hladká bez výrazných skokových změn. V případě kontroly parametru C(Curvature) je patrné, že komplexita a provázanost prostor neumožňuje pro jediný zdroj perfektně difuzní pole a dochází jak k přiblížení se k hodnotě 10 tak i naopak propad na hodnoty záporné. Z tohoto důvodu je v prostoru učebny provedena kontrola za použití simulace s polem mikrofonů, ze které lze zhodnotit minimální a maximální hodnoty, kterých je v učebně prostřednictvím zdroje Z1 možné dosáhnout. Ty jsou uvedeny v tabulce A.1.

Parametr	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	4000
C	4,9	3,4	2,9	2,3	-0,8	1,1

Tabulka 4.6: Parametr C(Curvature).

Posledním krokem je kontrola hustoty odrazů za pomoci grafu 4.12, kde počet odrazů je větší než 25 odrazů/ms.



Obrázek 4.12: Graf zobrazující hustotu odrazů.

4.3 Návrh akustických úprav

Navržené úpravy jsou zaměřeny na zkvalitnění akustiky učebny a měly za účel přiblížit se požadavkům vzneseným normami ČSN 73 0525 a DIN 18041. Provázanost prostoru učebny a místnosti byla vyžadovaná i po provedení úprav, bylo však možné vzájemné ovlivnění potlačit.

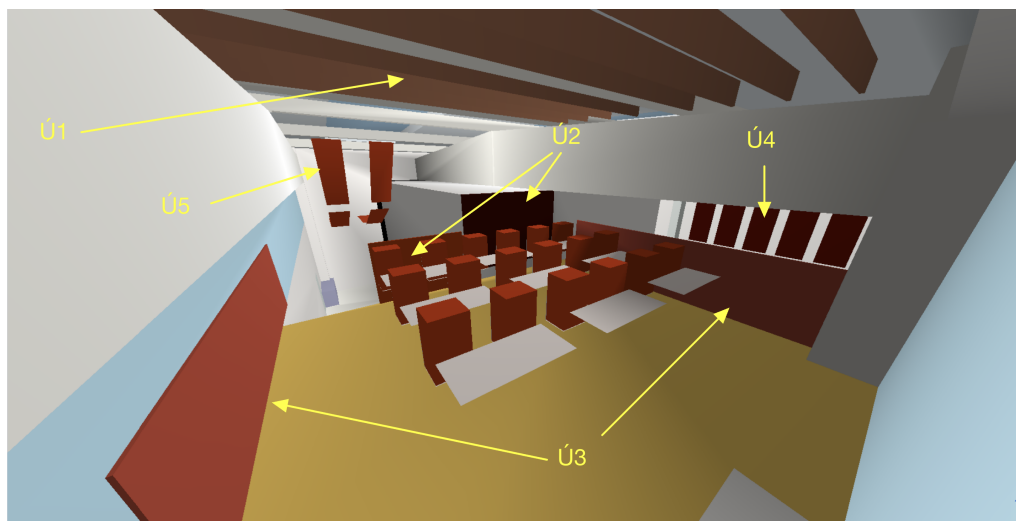
Použité akustické materiály

Ošetření prostoru bylo provedeno za použití akustických absorbérů od firmy Eco-phon. Při návrhu byl vzat do úvahy stávající stav prostoru, rozměry a určení nabízených absorbérů a materiály, které jsou již v místnosti použity.

Jednotlivé úpravy lze rozdělit do šesti skupin:

- Ú1. Úprava stropu v učebně
- Ú2. Úprava zadní části učebny
- Ú3. Úprava boků učebny
- Ú4. Úprava celého prostoru velkými absorbéry nad vraty
- Ú5. Úprava celého prostoru visícími obdélníky nad schody
- Ú6. Úprava celého prostoru visícími čtverci ve výšce učebny.

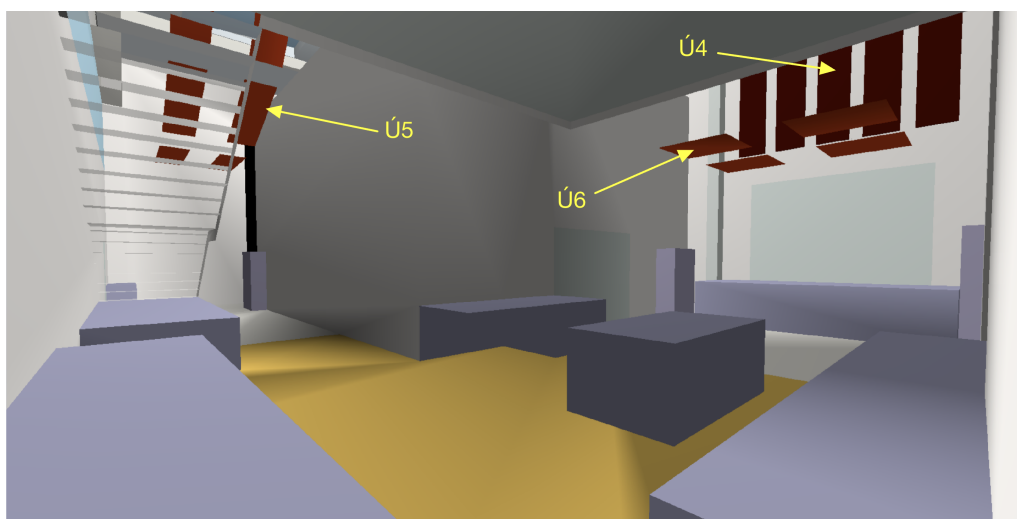
Model s úpravami ze SketchUpu lze nalézt v příloze na obrázcích A.16, A.17. Grafické znázornění úprav s popisem lze zhlédnout na obrázcích 4.13 a 4.14.



Obrázek 4.13: Grafické znázornění navržených absorbérů a jejich označení pro pohled z učebny.

Na úpravu Ú1 je použit materiál 12604, Ú2 je provedena kombinací materiálu 12600 použitého na ošetření stěny nacházející se hned za poslední řadou studentů a materiálem 12607 použitého pro ošetření otevřené zadní části učebny proti odrazům a případnému hluku do výšky uší sedícího člověka.

Na Ú3 je použit materiál 12605 s účelem snížit akustickou provázanost prostor a snížit rušení výuky z laboratoře a naopak. Úprava číslo 4 má za účel snížit dopad



Obrázek 4.14: Grafické znázornění navržených absorbérů a jejich označení pro pohled z laboratoře.

Identifikační číslo	Materiál	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
12600	Ecophon Akusto™ Wall C Extra Bass 2,7x0,6 m	0,65	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00
12605	Ecophon Solo rectangle 2,4 x 0,6 m	0,14	0,38	0,69	1,00	1,00	0,97
12607	Ecophon Solo rectangle 1,8 x 1,2 m	0,19	0,39	0,67	1,00	0,97	1,00
12606	Ecophone Solo square 1,2 x 1,2 m	0,14	0,38	0,69	1,00	1,00	0,97
12604	Ecophon Solo Baffle 1,2 x 0,3 c0,6 m	0,20	0,40	0,40	0,65	0,70	0,65
12608	Ecophone Solo Rectangle 2,4 x 0,6 m	0,17	0,49	0,69	0,83	0,80	0,80

Tabulka 4.7: Akustické materiály použité při úpravách. Všechny jsou převzaté z nabídky Ecophon [11]

velikého prostoru a zachytit případné negativní účinky paralelních stěn použitím materiálu 12600.

Ú5 má v podstatě totožný účel jako Ú4 s tím rozdílem, že by mělo dojít k většímu účinku i na užší část laboratoře a zároveň by nemělo dojít k přílišnému zakrytí střešních oken materiálem 12605 kvůli světlu. Ú6 je další stupeň oddělení akustiky laboratoře a učebny za použití materiálu 12606. Zároveň se též snaží nebránit přirozenému světlu ze střešních oken.

Nastavení parametrů simulace

Stejně jako při simulaci neupravené místnosti bylo potřeba nastavit pouze maximální dobu dozvuku na 2000 ms a počet pozdních paprsků, který byl z důvodu přidání velmi pohltivého materiálů zvýšen na 20000.

Rozmístění zdrojů a přijímačů zůstalo stejné jako pro neupravený model místnosti. Zachováno bylo i rozdělení prostoru a využití specifických zdrojů a mikrofonů pro dané simulace.

Podrobné vyhodnocení úprav

Na vytvoření 3D modelu místnosti byl použit již hotový model prostoru ve stávajícím stavu, který byl upraven. Tyto úpravy však mohli nepatrně ovlivnit výsledné hodnoty i pro simulaci bez použití akustických materiálů. Z tohoto důvodu byl prostor znovu nasimulován s modelem obsahujícím úpravy, kdy všem použitým absorberům byl připsán transparentní materiál 0. Pro vyhodnocení úprav je tento stav považován za stav původní místnosti bez úprav.

Validita měření byla zkontrolována v souladu se sekci 3.6 a nejdůležitější grafy jako A.18 A.20 jsou uvedeny v přílohách.

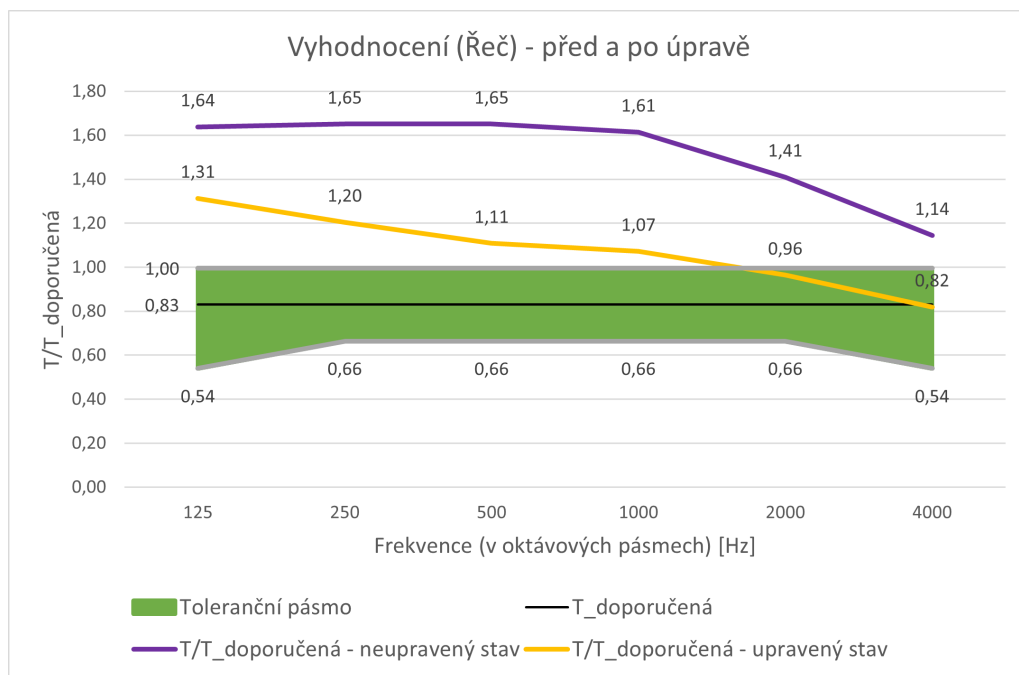
Každá úprava je graficky vyhodnocena zvlášť pro učebnu a laboratoř a v obou případech pro zcela obsazený prostor. Tyto grafy (A.23 až A.33) je možné najít v příloze.

Vyhodnocení dle normy ČSN 73 0525 je přehledně uvedeno tabulkou 4.8 a grafem 4.15. Vyhodnocení podle normy DIN 18041 je uvedeno v přílohách v tabulce A.2 a grafu A.34.

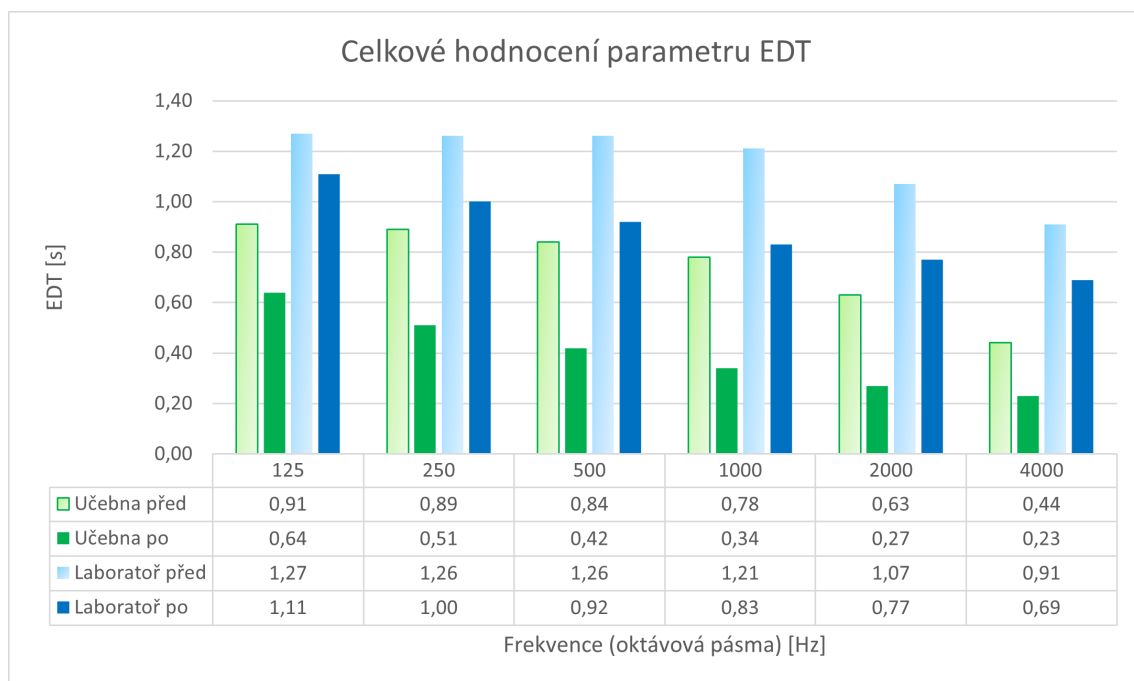
Vyhodnocení učebny podle ČSN 73 0525	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	4000
T ₃₀ - před úpravou	1,36	1,37	1,37	1,34	1,17	0,95
T ₃₀ - po úpravě	1,09	1,00	0,92	0,89	0,80	0,68
T _{doporučená_min}	0,54	0,66	0,66	0,66	0,66	0,54
T _{doporučená_max}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
T _{doporučená}	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
T/T _{doporučená} - neupravený stav	1,64	1,65	1,65	1,61	1,41	1,14
T/T _{doporučená} - upravený stav	1,31	1,20	1,11	1,07	0,96	0,82

Tabulka 4.8: Vyhodnocení doby dozvuku T_{30} plně obsazené učebny před a po úpravě normou ČSN 73 0525 pro přenos řeči.

