

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



Bakalářská práce

Akustické modelování v systému ODEON.

Room acoustics modelling in the ODEON software.

Autor: Tomáš Gdula

Akademický rok: 2019/2020 Vedoucí práce: Ing. Marek Brothánek, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gdula** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **467086**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akustické modelování v systému ODEON

Název bakalářské práce anglicky:

Room Acoustics Modeling in the ODEON Software

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s objektivními parametry používanými v prostorové akustice. Kromě způsobu určení se soustřeďte i na jejich interpretaci. V rámci teoretické části porovnejte vlastnosti dostupných modelovacích programů a jejich základní analýzy. V prostředí ODEON pomocí programu SketchUp vytvořte grafický model prostoru FELcafé a následně proveďte jeho akustické analýzy. Do těchto analýz zahrňte různý účel daného prostoru - globální pohled kavárny, pořádání workshopu, hudební produkci apod. Zaměřte se na předpokládané umístění zdrojů zvuku a posluchačů. Do analýz zahrňte i vhodné použití ozvučovací techniky. Výsledky vyhodnoťte graficky s využitím možností vizualizace programem ODEON. Výsledky dále zhodnoťte z pohledu požadavků příslušných doporučení ČSN.

Seznam doporučené literatury:

- [1] RINDEL, Jens Holger. The use of computer modeling in room acoustics. Journal of vibroengineering, 2000, 3.4: 219-224.
- [2] KUTTRUFF, Heinrich. Room acoustics. Crc Press, 2016.
- [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, 98.6: 907-915.
- [4] ČSN 73 0527: Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely, 2005

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: **07.02.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

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

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.
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 předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat vedoucímu mé závěrečné práce, Ing. Marku Brothánkovi, Ph.D., za cenné rady, věcné připomínky a trpělivost při vedení práce. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za jejich podporu.

Abstrakt

Práce pojednává o prostorové akustice a jejím softwarovém modelování. Cílem práce je seznámit se s prostorovou akustikou, jejími parametry, způsoby určení parametrů a jejich interpretací. Dále se seznámit s metodami počítačového modelování a simulace, jako jsou ray-tracing, metoda zrcadlení zdrojů či metoda sekundárních zdrojů. A dále vytvořit model prostoru FEL Caffé v softwaru ODEON, na kterém bude provedena akustická analýza. Výsledky akustické analýzy graficky vyhodnotit s možností vizualizace a porovnat s doporučeními ČSN.

Klíčová slova

prostorová akustika, modelování, ODEON, doba dozvuku, ray-tracing, metoda zrcadlených zdrojů, metoda sekundárních zdrojů, činitel zvukové pohltivosti, akustické parametry

Abstract

This work describes room acoustics and its software modelling. Goal of this work is to become acquainted with room acoustics, its parameters, ways of measuring those parameters and their evaluation. Further become acquainted with methods of computer modelling and simulation, such as ray-tracing, beam-tracing, image source method and secondary source method. Further to create a room model of FEL Caffé within ODEON software in which is acoustics analysis going to be carried out. Evaluate results of this acoustics analysis with graphs and visualisation and compare those results with recommendations from ČSN.

Key words

room acoustics, modelling, ODEON, reverberation time, ray-tracing, image source method, secondary source method, sound absorption coefficient, acoustic parameters

Obsah

1	Úvod	1
2	Prostorová akustika	1
2.1	Metody prostorové akustiky	2
2.2	Akustické vlastnosti materiálů	3
2.3	Impulsní odezva	6
2.4	Doba dozvuku	7
2.5	Kmitočtová pásma	10
2.6	Kvalitativní parametry přenosu	11
3	Software ODEON	14
3.1	Zdroje a přijímače zvuku	14
3.2	Materiály a povrchy	15
3.3	Výpočtové algoritmy	16
3.4	Základní parametry pro výpočet	21
3.5	Vizualizace	24
4	Modelování a simulace	25
4.1	Zkoumaný prostor a jeho využití	25
4.2	Zaměření a modelování prostoru	27
4.3	Nastavení v softwaru ODEON	30
4.4	Grafické vyhodnocení akustické analýzy a vizualizace pomocí ODEONu	33
4.5	Zhodnocení výsledků podle doporučení ČSN	38
5	Závěr	42
	Použitá literatura	44
A	Přílohy	46

Seznam tabulek

1	Činitel zvukové pohltivosti pro běžné materiály v určitých kmitočtových pásmech (převzato ze software ODEON)	4
2	Činitel zvukové pohltivosti pro celé prvky v určitých kmitočtových pásmech (převzato z normy ČSN 73 0525 [18])	5
3	Vztah mezi subjektivní srozumitelností a <i>STI</i> (převzato z [12])	11
4	Doporučená minimální úroveň srozumitelnosti pro různou aplikaci prostoru podle ISO 9921:2003 [17]	12
5	Stupnice pro hodnocení míry jasnosti C_{80} (převzato z [22]) . .	12
6	Doporučené hodnoty činitele rozptylovosti (převzato z [13]) .	16
7	Ekvivalentní pohltivá plocha osob v m^2 (převzato z [4])	30
8	Činitel akustické pohltivosti obecnstva a sedadel (převzato z [4])	30
9	Činitel zvukové pohltivosti pro materiály použité při modelování (převzato ze softwaru ODEON)	33
10	Vypočtené akustické parametry pomocí bodové odezvy v místě přijímače pro případ studovny/kavárny	36
11	Vypočtené akustické parametry pomocí bodové odezvy v místě přijímače pro případ workshopu/výstavy	37
12	Přípustné rozmezí dob dozvuku T/T_0	40
13	Míra jasnosti C_{80} v případě hudební produkce	41
14	Míra zřetelnosti C_{50} pro jednotlivé případy	42
15	Čas těžiště t_s pro jednotlivé případy	42

Seznam obrázků

1	Poklesová křivka	8
2	Metoda zrcadlení zdrojů (převzato z [13])	18
3	Reflektogram (převzato z [13])	19
4	Hladina akustického tlaku v místnosti bez difrakce a s difrací (převzato z [15])	20
5	Vektorová metoda rozptylu (převzato z [13])	21
6	Poklesová křivka při nízkém počtu pozdních paprsků	22
7	Poklesová křivka při správném počtu pozdních paprsků	23
8	Hustota odrazů při nízkém počtu pozdních paprsků	23
9	Hustota odrazů při správném počtu pozdních paprsků	23
10	Grafická vizualizace návrhu FEL Caffé (převzato z [23])	25
11	Variabilita návrhu FEL Caffé (převzato z [23])	25
12	Posterová výstava v prostorách FEL Caffé (převzato z [24])	26
13	Synth Challenge v prostorách FEL Caffé (převzato z [25])	27
14	Zaměřený půdorys FEL Caffé	28
15	3D model prostoru FEL Caffé v softwaru SketchUp	28
16	Kvádr obecnstva (převzato z [26])	29
17	Plovoucí rovina (převzato z [26])	29
18	Rovina podlahy (převzato z [26])	29
19	Krabicový graf doby dozvuku T_{30} pro obsazenost 50 %	34
20	Krabicový graf doby dozvuku T_{30} pro obsazenost 0 %	34
21	Krabicový graf doby dozvuku T_{30} pro obsazenost 100 %	35
22	Doba dozvuku T_{30} analyzovaných případů obsazenosti	35
23	Regresní přímká hodnot STI jako funkce vzdálenosti	39
24	Doba dozvuku T_{30} analyzovaných případů v porovnání s do- poručenými mezemi	41

1 Úvod

Akustika je odvětví fyziky, které se zabývá zkoumáním všech mechanických vlnění v plynech, kapalinách i pevných látkách, jako jsou například vibrace, zvuk, ultrazvuk či infrazvuk.

Akustika, jakožto velmi široký obor, se dělí na množství podoborů. Těmi jsou podle [1] například fyzikální akustika, lineární fyzikální akustika, fyziologická akustika, psychoakustika, prostorová a stavební akustika a hudební akustika.

Ať si to uvědomujeme nebo ne, většinu našeho času trávíme v uzavřených prostorech, jako jsou prostory školy, práce nebo i domova. Každá místnost má své akustické parametry a ty mohou být vhodné nebo nevhodné pro určené využití daného prostoru. Tyto akustické parametry lze získat reálným měřením či počítačovou akustickou analýzou. Výhodou počítačové akustické analýzy je možnost zkoumat parametry prostor, které ještě například nebyly vystavěny. Díky tomu můžeme získat dobrou představu o akustických vlastnostech jaké prostor nabídne po vystavení. Vyhodnocením parametrů získaných z těchto měření či analýz, lze určit vhodnost prostoru pro dané využití. K vyhodnocení využíváme doporučení národních norem ČSN.