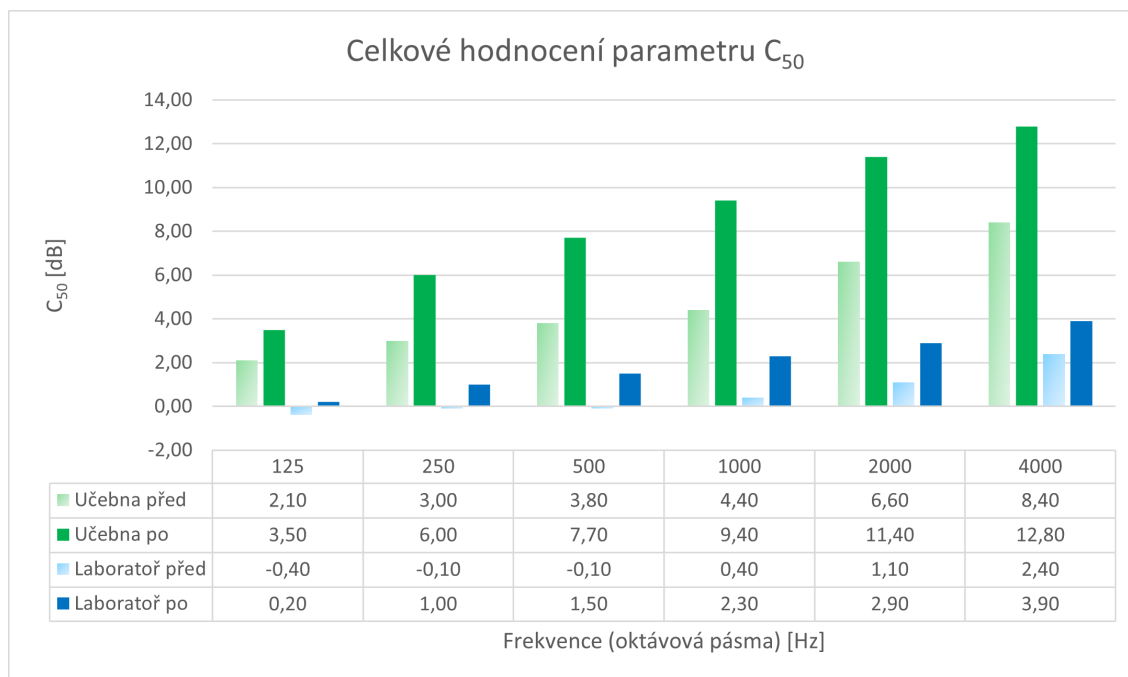
Doplňující akustické parametry kompletně upravené místnosti s plnou obsazeností jsou uvedeny v tabulce A.3. Grafické vyhodnocení jejich změny po aplikování akustických úprav je uvedeno v grafech 4.16 až 4.20. Tyto hodnoty jsou pro učebnu v rozmezí stanoveném tabulkou 2.6 nebo jsou vychýleny na stranu zlepšení přenosu řeči.



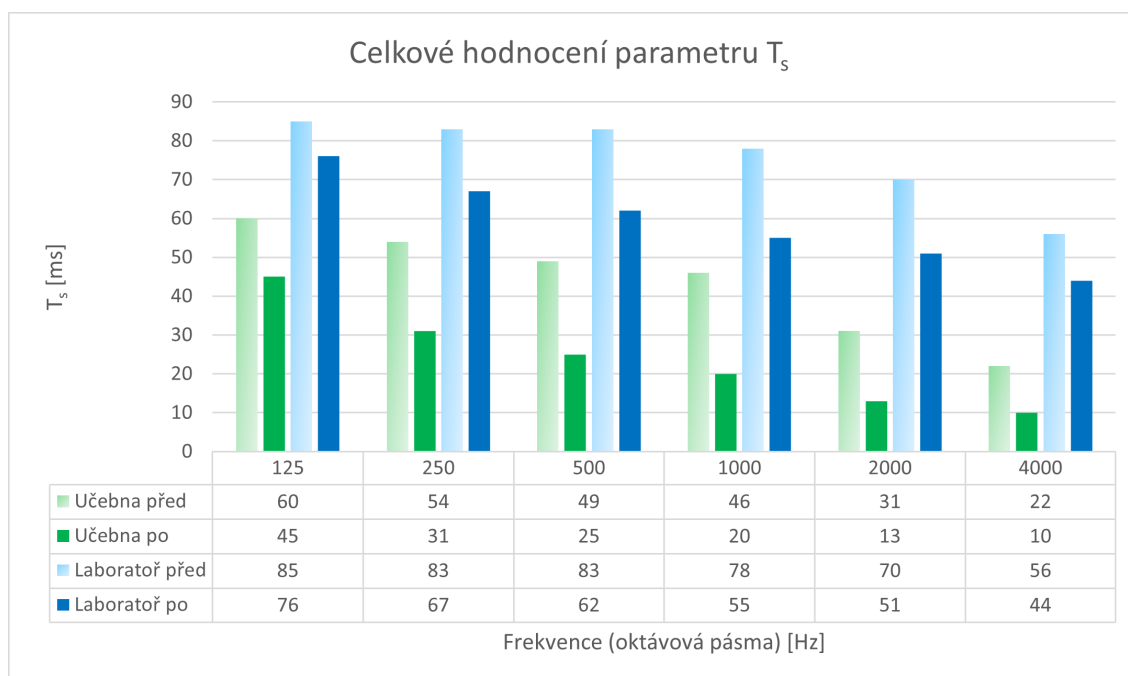
Obrázek 4.15: Grafické vyhodnocení obsazené učebny před a po úpravě normou ČSN 73 0525 pro přenos řeči.



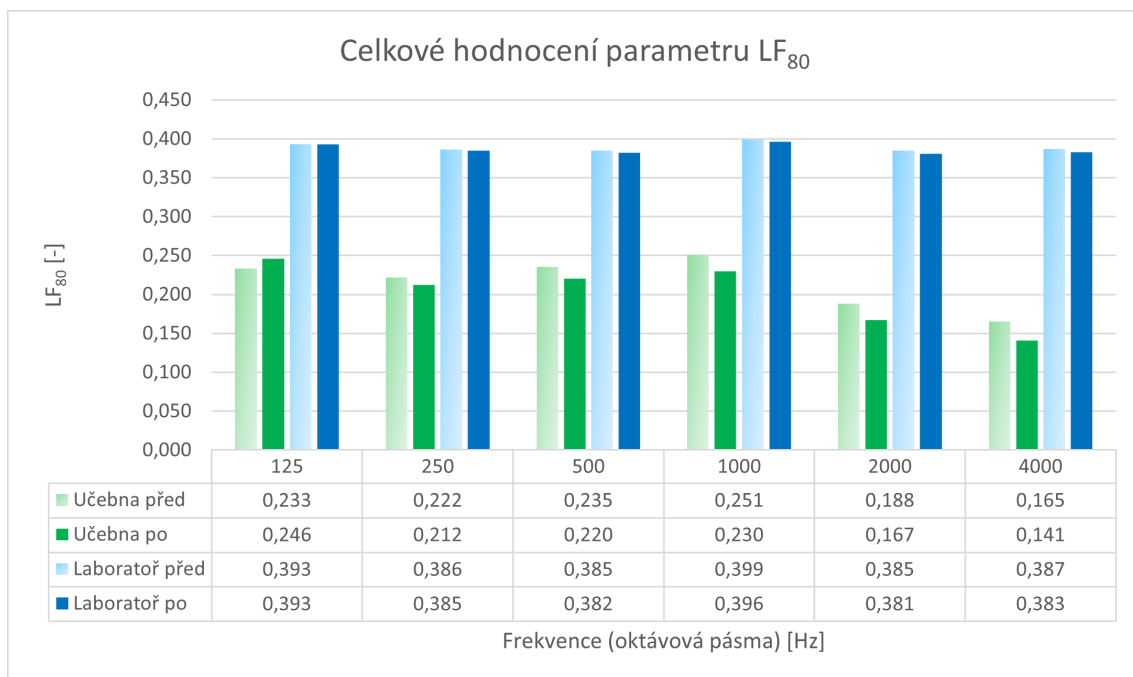
Obrázek 4.16: Celkový vliv úprav na parametr počáteční doba dozvuku EDT.



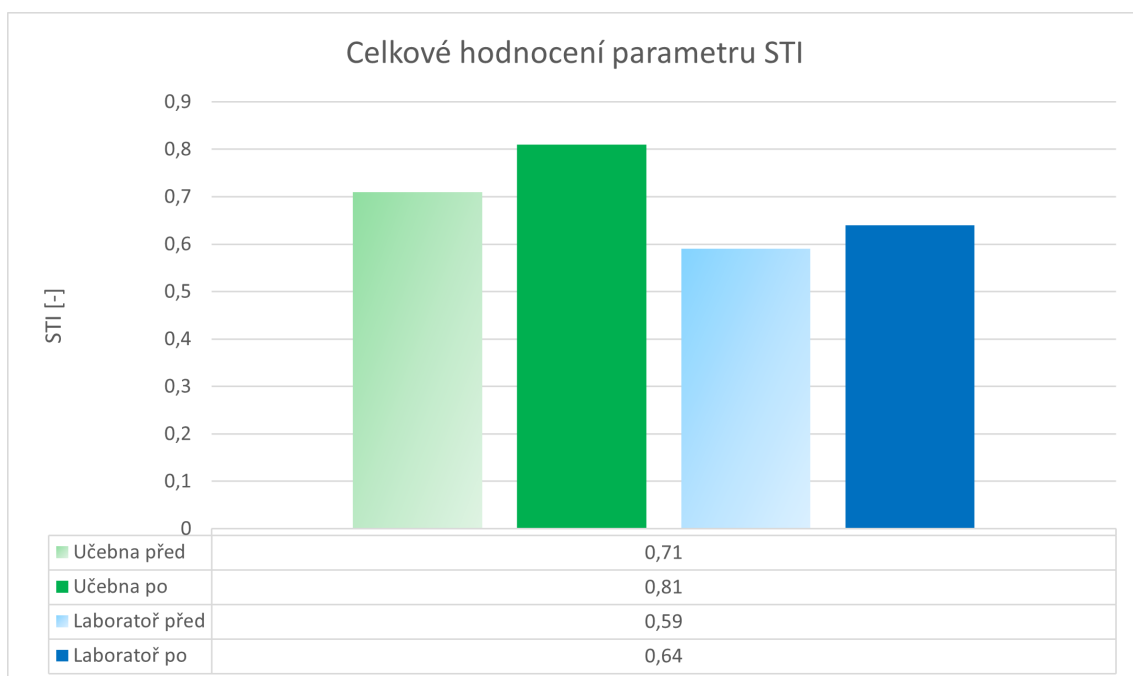
Obrázek 4.17: Celkový vliv úprav na parametr míra jasnosti C_{50} .



Obrázek 4.18: Celkový vliv úprav na parametr čas těžiště T_s .



Obrázek 4.19: Celkový vliv úprav na parametr míra počáteční boční energie LF_{80} .



Obrázek 4.20: Celkový vliv úprav na parametr index přenosu řeči STI.

Akustické úpravy - závěr

Z celkového zhodnocení doby dozvuku v porovnání s normou ČSN 73 0525 a DIN 18041 v grafech 4.15 a A.34 zřetelně vyplývá, že ani před úpravou, ani po úpravě doba dozvuku neodpovídá uvedeným normám. Důvodem je princip výpočtu doby dozvuku, který počítá s difuzivitou zvukového pole, a tudíž pro větší přesnost zanedbává pokles o prvních 5 dB z poklesové křivky. Tento prvotní pokles je však stěžejní v případě zkoumané učebny z důvodu zlomu způsobeného akustickou provázaností prostor. Pro odhad akustických vlastností zkoumané místnosti je proto nezbytné pracovat i s parametry, které berou v potaz poklesovou křivku již od počátečního poklesu.

Při prozkoumání ostatních akustických parametrů přispívajících k srozumitelnosti je dle grafů 4.16 až 4.20 u všech patrné zlepšení. Parametry mající vliv na vnímanou kvalitu přenosu řeči jako EDT, C_{50} a T_s dokonce nabývají po úpravě některých hodnot mimo typické rozmezí a vlastnosti učebny by se tak po úpravě měli zlepšit. V případě parametru indexu přenosu řeči STI bylo úpravou dosaženo lepších hodnot z 0,71 na 0,81 a pro laboratoř z 0,59 na 0,64. Ačkoliv tento parametr nelze vztáhnout přímo k tabulce 2.3 z důvodu absence hluku v pozadí v průběhu simulace, lze jej použít na odhad zlepšení přenosu řeči před a po úpravě. Na druhou stranu parametr LF_{80} udávající vnímanou šířku zdroje se změnil pouze minimálně.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo představit čtenáři prostorovou akustiku, její simulaci prostřednictvím softwaru ODEON a následně tyto znalosti uplatnit v praktické části. Pro provedení simulace prostoru byla vybrána velká hala s komplexním vnitřním rozpořádáním vykazující akustickou provázanost mezi částí sloužící jako učebna a laboratoř.

Teoretická část je souhrnem znalostí prostorové akustiky, které jsou nutné pro pochopení vlivů vyskytujících se při řešení chování zvuku v uzavřeném prostoru. Tento ucelený teoretický úvod by měl posloužit i nezaujatému čtenáři k dosažení dostatečné orientace v problematice a dovolit hlubší porozumění textu. Vysvětlených základů bylo následně využito pro uvedení požadavků a doporučení z norem vztahujících se ke zkoumanému prostoru v praktické části práce.

Ucelený úvod do prostorové akustiky byl následně aplikován při popisu programu ODEON. Zde jsou uvedeny pravidla a postupy nezbytné pro správný průběh simulace. Jedná se o přehledné popsání vymodelování místnosti, počátečního nastavení simulace a kontrola, zda jsou výsledné hodnoty akceptovatelné. Za účelem hlubšího porozumění možnostem a limitacím byl uveden i princip, na kterém je simulace založena.

V praktické části práce došlo k seznámení s vybraným prostorem a k aplikaci uvedených teoretických znalostí. Nejdříve byl zde popsán aktuální stav místnosti a její komplexní prostorové uspořádání vedoucí na akustickou provázanost. Následně byl zkoumaný prostor vymodelován a převeden do ODEONu, kde byla provedena analýza a zhodnocení stávajícího stavu. Při modelování bylo kromě stavebního provedení a neživých prvků do návrhu přidán i element obsazenosti, který má v případě většího počtu obecnstva markantní dopad na akustiku. Při rozboru byl kladen důraz na prostor učebny podléhající doporučením uvedených v normách a je na akustiku z pohledu celého prostoru nejnáročnější. Analýza prostoru ukázala důležitost i dalších akustických parametrů kromě doby dozvuku které byly lépe schopny ukázat akustické rozdíly jednotlivých akusticky provázaných prostorů.