Pokud z doporučení vyjde, že prostory vhodné nejsou, je možné je akusticky upravit. Před tím než se akustické úpravy provedou, je žádoucí namodelovat a analyzovat, jak akustické úpravy ovlivní daný prostor. Pomocí akustických analýz tak lze určit například nejjednodušší či nejekonomičtější řešení.

2 Prostorová akustika

Prostorová akustika je vědní obor zkoumající šíření zvuku v obecném prostoru. Akustika se zabývá zvukovým vlněním od jeho vzniku, šíření a přenosu prostorem, až po jeho vnímání sluchovým orgánem.

Jejím cílem je sledování akustických parametrů a jejich optimalizace pro využití daného prostoru. Těmito prostory jsou například divadelní sály, kina, posluchárny, sportovní haly a další místa, kde vyžadujeme vysokou kvalitu přenosu zvuku. Prostorová akustika se však zabývá i prostory, kde je potřeba snížit úroveň hluku a zároveň zlepšit přenos hlášeného slova, jako například ve výrobních, nádražních či letištních halách.

2.1 Metody prostorové akustiky

Prostorová akustika využívá tří metod pro zkoumání zvukového pole v uzavřených prostorech. Těmito metodami jsou vlnová, statistická a geometrická akustika.

Geometrická akustika

Geometrická akustika je metoda zabývající se šířením zvukových vln jako paprsků, podél kterých se šíří akustická energie. Tato metoda je velmi podobná zkoumání geometrické optiky a jejích paprsků. Geometrickou akustiku lze využít v limitním případě velmi malých vlnových délek v porovnání s rozměry zkoumaného prostoru. Hlavním úkolem geometrické akustiky je určit trajektorii zvukového paprsku. Díky podobnosti s geometrickou optikou můžeme využít stejné zákony. Platí tedy, že dopadající paprsek se odráží podle zákona odrazu, kde platí, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Při splnění předpokladu geometrické akustiky, tedy předpokladu, že rozměry objektů jsou mnohem větší než vlnové délky zvukových vln, můžeme zanedbat difrakci na dopadající ploše. Pak lze považovat paprsek za přímku a zkoumat jeho odraz na rovinných plochách či zakřivených plochách, jak je uvedeno v [2]. Metody výpočtu a modelování pomocí geometrické akustiky jsou dále rozebrány v kapitole 3.3 Výpočtové algoritmy, jelikož jsou základem použitého modelovacího softwaru.

Vlnová akustika

Vlnová akustika se věnuje hledání řešení vlnové rovnice a jejím okrajovým podmínkám. Po zavedení počátečních a okrajových podmínek charakterizujících zkoumaný prostor, je podle [3] možné najít řešení zvukového pole uzavřeného prostoru. V případě řešení vlnové rovnice pro prostor tvaru kvádru s tuhými stěnami může vzniknout stojaté vlnění. V takovém případě se v prostoru objevují vlastní kmity prostoru, tedy kmitny a uzly, které deformují akustické pole. Vlastní kmity mají vliv na frekvenční odezvu prostoru. Cílem je, aby byla frekvenční odezva pro všechny frekvence stejná. Prostor pak lze považovat za frekvenčně vyrovnaný a vhodný pro reprodukci zvuku. Je tedy nutné najít tyto vlastní frekvence f , pro které platí

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (2.1)$$

kde c je rychlost šíření zvuku, n_x, n_y, n_z jsou čísla módů a l_x, l_y, l_z jsou rozměry prostoru. Pro dobrý přenos zvuku je důležitá dostatečná hustota módů.

Ta se určí pomocí vzorce

$$\frac{dN}{df} = \frac{4\pi V f^2}{c^3} + \frac{\pi S f}{2c^2} + \frac{L}{8c}, \quad (2.2)$$

kde N je počet vlastních kmitů prostoru, V je objem prostoru, S je celkový povrch stěn a $L = 4(l_x + l_y + l_z)$ je součet všech hran prostoru.

V reálných prostorech je velmi obtížné definovat okrajové podmínky vlnové rovnice a navíc je její řešení výpočetně náročné. Analytické řešení vlnové rovnice lze nalézt pro zjednodušené případy. Řešení pro ostatní případy se hledá pomocí numerických metod, jako jsou metody konečných prvků (FEM) či metody hraničních prvků (BEM).

Statistická akustika

1. Ve všech místech uzavřeného prostoru je objemová hustota zvukové energie konstantní.
2. Velikost zvukové energie libovolného bodu je určena součtem středních hodnot, které do zvoleného bodu dospěly díky odrazům od stěn.
3. Úhly dopadu zvukových vln do libovolného bodu mají rovnoměrné pravděpodobnostní zastoupení.

Statistická akustika vychází z energetické bilance dodávané zvukové energie a energie pohlcené stěnami. Energie pohlcená stěnami je dána hustotou dopadající energie, povrchem stěn a akustickými vlastnostmi povrchů.

2.2 Akustické vlastnosti materiálů

Při zkoumání prostorové akustiky jsou jedním z velmi důležitých parametrů vlastnosti materiálů uzavřeného prostoru. Při šíření zvuku v uzavřeném prostoru dochází k odrazům a útlumu akustické energie při dopadu na stěny, podlahy a strop. Díky těmto vlastnostem dojde ke změnám v hladině akustického tlaku v porovnání se šířením zvuku volným prostorem. Velmi důležitým parametrem je pohltivost (*absorpce*) povrchů, která vysokou měrou přispívá k útlumu hladiny akustického tlaku šířeného zvuku.

Zvukové vlnění o akustickém výkonu P_0 při dopadu na překážku část svého výkonu P_r odrazí a část P_a překážka pohltí. Musí zde platit

$$P_0 = P_r + P_a. \quad (2.3)$$

Část akustického výkonu, který překážka pohltí, se dále dělí na akustický výkon P_i , který se v překážce ztratí a akustický výkon P_t , který překážkou prostoupí a je vyzářen do dalšího prostoru.

Činitel zvukové odrazivosti je definován vztahem $\rho = \frac{P_r}{P_0}$. Pro činitel zvukové pohltivosti platí $\alpha = \frac{P_a}{P_0}$ a činitel zvukové průzvučnosti je definován jako $\tau = \frac{P_t}{P_0}$. Každý z těchto činitelů je bezrozměrným číslem a nabývá hodnot mezi jedničkou a nulou. Činitel zvukové průzvučnosti je důležitým parametrem stavební akustiky, zejména v případě řešení neprůzvučnosti prostor.

Z těchto činitelů je u modelování nejdůležitějším činitel akustické pohltivosti, jež se využívá při výpočtech dalších akustických parametrů, jako jsou například doba dozvuku. Činitel akustické pohltivosti nabývá hodnot 0 až 1. Pro totálně odrazivý akustický materiál je $\alpha = 0$. Příkladem velmi odrazivého akustického materiálu jsou holé betonové zdi, které nabývají hodnot akustické pohltivosti v řádu setin. V opačném případě, pro $\alpha = 1$, lze materiál považovat za naprosto pohltivý. Velmi často je, ne zcela pravdivě, uváděn příklad otevřeného okna, neboť na jeho okrajích bude docházet k difrakci zvuku, tedy nebude vykazovat naprosto pohltivé vlastnosti.

V následující tabulce 1 jsou k nalezení hodnoty činitele pohltivosti pro běžně využívané materiály. Z tabulky zároveň vyplývá, že činitel zvukové pohltivosti je kmitočtově závislý, je tedy nutné ho uvádět pro více kmitočtových pásem.

Tabulka 1: Činitel zvukové pohltivosti pro běžné materiály v určitých kmitočtových pásmech (převzato ze software ODEON)

Materiál	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Zátěžový koberec na plsti	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73
Natřená omítka	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Linoleum na betonu	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Okenní otvor zasklený	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Podlahové parkety	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10
Velurové závěsy zátěžové	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65

Činitel akustické pohltivosti neurčujeme pouze pro materiály, ale také pro celé prvky. Těmi mohou být například posluchači stojící či sedící v křeslech. Při výpočtech a simulacích pak tyto prvky využíváme.