Po zjištění nedostatků doby dozvuku byl proveden návrh na úpravu s cílem přiblížit se hodnotám předepisovanými normami a zlepšit vlastnosti učebny pro přenos řeči. Úpravy za pomoci absorbérů byly navrženy tak, aby co nejméně svou přítomností narušily využívaný prostor a neovlivňovaly pozitivní faktory jako například denní světlo. Vliv úprav byl jednotlivě vyhodnocen a následně proběhla analýza při současné aplikaci všech absorbérů. Takto finálně upravený prostor byl podroben kompletnímu srovnání se stavem před úpravami a došlo k vyhodnocení doby dozvuku prostřednictvím norem. Za použití českých národních norem a DIN 18041

bylo zjištěno, že i přes výrazné zlepšení vůči předchozímu stavu nedošlo k dodržení doporučených hodnot doby dozvuku. Následně proběhlo vyhodnocení dalších sledovaných parametrů dovolujících hlubší přiblížení vlastností simulovaného prostoru u kterých bylo, dle kterých došlo taktéž k výraznému zlepšení a to mnohdy i mimo typické rozmezí udávané normou ČSN EN ISO 3382-1.

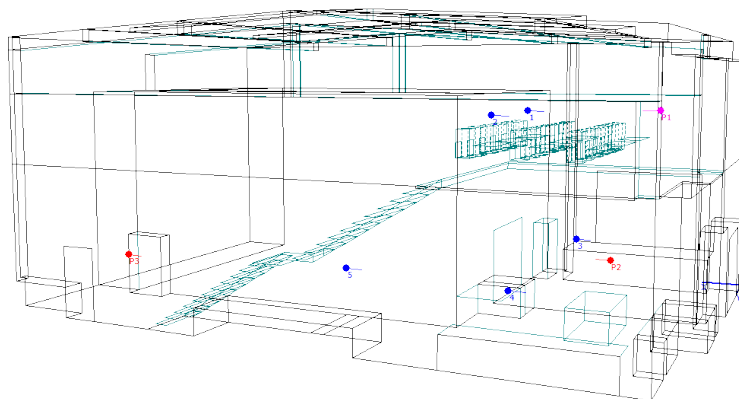
Literatura

- [1] *Acoustic quality in rooms: Specifications and instructions for the room acoustic design, English translation of DIN 18041:2016-03*. 1th. Berlín: NALS, 2016.
- [2] *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*¹. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 2008 [cit. 2023-05-22]. ISBN 978-3-540-48830-9.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48830-9>
- [3] *Acoustic Supplies* nevedeno: nevedeno, 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/>
- [4] *ABSORPTION COEFFICIENTS*. In: Akustik. nevedeno: nevedeno, nevedeno [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf
- [5] *Acoustic and Thermal Properties of Polypropylene Carpets: Effect of Pile Length and Loop Density. Fibers and Polymers* KÜÇÜK, Merve a Yasemin KORKMAZ. 2019, 20(7), 1519-1525. ISSN 1229-9197.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1181-1>
- [6] *Comsol*. 2023 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/>
- [7] *ČSN EN ISO 3382-2: Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*, 2009
- [8] *ČSN 73 0525: Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*, 1998
- [9] *ČSN EN 60268-16: Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*, 2012
- [10] *ČSN EN ISO 3382-1, Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*, 2009
- [11] *Ecophon* [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.ecophon.com/cz/>
- [12] EVEREST, F. Alton a Ken C. POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2009. ISBN 978-0-07-160332-4.
- [13] FELLAH a Erick OGAM. *Acoustics of Materials*. 1th ed. IntechOpen, 2019 [cit. 2021-12-12]. ISBN 978-1-83880-350-6.
Dostupné z: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/40049>

- [14] HAK, C. C. J. M., R. H. C. WENMAEKERS a L. C. J. VAN LUXEMBURG. *Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters*. Acta Acustica united with Acustica. 2012, 98(6), 907-915 [cit. 2022-09-05]. ISSN 16101928. Dostupné z: doi:10.3813/AAA.918574
- [15] *I-simpa* [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://i-simpa.univ-gustave-eiffel.fr/presentation/>
- [16] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1.
- [17] KUTTRUFF, Heinrich. *Room acoustics*. 4th ed. London: Applied Science Publishers, 1973. ISBN 0-419-24580-4.
- [18] MENG, Q., D. SEN, S. WANG a L. HAYES. *Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes*. 2008. In: 2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems. Gold Coast, QLD, Australia: IEEE, 2008, 2008, s. 1-5 [cit. 2022-07-30]. ISBN 978-1-5090-7684-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICSPCS.2008.4813749>
- [19] *Moisture absorption, thermal conductivity and noise mitigation of clay based plasters: The influence of mineralogical and textural characteristics*. RANDAZZO, L., G. MONTANA, A. HEIN, A. CASTIGLIA, G. RODONÒ a D.I. DONATO. Applied Clay Science. 2016, 132-133(132-133), 498-507. ISSN 01691317. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.021>
- [20] *ODEON Room Acoustics Software: User's Manual*. Version 16. Lyngby, Denmark, 2020. Dostupné také z: <https://odeon.dk/download/Version16/OdeonManual.pdf>
- [21] *On the accuracy of audience implementations in acoustic computer modelling*. HAMMOND, Ross, Adam HILL a Peter MAPP. Journal of the audio engineering society. New York, 2018, -(145), 9.
- [22] *REW: Room Acoustics Software* [online]. 2022 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.roomeqwizard.com/>
- [23] RINDEL, J. Ho. *Modal Energy Analysis of Nearly Rectangular Rooms at Low Frequencies*. Acta Acustica united with Acustica. 2015, 101(6), 1211-1221 [cit. 2022-09-04]. ISSN 16101928. Dostupné z: <https://doi.org/10.3813/AAA.918914>
- [24] RINDEL, Jens Holger. *The Use of Computer Modeling in Room Acoustics*. Journal of Vibroengineering. 2000, 2001, 2000(3), 5 [cit. 2022-09-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/2461601_The_Use_of_Computer_Modeling_in_Room_Acoustics
- [25] SCHROEDER, M. R. *Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses*. The Journal of the Acoustical Society of America. 1979, 66(2), 497-500 [cit. 2022-07-26]. ISSN 0001-4966. Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.383103>

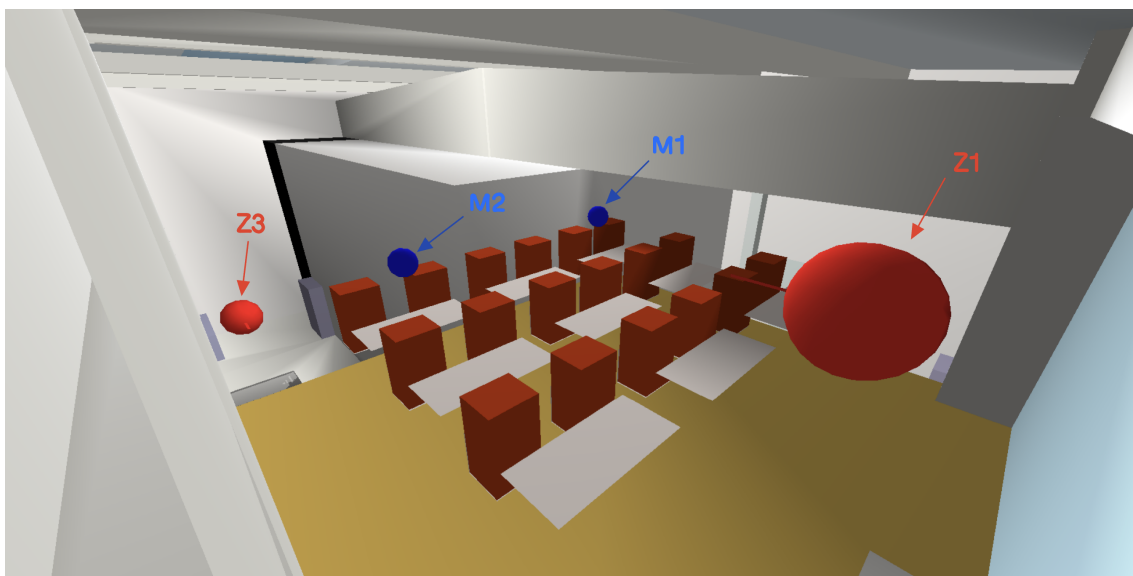
- [26] SCHROEDER, M. R. *Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces*. The Journal of the Acoustical Society of America. 1970, 47(2A), 424-431 [cit. 2022-09-04]. ISSN 0001-4966.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.1911541>
- [27] SCHROEDER a R. MANFRED. *The “Schroeder frequency” revisited*. 99. 1996 [cit. 2023-04-27]. ISSN 0001-4966. 10.1121/1.414868.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.414868>
- [28] *Simcenter: Acoustic simulation* [online]. 2023 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/simulation-test/acoustic-simulation/>
- [29] *SoftDB: RAP-ONE* [online]. 2023 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.softdb.com/products/rap-one/>
- [30] *Stavební akustika: Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků - Část 6: Zvuková pohltivost v uzavřených protorech ČSN EN 12354-6*. 1. Český normalizační institut, 2004.
- [31] *Sound absorption performance of modified concrete: A review*. *Journal of Building Engineering* TIE, Tzer Sheng, Kim Hung MO, Azma PUTRA, Siaw Chuing LOO, U. Johnson ALENGARAM a Tung-Chai LING. . 2020, 30. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101219>

A Přílohy

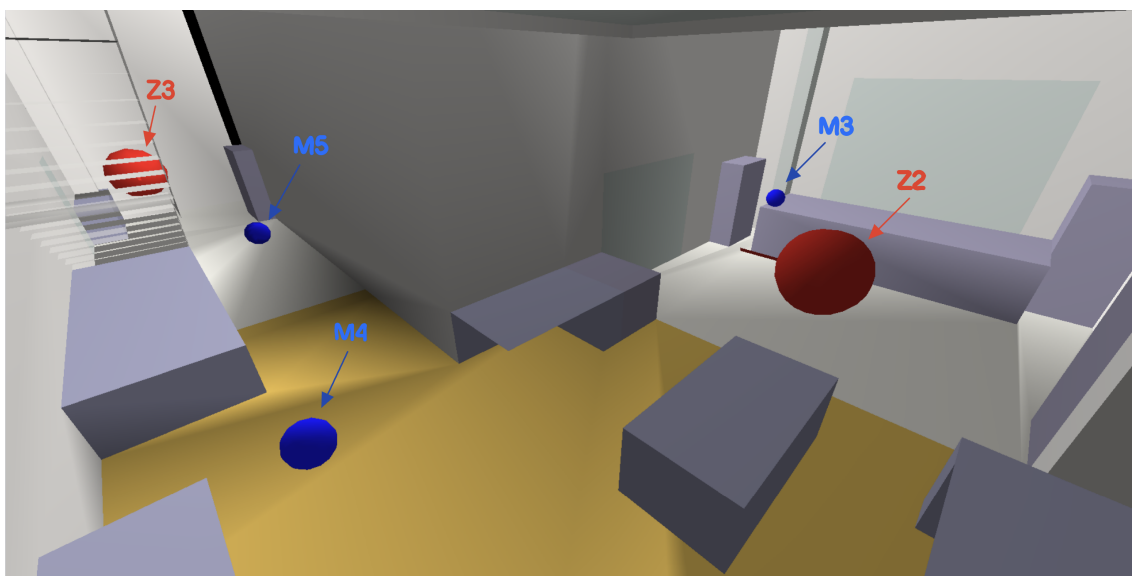


odeon©1985-2018 Licensed to: License information /Single unavailable at start up!

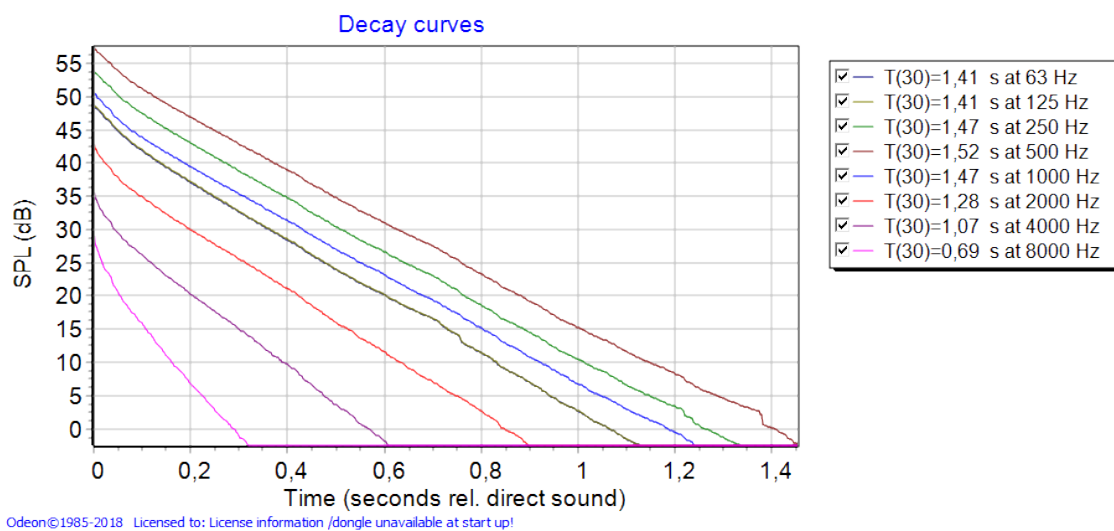
Obrázek A.1: Ukázka rozmístování zdrojů Z a mikrofonů M v programu ODEON.



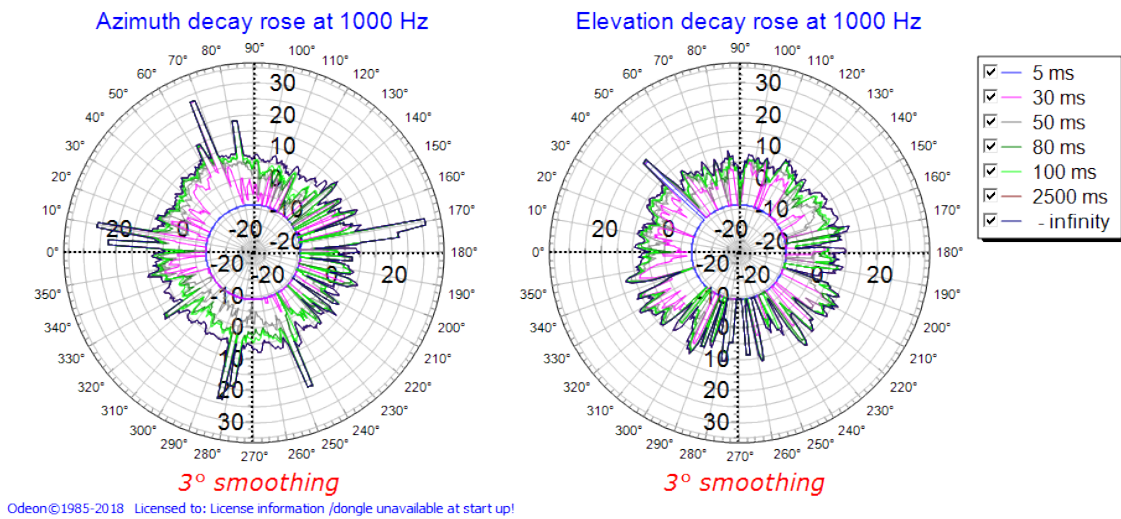
Obrázek A.2: Rozmístění zdrojů (červená) a mikrofonů (modrá) v neupravené učebně v programu ODEON pomocí OpenGL.