Měření činitele akustické pohltivosti lze provést několika způsoby. Jedním z nich je měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti dle normy ČSN EN ISO 354 (730535). Tato norma určuje metodu měření akustických vlastností materiálů používaných pro úpravu stěn a stropů, a také určuje metodu zjištění ekvivalentní pohltivé plochy objektů, jako nábytku, osob nebo

Tabulka 2: Činitel zvukové pohltivosti pro celé prvky v určitých kmitočtových pásmech (převzato z normy ČSN 73 0525 [18])

Prvek	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Publikum na čalouněných křeslech	0,55	0,68	0,83	0,87	0,90	0,87
Čalouněná křesla bez publika	0,44	0,56	0,67	0,74	0,83	0,87

akustických těles. Dopad akustických vln je v takovém případě všesměrový a činitel akustické pohltivosti se určí z rozdílu dob dozvuku prázdné komory a komory obložené materiálem.

Další možností je určení činitele zvukové pohltivosti měřením v impedančních trubcích, buď metodou poměru stojaté vlny (norma ČSN ISO 10534-1), nebo metodou přenosové funkce (norma ČSN ISO 10534-2). Výhodou těchto metod je nenáročnost na velikost měřeného vzorku.

Metoda poměru stojaté vlny vychází z vyhodnocení pole stojaté rovinné vlny v Kundtově trubici, které je vyvoláno superpozicí sinusové rovinné vlny dopadající na zkušební vzorek materiálu a rovinné vlny odrážející se od něho. Tato metoda se používá pro kolmý dopad zvuku.

U metody přenosové funkce se využívá dvou míst mikrofonů, kdy na jedné straně trubice je umístěn měřený vzorek a na opačné reproduktor napájený generátorem signálu. Za použití digitálního systému kmitočtové analýzy se určí činitel akustické pohltivosti opět při kolmém dopadu zvuku.

V běžném případě nedopadá zvuková vlna pouze kolmo na dopadající plochu. Intenzitu akustické vlny lze rozdělit na normálovou a tečnou složku k dopadající ploše. Velikost absorpce normálové složky akustické intenzity je závislá na hodnotě činitele akustické pohltivosti.

V prostoru je vyžadováno dostatečně velké množství odrazů zvukových vln pro přenos akustické energie k posluchači bez způsobení ozvěny. Toho lze docílit využitím materiálů s vysokou difuzitou, tedy schopností rozptylovat zvukové vlny. Rozptylové vlastnosti materiálů se řadí mezi další důležité akustické parametry a popisují se pomocí činitele rozptylovosti. Činitel rozptylovosti s udává množství odražené energie mimo přímý odraz a určí se podle vztahu

$$s = \frac{\alpha_s - \alpha}{1 - \alpha}, \quad (2.4)$$

kde α_s je činitel akustické pohltivosti pro přímý dopad a α je činitel akustické pohltivosti pro všesměrový dopad. Přesný způsob měření činitele rozptylovosti je popsán v normě ČSN ISO 17497-2 (73 0533).

V případech, kdy je potřebná vysoká difuzita, se využívá speciálně navr-

žených difuzorů. Difuzory obsahují periodické struktury geometrických prvků a podle [11] jich existuje spousta druhů, jako například difuzor typu QRD, difuzor typu PRD. Dalšími mohou být fraktálové prvky či 2D prvky.

2.3 Impulsní odezva

Ideální impulsní odezva je výstupní signál lineární časově invariantní soustavy, na jejíž vstup přivedeme Diracův impuls. Pomocí impulsní odezvy tak můžeme získat celkový popis soustavy. Po přivedení libovolného signálu na vstup se získá výstupní signál jeho konvolucí s impulsní odezvou. Pokud si tedy reálný uzavřený prostor představíme jako soustavu a budeme ji považovat za lineární časově invariantní, pak se za použití Diracova impulsu získá celkový popis zkoumaného prostoru.

Problémem v realitě je, že nejsme schopni realizovat Diracův impuls, neboť je to nekonečně úzký impuls. Ve skutečnosti je snaha vytvořit v časové oblasti signál podobný Diracovu impulsu, tedy velmi krátký zvuk s dostatečně velkou energií. Tímto signálem může být například tlesknutí, prasknutí balonu či výstřel startovací pistole. V dnešní době se ale častěji využívá jiných metod. Těmi mohou být metoda Maximum length sequence (MLS), metoda přeladovaného sinu či metoda Time stretched pulse (TSP).

Metoda MLS

Další možností měření impulsní odezvy je využití metody Maximum length sequence. Tato metoda využívá pseudonáhodný binární signál složený z hodnot 1 a -1 . Signál je periodický s periodou

$$P = 2^N - 1, \quad (2.5)$$

kde N je řád MLS a má plochou frekvenční odezvu. Autokorelační funkce má vlastnosti podobné Diracovu impulsu. MLS má mnohem lepší odstup signál-šum oproti měření pomocí reálného signálu. Délka periody MLS impulsu omezuje její využití, kdy je možné měřit pouze impulsovou odezvu kratší než je jedna perioda impulsu MLS. Jak je uvedeno v [6], tak nevýhodou tohoto měření je náchylnost na nelineární zkreslení při reprodukci signálu přes reproduktory. Detailní popis měření impulsní odezvy pomocí metody MLS je možno nalézt např. v [7].

Metoda přeladovaného sinu

Metoda přeladovaného sinu je dalším způsobem měření impulsní odezvy. Využívá se buzení přeladovaným sinem, tzv. swept sine signálem. K měření

lze využít dva druhy přeladovaného sinu. Lineární přeladovaný signál (*linear sweep*), který má frekvenční energetický rozklad obdobný bílému šumu, nebo exponenciální přeladovaný signál (*exponential sweep*), který má frekvenční energetický rozklad ekvivalentní růžovému šumu, jak je uvedeno v [13]. Pro většinu akustických měření je vhodnější signál se spektrem růžového šumu, který poskytuje delší čas přehrávání na nižších frekvencích a tedy vyšší energii v této škále. Oproti tomu má lineární přeladovaný signál delší čas přehrávání na středních a vyšších frekvencích. Lineární sweep se využívá v případě měření průzvučnosti mezi místnostmi, protože překážky více utlumují vyšší frekvence. Metodu přeladovaného sinu využívá ve svých výpočtech impulsní odezvy software ODEON.

Metoda TSP

Impulsní odezvu lze také měřit pomocí TSP (Time stretched pulse) neboli pulsu roztaženého v čase. Metoda TSP je založená na filtraci Diracova impulsu, která rozloží energii Diracova impulsu v čase v závislosti na kmitočtu. Tento signál je poté použit jako vstupní signál do soustavy a je zaznamenána odezva, která je zpětně filtrována inverzním filtrem, a tím je získána impulsní odezva. Detailní popis metody TSP a její implementace je k nalezení v [8].

Poklesová křivka

Poklesová křivka ukazuje, jak v čase klesá energie zvuku po vypnutí zdroje šumu a je odvozena od impulsní odezvy, která obsahuje veškeré informace o odrazech a pohltivosti v určitém místě přijímače. Manfred Schroeder zavedl její definici ve své práci [9] pomocí vzorce

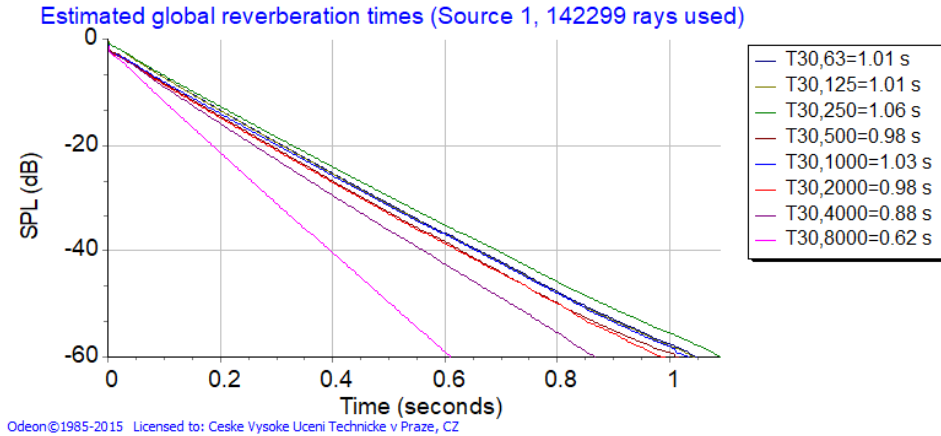
$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau, \quad (2.6)$$

kde $h(t)$ je impulsní odezva prostoru.

Její výpočet probíhá na osmi kmitočtových pásmech, tedy od 63 Hz do 8000 Hz. Na obrázku 1 je názorně ukázána poklesová křivka pro osm kmitočtových pásem.