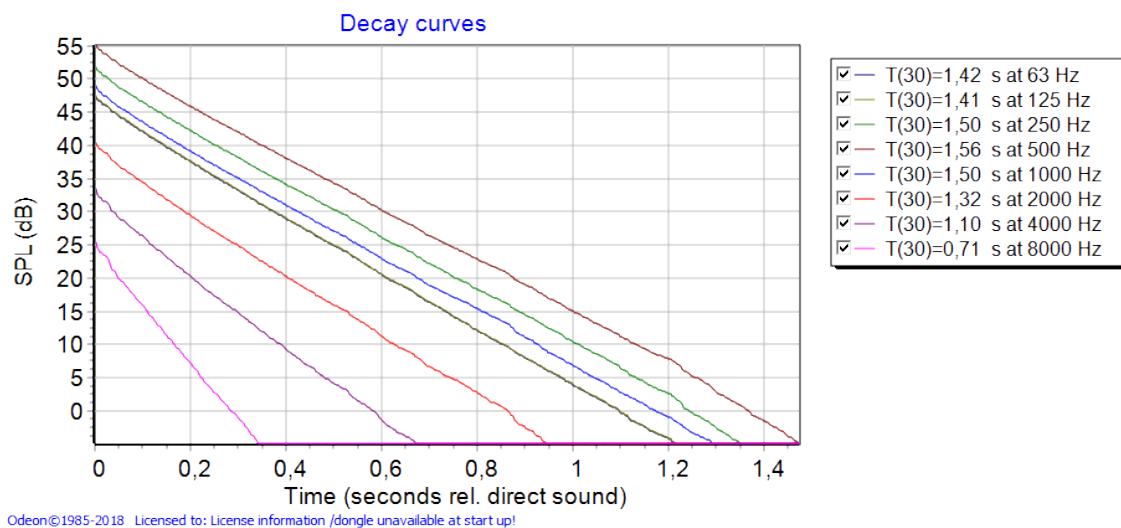
Obrázek A.3: Ukázka rozmístování zdrojů (červená) a mikrofonů (modrá) v neupravené laboratoři v programu ODEON pomocí OpenGL.



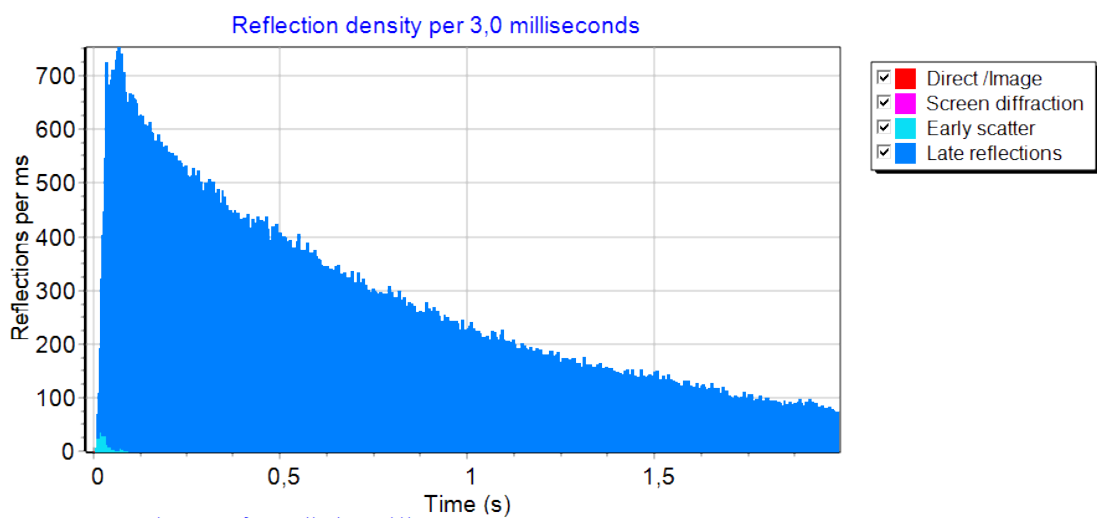
Obrázek A.4: Poklesová křivka neobsazené neupravené učebny.



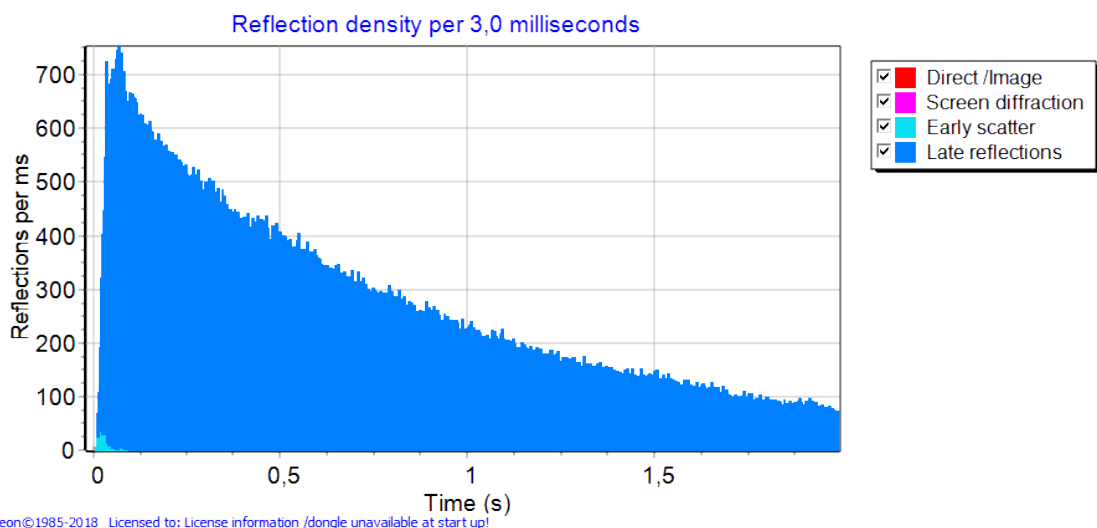
Obrázek A.5: Dozvuková růžice neobsazené neupravené učebny.



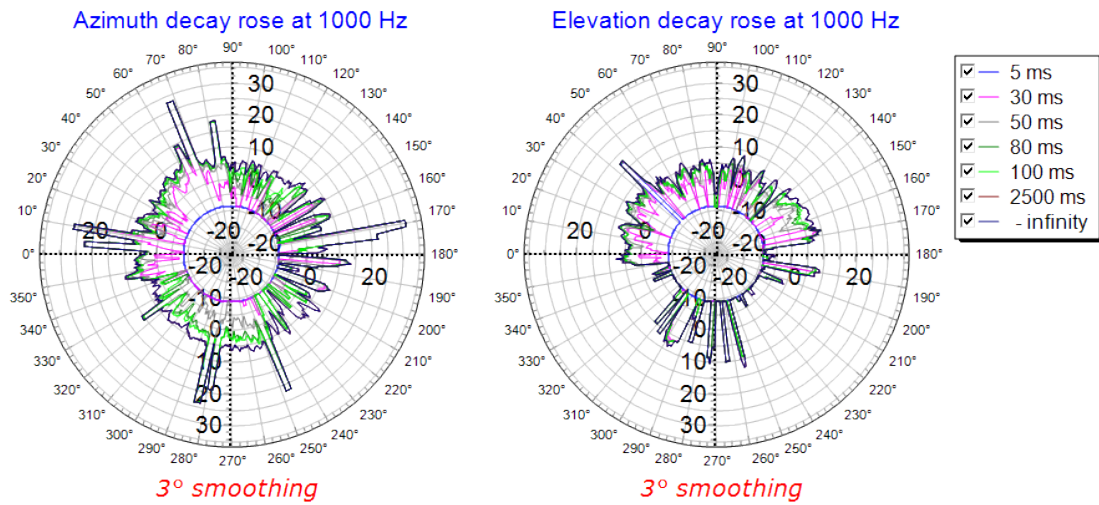
Obrázek A.6: Poklesová křivka neobsazené neupravené laboratoře.



Obrázek A.7: Hustota odrazů neobsazené neupravené laboratoře.

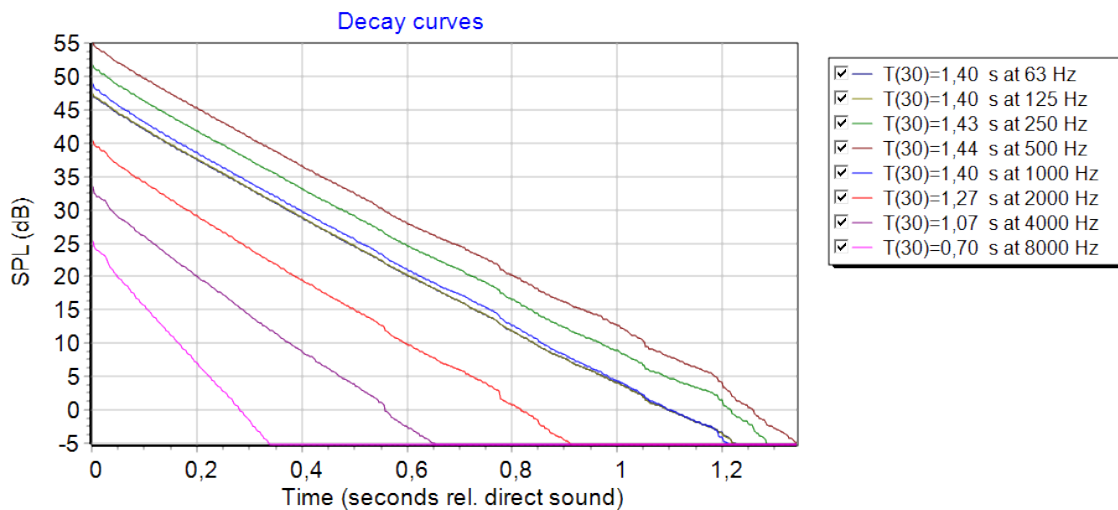


Obrázek A.8: Hustota odrazů neobsazené neupravené laboratoře.



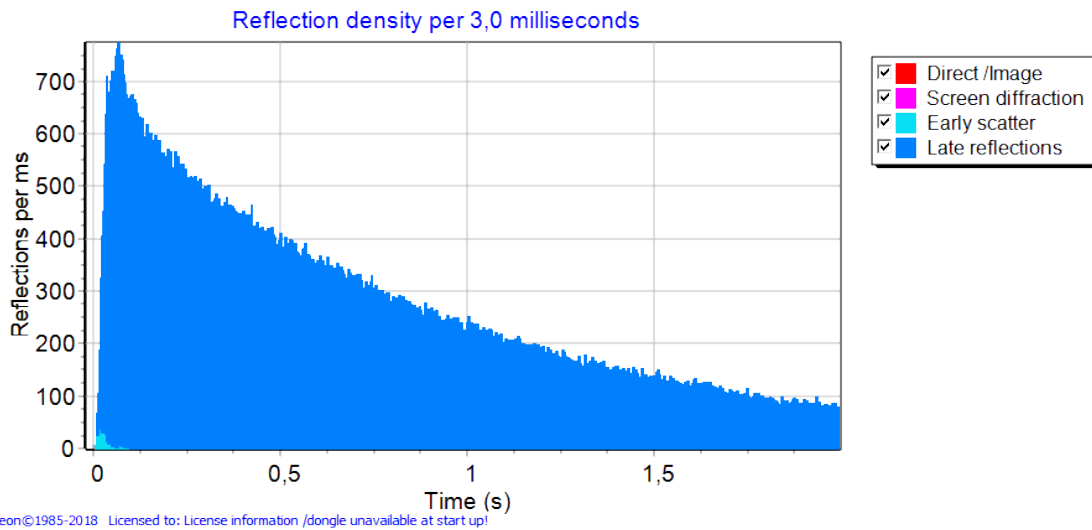
Odeon©1985-2018 Licensed to: License information /dongle unavailable at start up!

Obrázek A.9: Dozvuková růžice obsazené neupravené učebny.

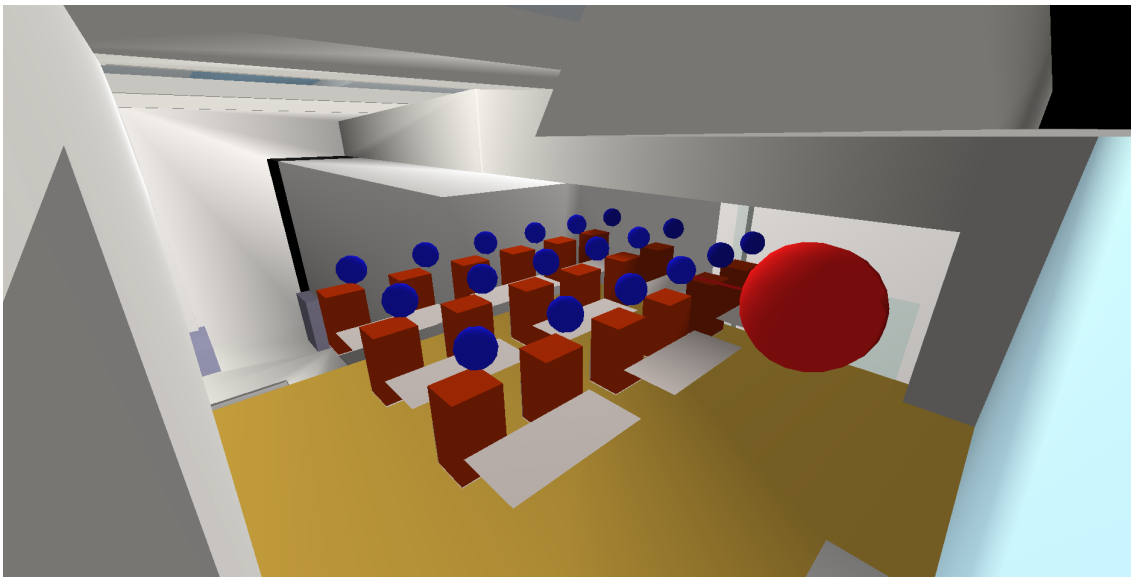


Odeon©1985-2018 Licensed to: License information /dongle unavailable at start up!

Obrázek A.10: Poklesová křivka obsazené neupravené laboratoře.