2.4 Doba dozvuku

Doba dozvuku je klíčovým parametrem prostorové akustiky zejména pro srozumitelnost a kvalitu poslechu v daném prostoru. Vychází ze statistické akustiky a je definována jako čas, za který v místnosti s ustáleným zvukovým polem klesne hladina akustického tlaku po vypnutí zdroje o 60 dB, tj. na



Obrázek 1: Poklesová křivka

10^{-6} původní hodnoty. K poklesu dochází zejména kvůli útlumu danému pohltivostí určeného prostoru. Typické hodnoty doby dozvuku jsou podle [4] od 0,3 s pro obývací pokoj až po 10 s pro velké chrámy.

Pohltivost je kmitočtově závislá, tedy i doba dozvuku je závislá frekvenčně. Z tohoto důvodu se při výpočtech uvádí pro určitá kmitočtová pásma, např. 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz a 4000 Hz.

Doba dozvuku podle Sabina

Pro výpočet odhadu doby dozvuku je nejznámější vzorec podle amerického fyzika Wallace C. Sabina, který odvodil následující vzorec

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{S\alpha}, \quad (2.7)$$

kde V je celkový objem místnosti (m^3), S je celková plocha všech povrchů (m^2) a α je střední koeficient pohltivosti (-).

Pokud jsou koeficienty pohltivosti jednotlivých povrchů odlišné, střední koeficient pohltivosti vypočteme pomocí vzorce

$$\alpha = \sum_i \frac{\alpha_i \cdot S_i}{S}, \quad (2.8)$$

kde α_i jsou koeficienty pohltivosti jednotlivých povrchů (-), S_i jsou plochy jednotlivých povrchů (m^2) a S je celková plocha všech povrchů. (m^2).

Sabinův vztah má však nechtěné limitace, které omezují využití tohoto vzorce. Pro okrajové podmínky jsou problémy zřejmé. Pro $\bar{\alpha} = 0$, tedy

všechna energie se odráží, by se měla doba dozvuku rovnat nekonečnu, což ale není možné kvůli ztrátám při samotném šíření. Pokud je $\bar{\alpha} = 1$, doba dozvuku podle vzorce vyjde nenulová, i když by se nule rovnat měla.

Doba dozvuku podle Eyringa

Sabine ve svém vztahu uvažoval spojitý pokles hustoty zvukové energie, který pro velké hodnoty koeficientu pohltivosti není vhodnou aproximací. Hustota zvukové energie se pak mění skokově, což do svých výpočtů zahrnul Eyring a odvodil tak vztah

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)}. \quad (2.9)$$

Pro tento vzorec již platí, že pro $\alpha = 1$ vyjde doba dozvuku nulová, a Eyringův vzorec tak vyhovuje pro velké hodnoty koeficientu pohltivosti.

Pro koeficienty doby dozvuku α blíží se k nule se projeví i závislost doby dozvuku na prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Útlum prostředí se zahrne do vzorců dle [1] pomocí korekčního členu $4mV$, kde m je činitel útlumu zvuku nabývající hodnot od 0,001 do 0,06.

$$T_S = 0,164 \cdot \frac{V}{S\alpha + 4mV}, \quad (2.10)$$

$$T_E = 0,164 \cdot \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha) + 4mV}, \quad (2.11)$$

Doby dozvuku s nižším poklesem

V reálném prostředí je však velmi obtížné vybudit zvukové pole pro dosažení poklesu o 60 dB, aby se dosáhlo dostatečného odstupu signál-šum. Z tohoto důvodu existují další způsoby měření, kterých se využívá.

Měřit lze dobu dozvuku T_{30} , což je doba dozvuku počítaná z poklesu o 30 dB (pokles z -5 dB na -35 dB), případně T_{20} z poklesu o 20 dB (pokles z -5 dB na -25 dB). Výpočet doby dozvuku je poté dán jako

$$T_{30} = 2\Delta t_{30\text{dB}}, \quad (2.12)$$

pro pokles o 30 dB, respektive jako

$$T_{20} = 3\Delta t_{20\text{dB}}, \quad (2.13)$$

pro pokles o 20 dB. Podle normy ČSN EN ISO 3382-1 [20] je pro měření doby dozvuku T_{30} požadovaný minimální odstup hluku pozadí od signálu 45 dB, resp. pro T_{20} 35 dB.