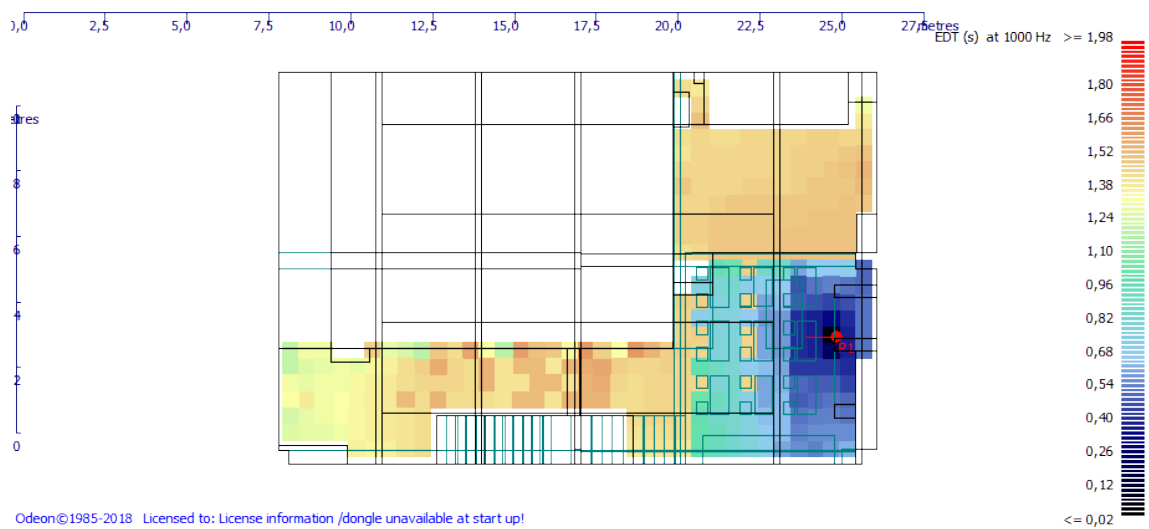
Obrázek A.11: Hustota odrazů obsazené neupravené laboratoře.



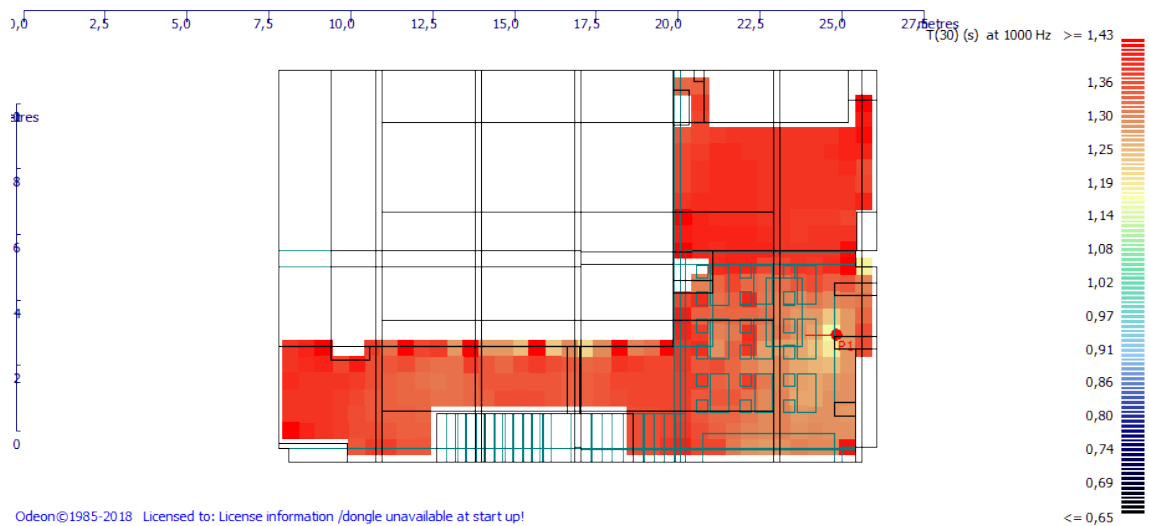
Obrázek A.12: Pole mikrofonů v obsazené neupravené učebně.

Parametr	Hodnota	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
EDT	Minimum	0,62	0,56	0,44	0,45	0,30	0,15
EDT	Maximum	0,99	0,98	0,96	0,94	0,85	0,71
EDT	Průměr	0,83	0,81	0,75	0,71	0,59	0,43
T ₃₀	Minimum	1,28	1,29	1,29	1,28	1,09	0,89
T ₃₀	Maximum	1,36	1,38	1,39	1,38	1,24	1,03
T ₃₀	Průměr	1,32	1,34	1,35	1,33	1,16	0,97
T _s	Minimum	29,00	24,00	18,00	20,00	11,00	6,00
T _s	Maximum	63,00	59,00	55,00	54,00	40,00	30,00
T _s	Průměr	50,00	45,00	41,00	40,00	28,00	19,00
C ₅₀	Minimum	1,90	2,40	3,10	3,30	4,90	6,30
C ₅₀	Maximum	6,50	7,70	9,40	8,90	12,00	14,80
C ₅₀	Průměr	3,50	4,30	5,20	5,40	7,50	9,50
LF ₈₀	Minimum	0,114	0,093	0,076	0,096	0,049	0,034
LF ₈₀	Maximum	0,291	0,290	0,308	0,316	0,246	0,233
LF ₈₀	Průměr	0,218	0,206	0,206	0,223	0,160	0,138
STI	Minimum	0,68					
STI	Maximum	0,84					
STI	Průměr	0,74					
C(Curvature)	Minimum	0,90	1,70	1,80	1,60	-0,40	-1,80
C(Curvature)	Maximum	8,80	10,80	15,40	13,70	14,60	21,80
C(Curvature)	Average	3,60	4,70	5,70	5,50	4,10	6,10

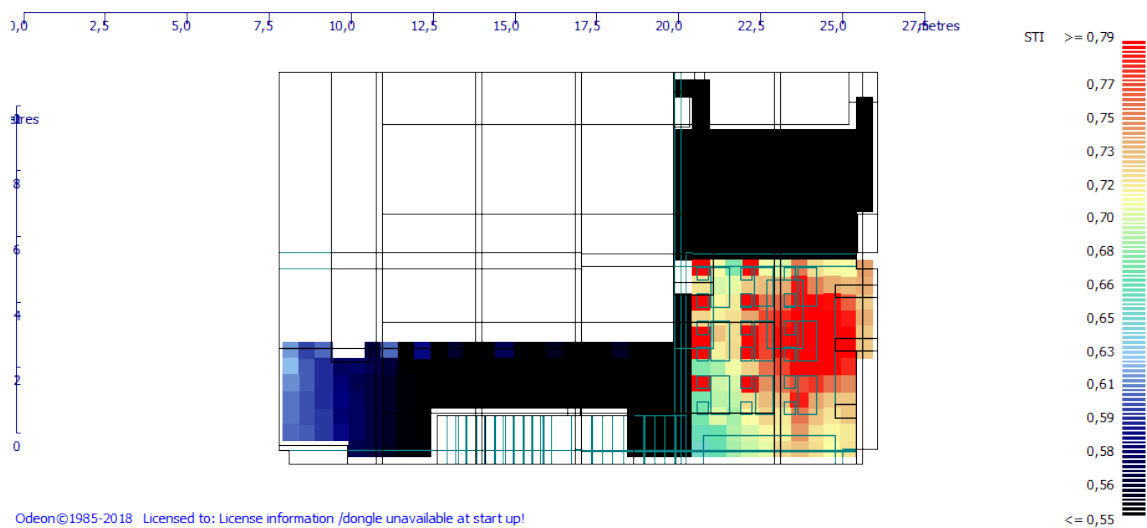
Tabulka A.1: Sledované akustické parametry pomocí pole mikrofonů pro plně obsazenou učebnu bez úprav. Minimum, maximum, průměr.



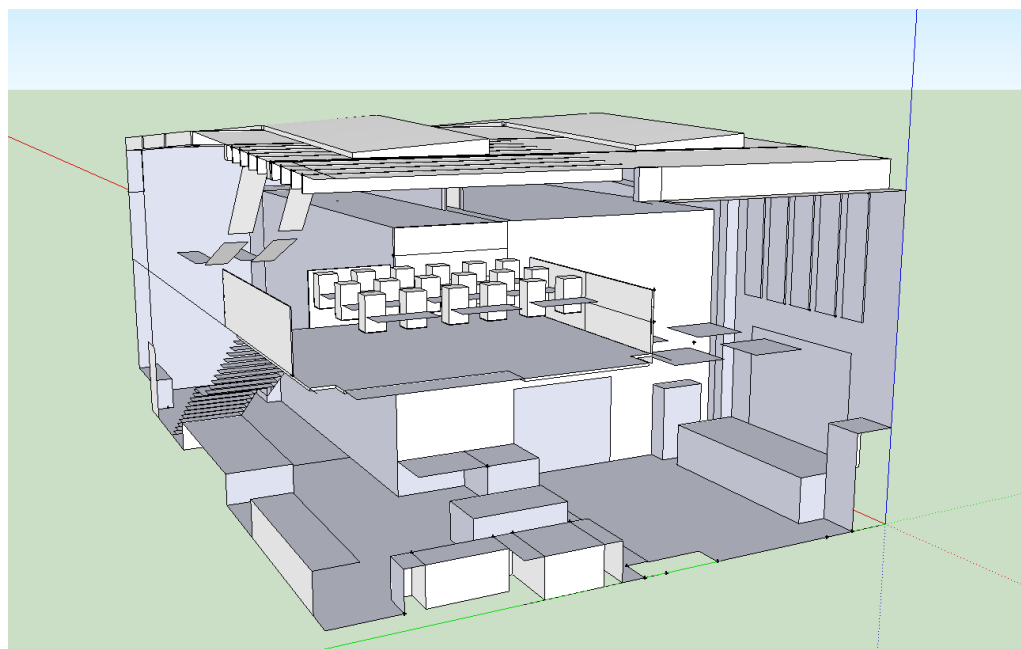
Obrázek A.13: Vypočítaná počáteční doba dozvuku EDT pomocí bodové odezvy v mřížce pro prostor bez úprav.



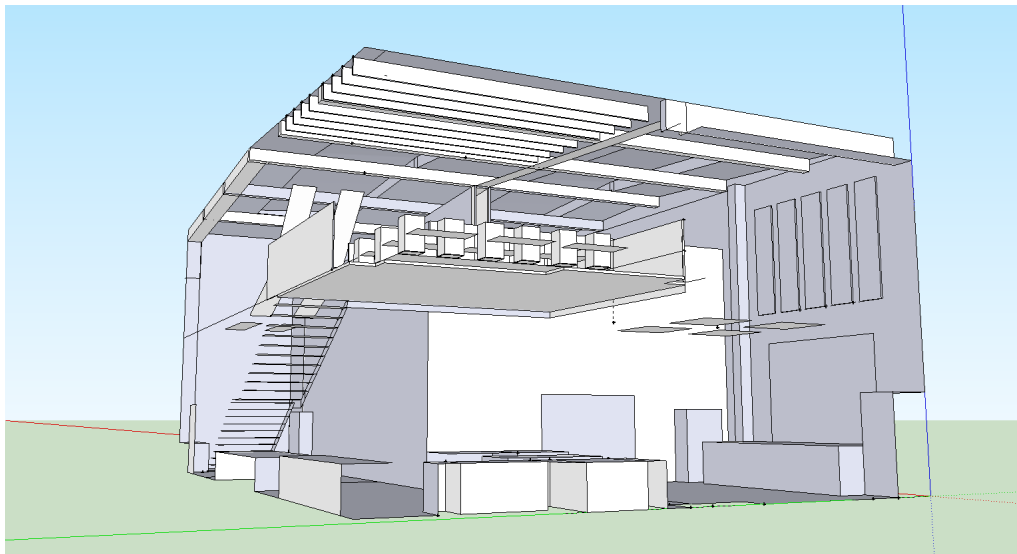
Obrázek A.14: Vypočítaná doba dozvuku T_{30} pomocí bodové odezvy v mřížce pro prostor bez úprav.



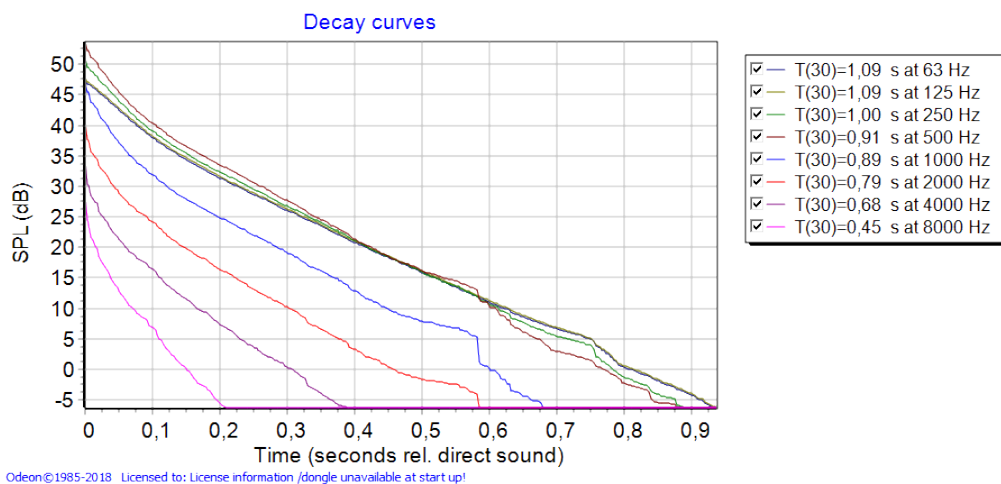
Obrázek A.15: Vypočítaný index přenosu řeči STI pomocí bodové odezvy v mřížce pro prostor bez úprav.



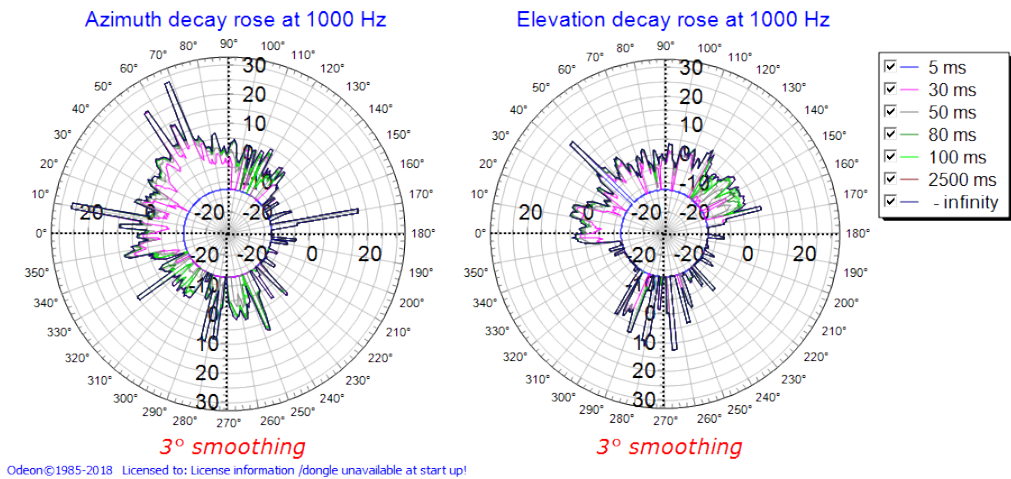
Obrázek A.16: SketchUp model s navrženými akustickými úpravami, pohled shora.



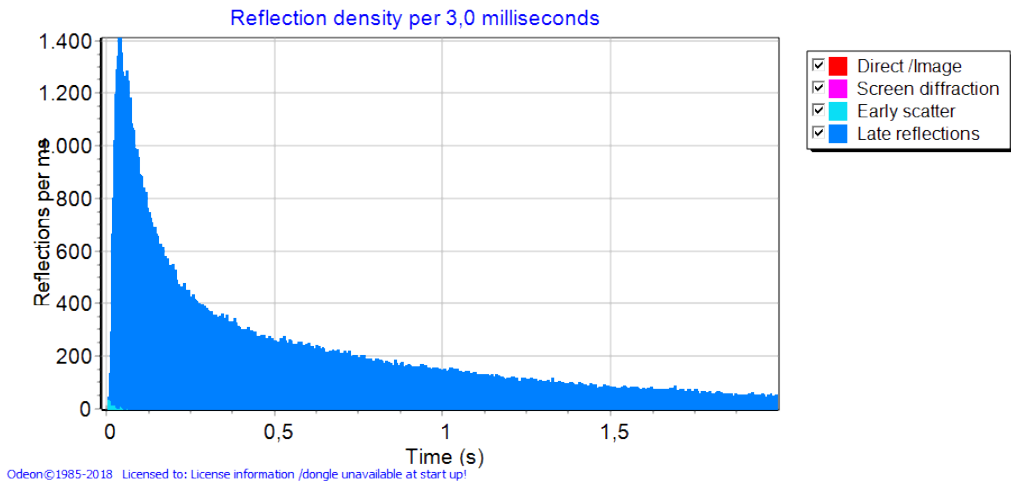
Obrázek A.17: SketchUp model s navrženými akustickými úpravami, pohled zdola.



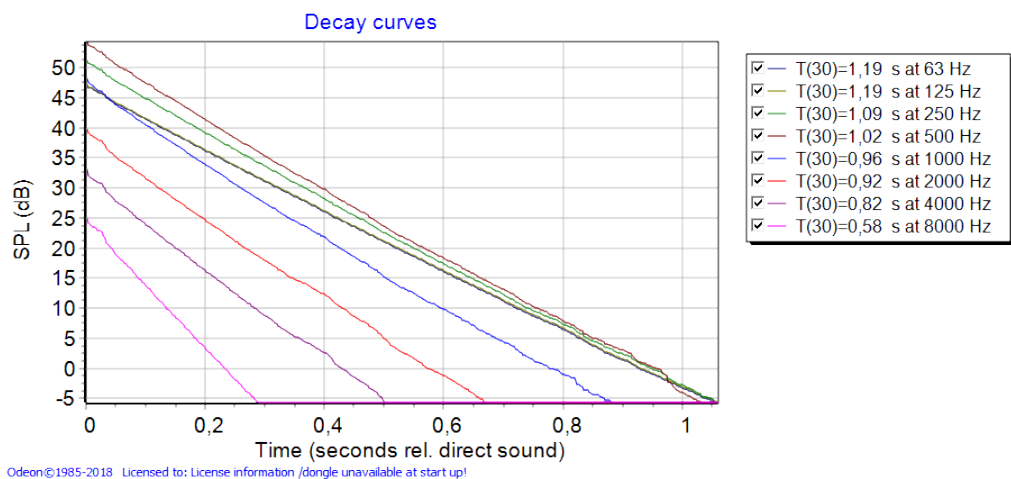
Obrázek A.18: Poklesová křivka obsazené upravené učebny.



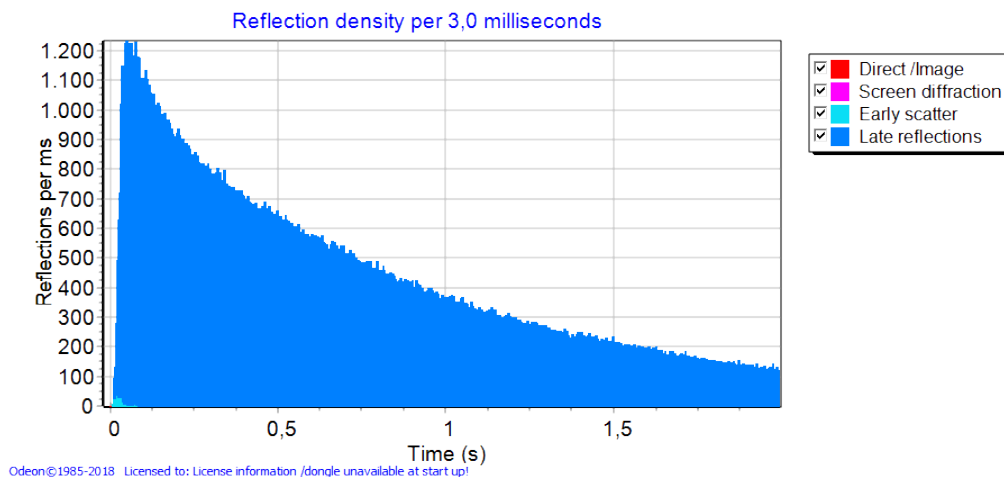
Obrázek A.19: Dozvuková růžice obsazené upravené učebny.



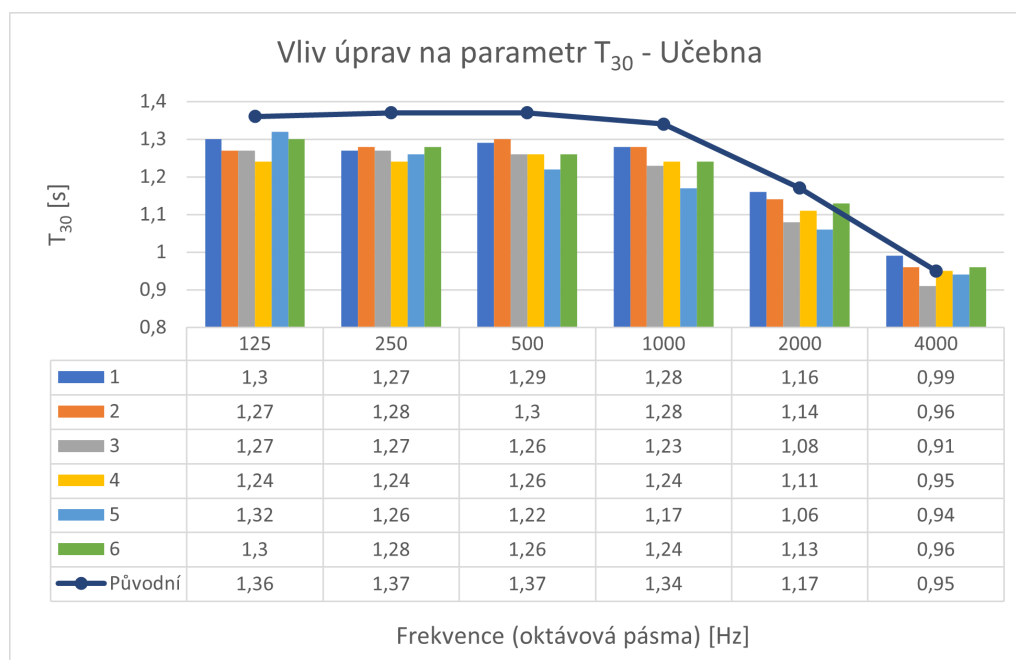
Obrázek A.20: Hustota odrazů obsazené upravené učebny.



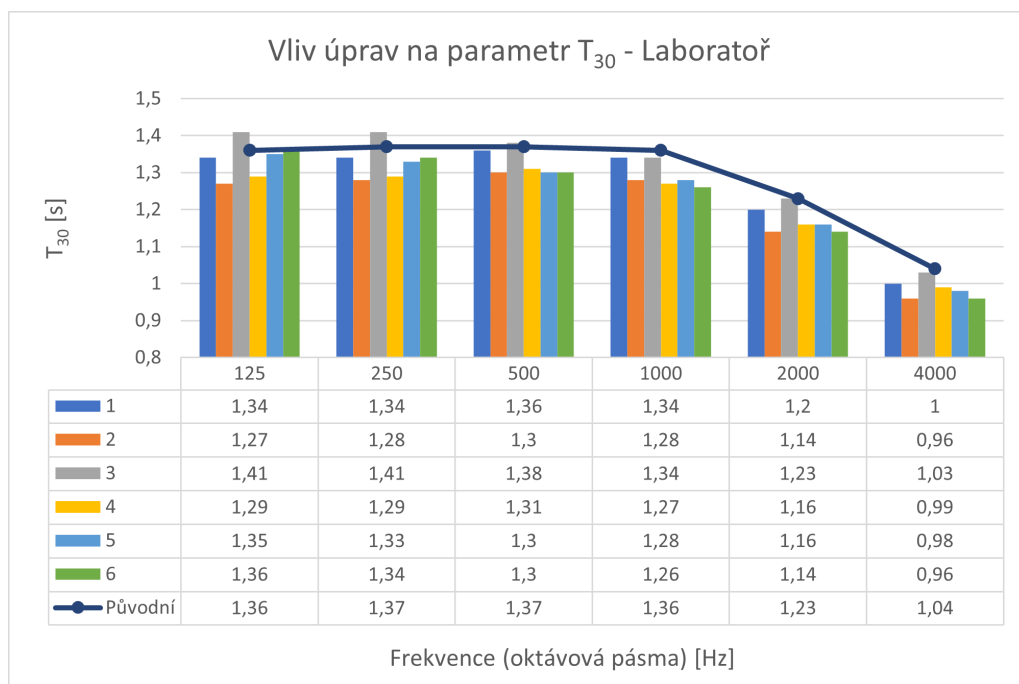
Obrázek A.21: Poklesová křivka obsazené upravené laboratoře.



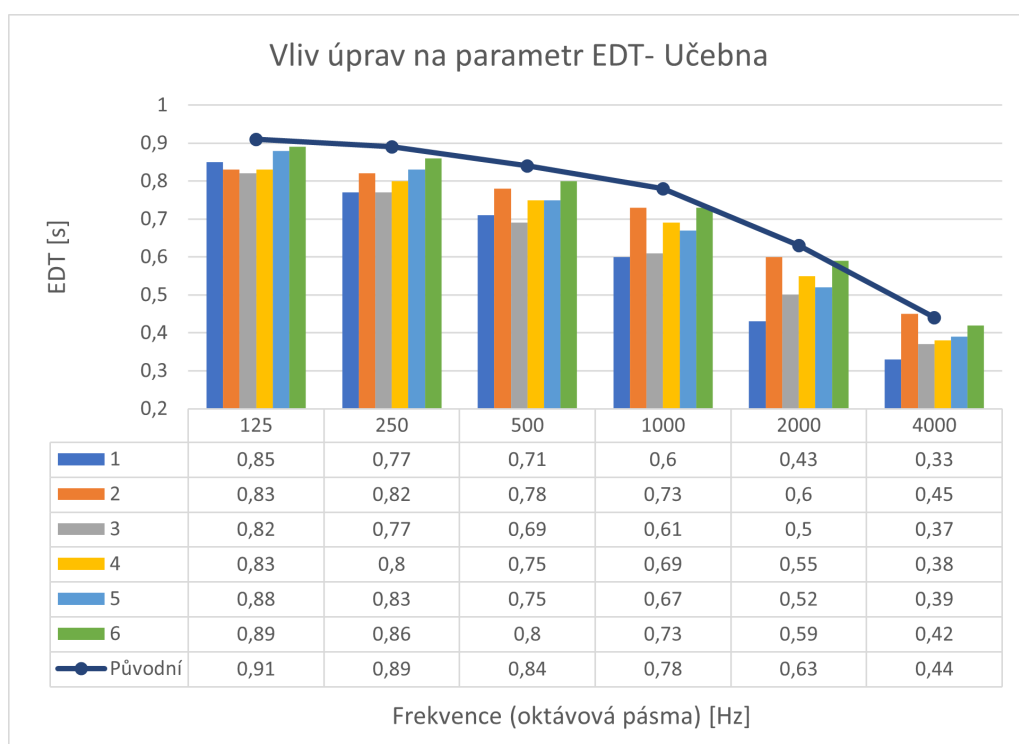
Obrázek A.22: Hustota odrazů obsazené upravené laboratoře.



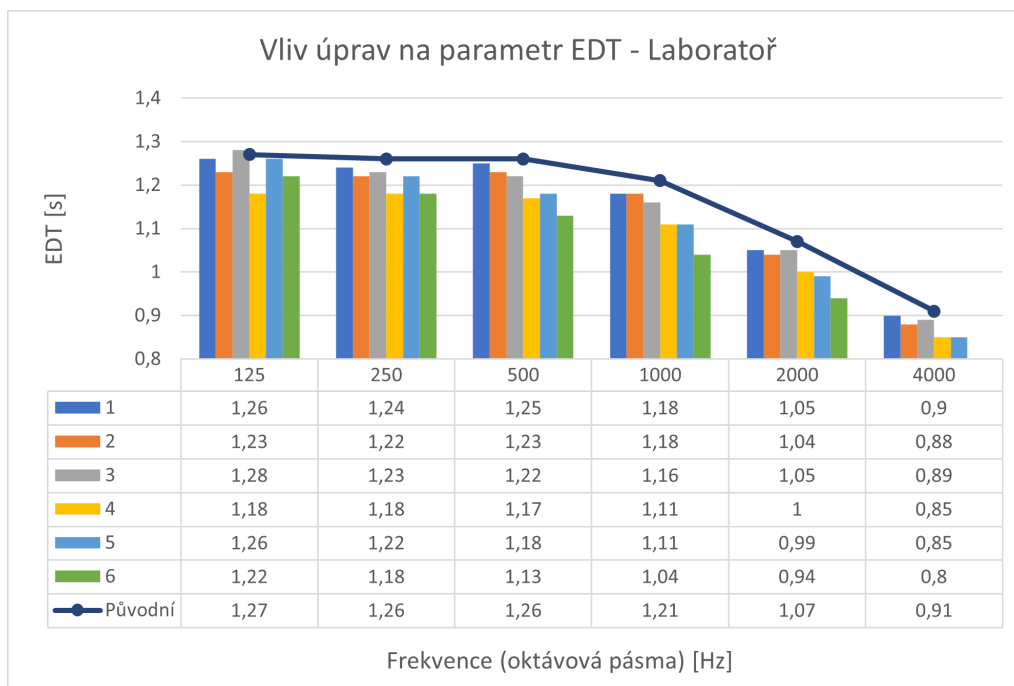
Obrázek A.23: Vliv jednotlivých úprav na parametr doby dozvuku T_{30} .



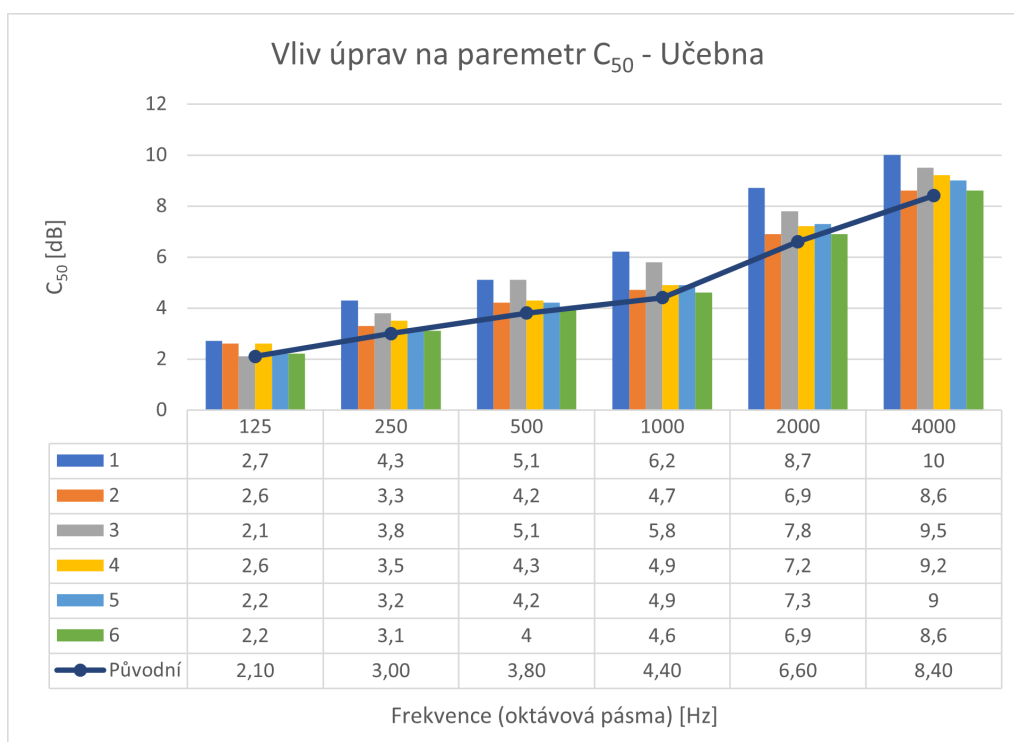
Obrázek A.24: Vliv jednotlivých úprav na parametr doby dozvuku T_{30} .



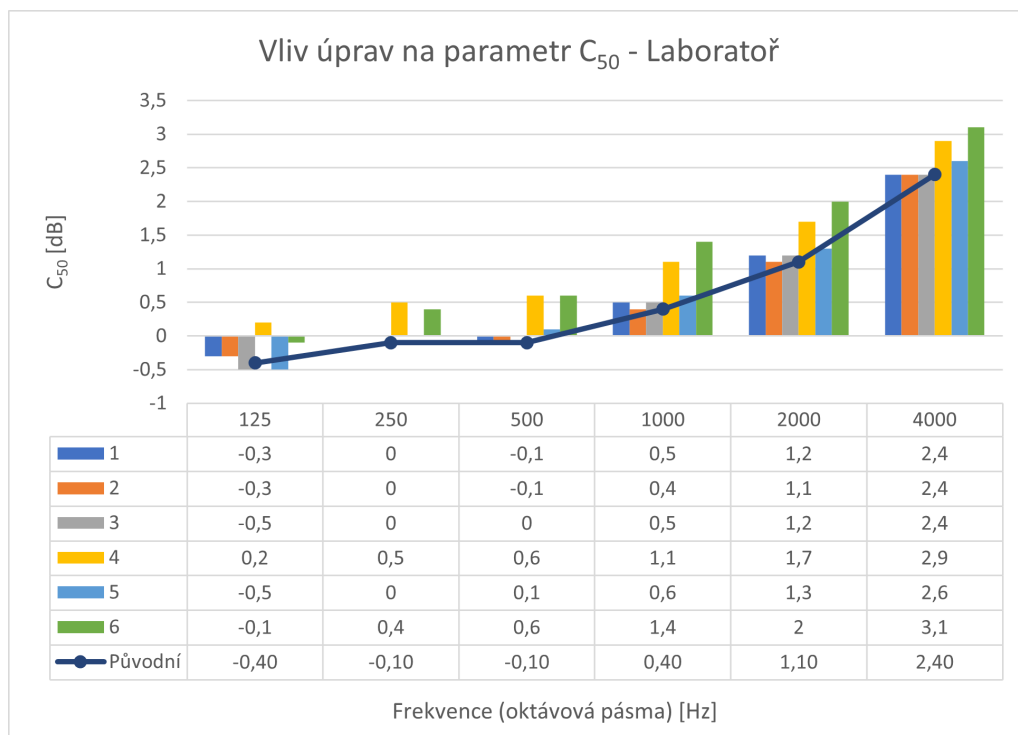
Obrázek A.25: Vliv jednotlivých úprav na parametr počáteční doba dozvuku EDT.



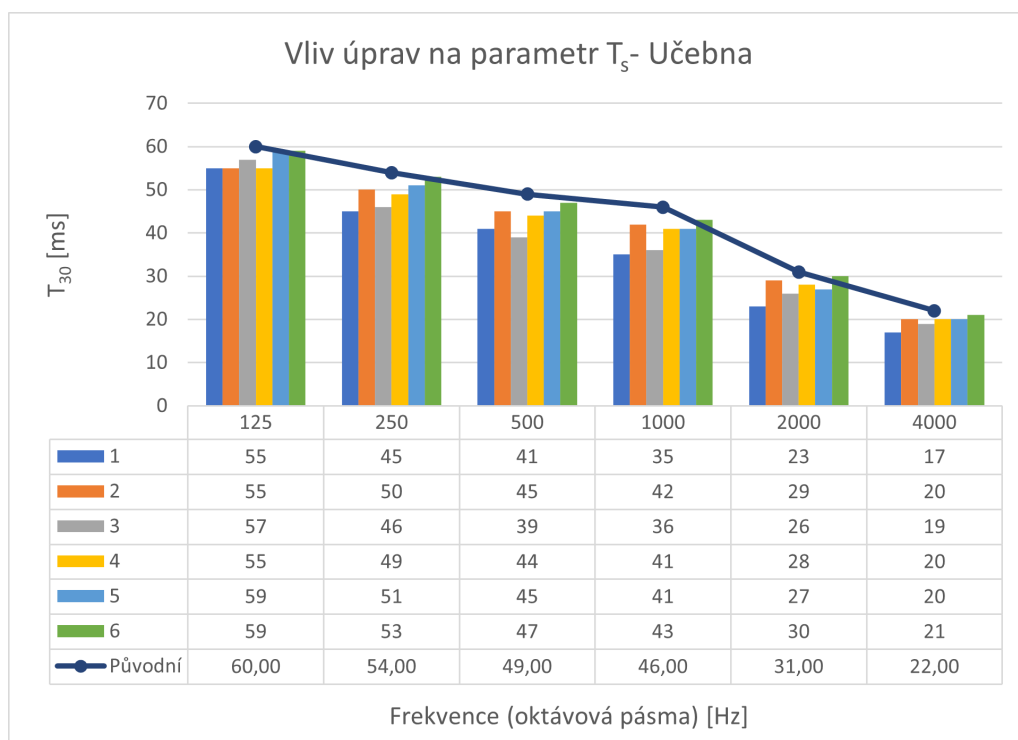
Obrázek A.26: Vliv jednotlivých úprav na parametr počáteční doba dozvuku EDT.



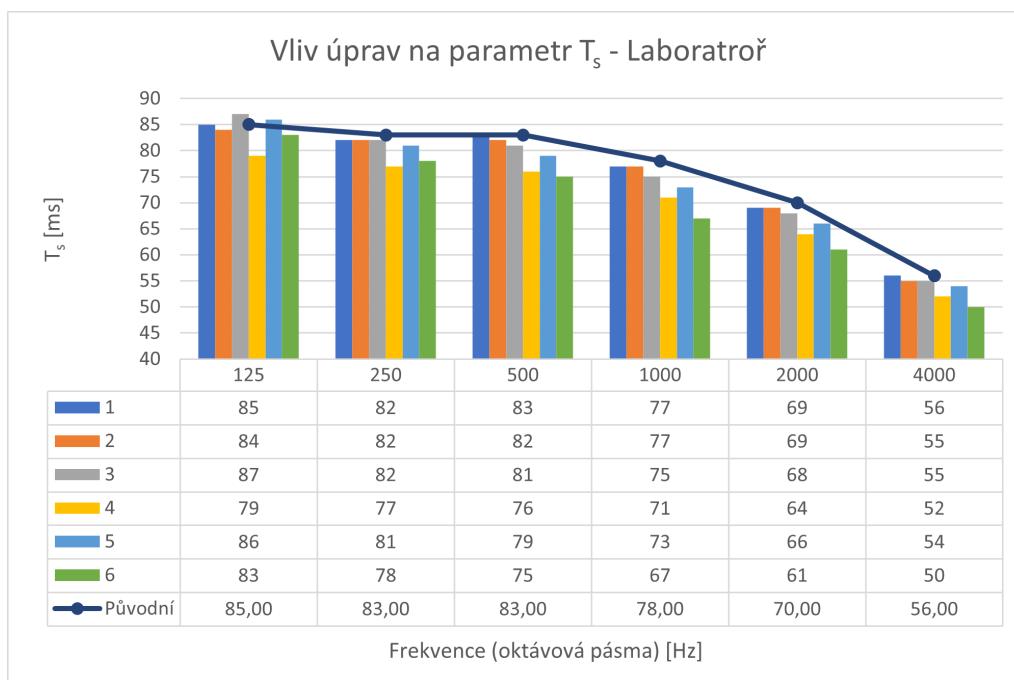
Obrázek A.27: Vliv jednotlivých úprav na parametru míra jasnosti C_{50} .



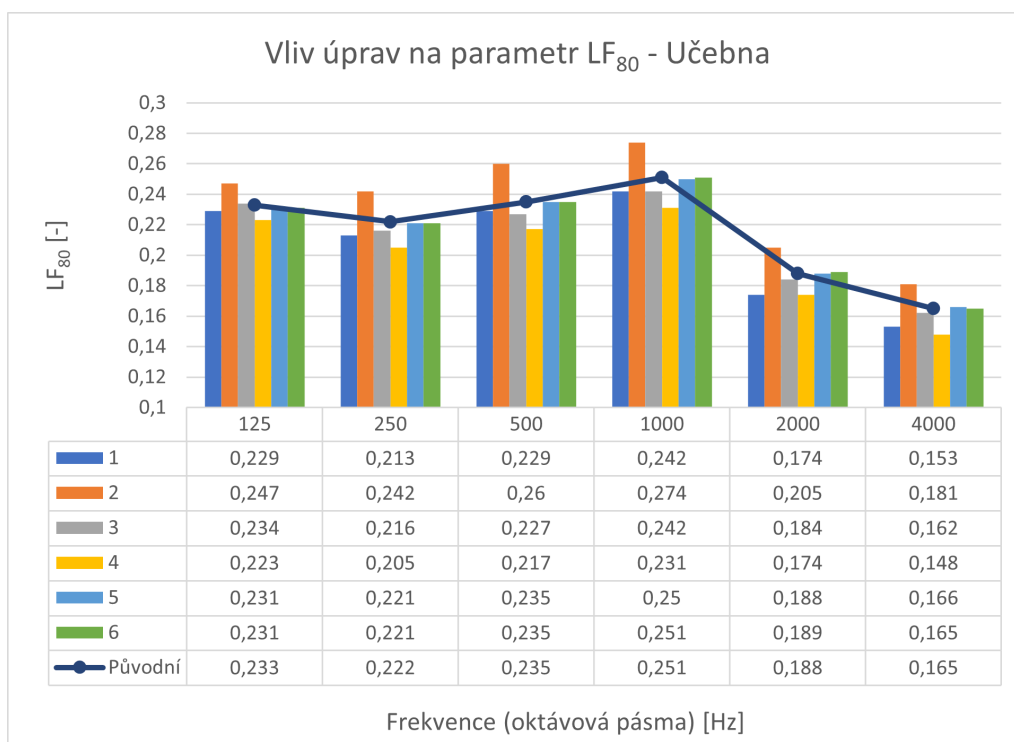
Obrázek A.28: Vliv jednotlivých úprav na parametr míra jasnosti C_{50} .



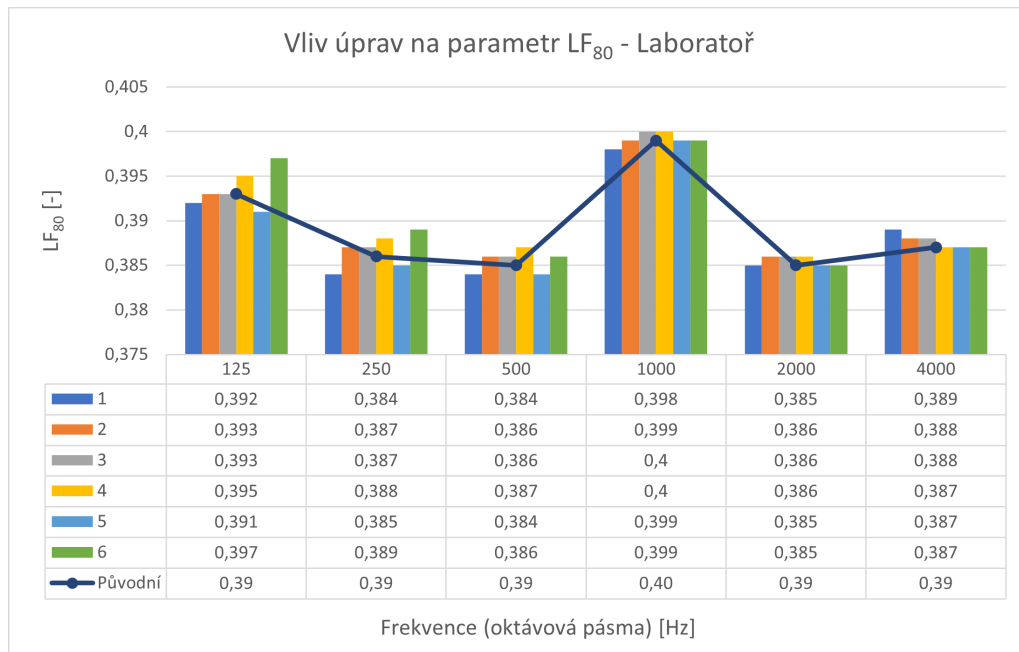
Obrázek A.29: Vliv jednotlivých úprav na parametr čas těžiště T_s .



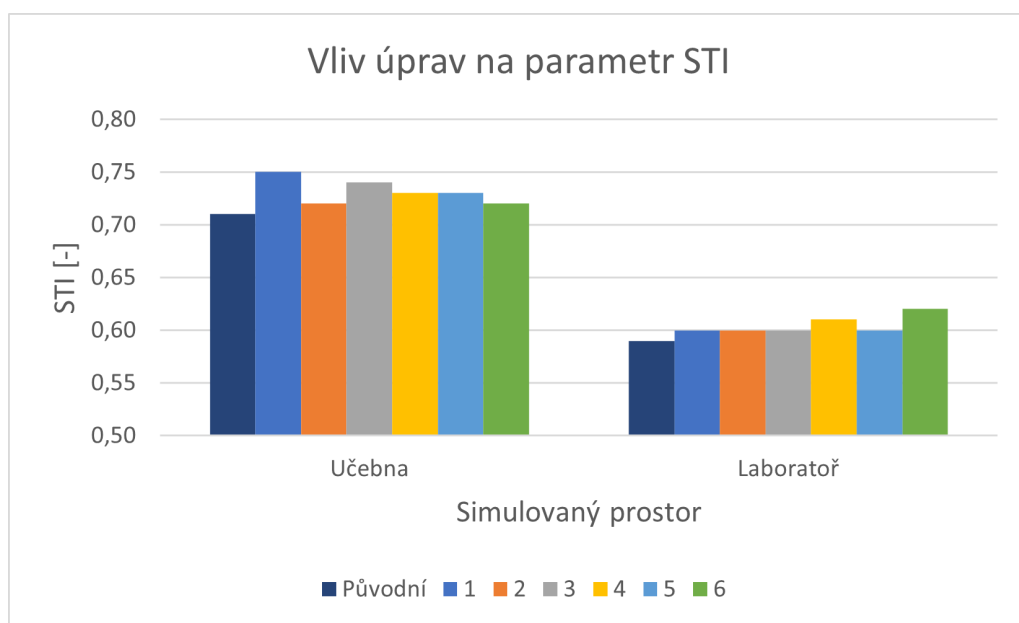
Obrázek A.30: Vliv jednotlivých úprav na parametr čas těžiště T_s .



Obrázek A.31: Vliv jednotlivých úprav na parametr míra počáteční boční energie LF_{80} .



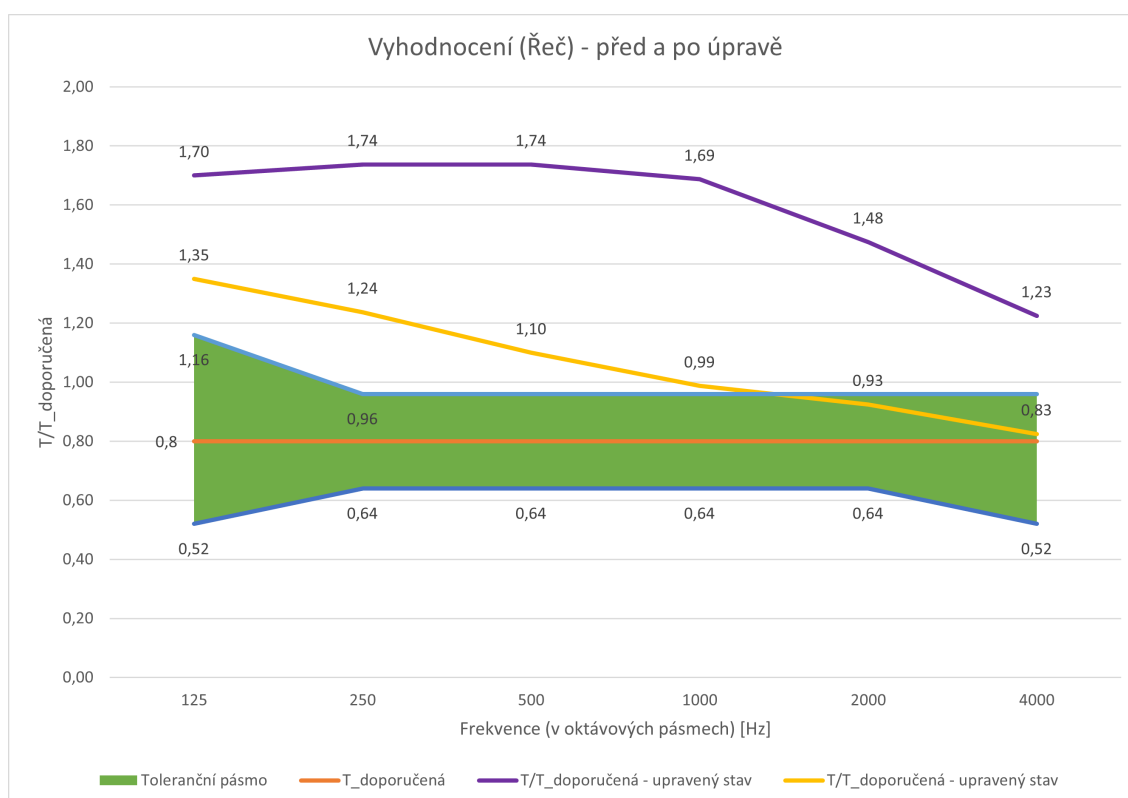
Obrázek A.32: Vliv jednotlivých úprav na parametr míra počáteční boční energie LF_{80} .



Obrázek A.33: Vliv jednotlivých úprav na parametr index přenosu řeči STI.

Vyhodnocení učebny podle DIN 18041	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	4000
T ₃₀ - před úpravou	1,36	1,39	1,39	1,35	1,18	0,98
T ₃₀ - po úpravě	1,08	0,99	0,88	0,79	0,74	0,66
T _{doporučená_min}	0,52	0,64	0,64	0,64	0,64	0,52
T _{doporučená_max}	1,16	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
T _{doporučená}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
T/T _{doporučená} - upravený stav	1,70	1,74	1,74	1,69	1,48	1,23
T/T _{doporučená} - upravený stav	1,35	1,24	1,10	0,99	0,93	0,83

Tabulka A.2: Vyhodnocení doby dozvuku T_{30} z 80% obsazené učebny před a po úpravě normou DIN 18041 pro přenos řeči



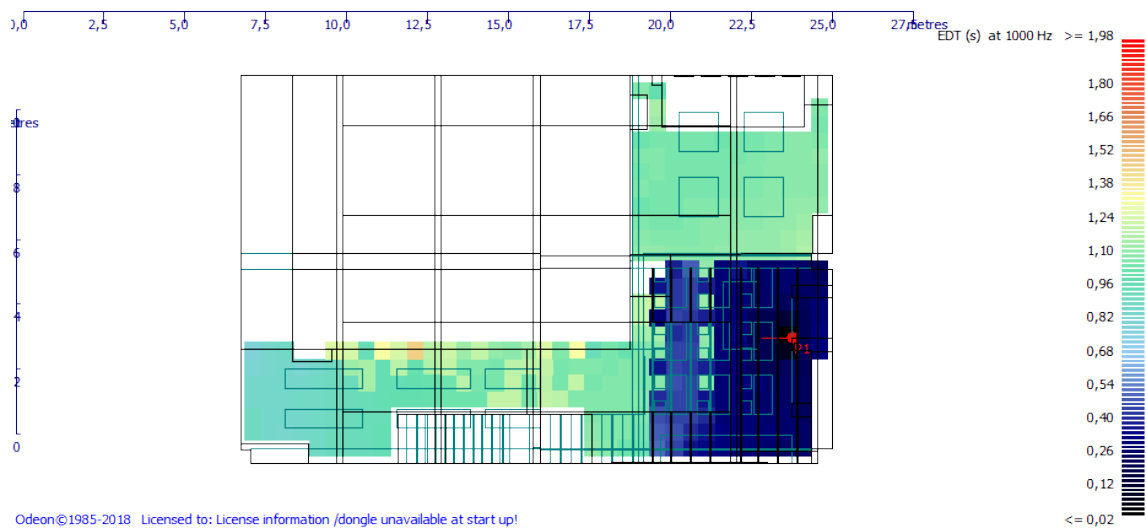
Obrázek A.34: Vyhodnocení doby dozvuku T_{30} z 80% obsazené učebny před a po úpravě normou DIN 18041 pro přenos řeči.

Prostor	Akustické parametry	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
Učebna	EDT	0,64	0,51	0,42	0,34	0,27	0,23
Laboratoř	EDT	1,11	1,00	0,92	0,83	0,77	0,69
Učebna	C ₅₀	3,50	6,00	7,70	9,40	11,40	12,80
Laboratoř	C ₅₀	0,20	1,00	1,50	2,30	2,90	3,90
Učebna	T _s	45	31	25	20	13	10
Laboratoř	T _s	76	67	62	55	51	44
Učebna	LF ₈₀	0,25	0,21	0,22	0,23	0,17	0,14
Laboratoř	LF ₈₀	0,39	0,39	0,38	0,40	0,38	0,38
Učebna	STI	0,81					
Laboratoř	STI	0,64					

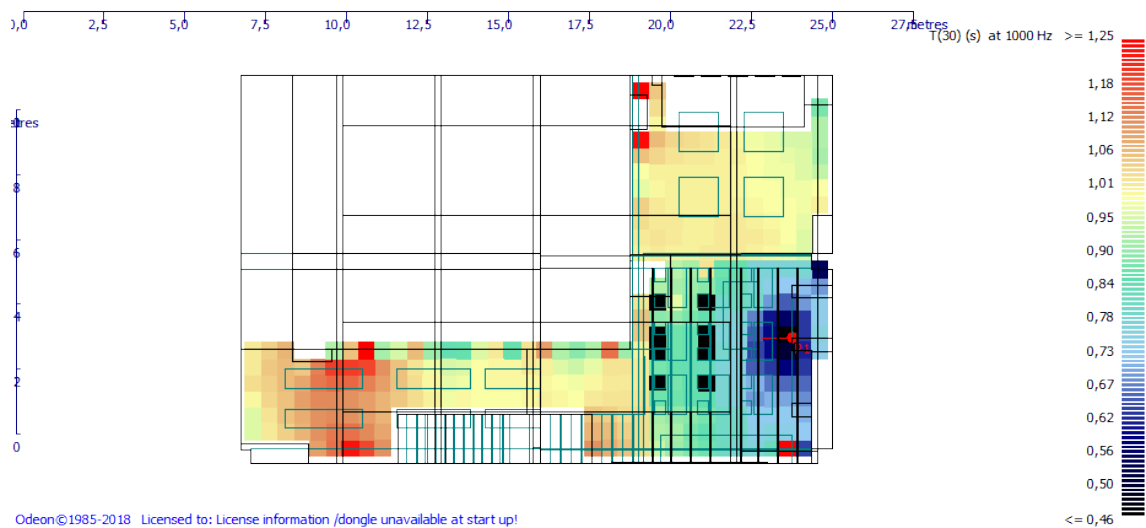
Tabulka A.3: Doplnující parametry pro upravený obsazený prostor pro simulaci učebny a laboratoře.

Parametr	Hodnota	Frekvence					
		125	250	500	1000	2000	4000
EDT	Minimum	0,53	0,40	0,35	0,28	0,02	0,01
EDT	Maximum	0,69	0,56	0,47	0,39	0,32	0,27
EDT	Průměr	0,60	0,47	0,40	0,33	0,26	0,20
T ₃₀	Minimum	0,95	0,80	0,73	0,66	0,61	0,51
T ₃₀	Maximum	1,13	1,03	0,96	0,94	0,85	0,72
T ₃₀	Average	1,04	0,94	0,86	0,82	0,74	0,63
T _s	Minimum	25	13	10	8	3	2
T _s	Maximum	49	34	27	23	16	13
T _s	Average	39	26	20	17	11	8
C ₅₀	Minimum	2,90	5,40	7,10	8,40	10,20	11,20
C ₅₀	Maximum	6,80	10,40	11,90	13,40	17,60	19,90
C ₅₀	Průměr	4,40	7,20	8,90	10,20	12,60	14,20
LF ₈₀	Minimum	0,136	0,087	0,076	0,079	0,031	0,023
LF ₈₀	Maximum	0,287	0,261	0,270	0,268	0,203	0,192
LF ₈₀	Průměr	0,225	0,189	0,179	0,188	0,125	0,107
STI	Minimum	80,00					
STI	Maximum	90,00					
STI	Průměr	83,00					
C(Curvature)	Minimum	7,10	9,10	8,60	8,60	7,50	7,60
C(Curvature)	Maximum	22,70	35,50	47,50	56,90	64,40	65,70
C(Curvature)	Průměr	13,40	18,10	21,50	26,00	24,70	26,50

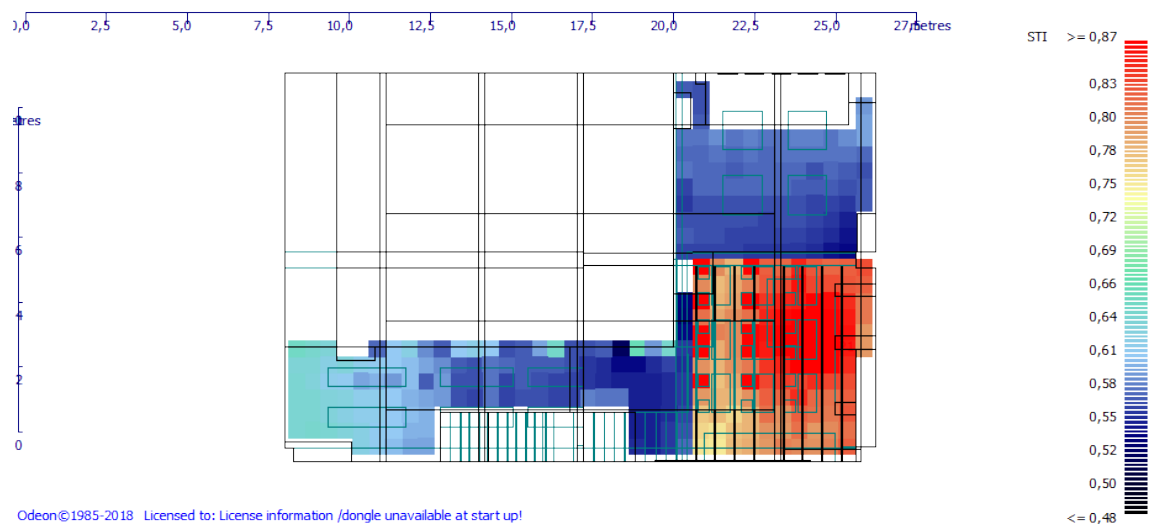
Tabulka A.4: Sledované akustické parametry pomocí pole mikrofonů pro plně obsazenou upravenou učebnu. Minimum, maximum, průměr.



Obrázek A.35: Vypočítaná počáteční doba dozvuku EDT pomocí bodové odezvy v mřížce pro upravenou učebnu.



Obrázek A.36: Vypočítaná doba dozvuku T_{30} pomocí bodové odezvy v mřížce pro upravenou učebnu.



Obrázek A.37: Vypočítaný index přenosu řeči STI pomocí bodové odezvy v mřížce pro upravenou učebnu.