Počáteční doba dozvuku EDT (Early decay time) se počítá z doby poklesu z 0 dB na -10 dB. Během přehrávání hudby nebo řeči jsou prvotní a slabší části odrazu zamaskovány následující částí přenášeného zvuku. Parametr EDT díky tomu přesněji odpovídá subjektivnímu vnímání dozvuku prostoru a zároveň je vhodným identifikátorem míry zřetelnosti C_{50} , jelikož brzké odrazy, které se k posluchači dostanou do 50 ms, bude lidské ucho vnímat jakou součást samotného zvuku, nikoliv jako ozvěnu, jak zmiňuje Haasův efekt.

Podrobnější popis využití těchto parametrů při výpočtech u modelování je popsán v kapitole 3.3 Výpočtové algoritmy.

2.5 Kmitočtová pásma

Využití kmitočtových pásem je v akustice naprosto nezbytné, neboť akustické veličiny jsou kmitočtově závislé. Měření frekvenčních spekter s malým měřicím krokem by bylo příliš náročné. Z tohoto důvodu se zavedla oktávová, resp. třetinooktávová pásma, díky kterým dojde ke snížení náročnosti výpočtů bez velké změny v přesnosti spekter.

Mezi středními kmitočty navazujících oktávových pásem platí rovnice

$$f_{c2} = 2f_{c1}, \quad (2.14)$$

tedy střední kmitočet vyššího oktávového pásma f_{c2} je dvojnásobný oproti střední frekvenci oktávového pásma f_{c1} . Zároveň platí, že dolní mezní kmitočet f_d oktávového pásma se středním kmitočtem f_c je určen jako

$$f_d = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \quad (2.15)$$

a horní mezní kmitočet f_h je definován jako

$$f_h = f_c\sqrt{2}. \quad (2.16)$$

Pro podrobnější popis frekvenčně závislých parametrů lze využít filtraci pomocí třetinooktávových pásem. Ta vzniknou rozdělením oktávových pásem na třetiny v logaritmických souřadnicích a platí poté, že poměr mezních kmitočtů libovolné třetiny oktávy je konstantní. Mezi středním kmitočtem nižšího třetinooktávového pásma f_{c2} a středním kmitočtem následujícího vyššího třetinooktávového pásma f_{c1} platí vztah

$$f_{c2} = \sqrt[3]{2}f_{c1}. \quad (2.17)$$

Dolní mezní kmitočet f_d třetinooktávového pásma se středním kmitočtem f_c je dán následovně

$$f_d = \frac{f_c}{\sqrt[6]{2}} \quad (2.18)$$

a horní mezní kmitočet f_h je určen podle

$$f_h = f_c \sqrt[6]{2}. \quad (2.19)$$

Střední kmitočty f_c jednotlivých oktávových i třetinooktávových pásem vychází ze základní frekvence 1 kHz.

2.6 Kvalitativní parametry přenosu

STI (Speech Transmission Index) neboli index srozumitelnosti je objektivní jednotkou kvality přenosu zvuku. *STI* nabývá hodnot od nuly do jedné a udává, jak přenosový kanál zhorší kvalitu přenášeného zvuku. Pro index srozumitelnosti rovný jedné, by přenos nebyl nijak ovlivněn a zůstal by tedy naprosto srozumitelný. Čím více se však hodnota blíží k nule, tím více zvukové informace je při přenosu ztraceno. Tabulka 3 ukazuje standardizovaný převod objektivního *STI* na subjektivní vnímání srozumitelnosti.

Tabulka 3: Vztah mezi subjektivní srozumitelností a *STI* (převzato z [12])

Srozumitelnost	<i>STI</i>
Vynikající	>0,75
Dobrá	0,60 až 0,75
Dostačující	0,45 až 0,60
Nedostačující	0,30 až 0,45
Špatná	<0,30

Vynikající srozumitelnost však není v prostorové akustice běžný cíl. Ve velkých a relativně hlučných místech je realistickým cílem dosažení dostačující srozumitelnosti. Při návrhu či simulaci prostoru se lze řídit tabulkou 4 minimální doporučené úrovně srozumitelnosti podle standardu ISO 9921:2003 [17].

Parametr *STI* má široké spektrum využití. Využívá se zejména v prostorové akustice na hodnocení srozumitelnosti sálů, chrámů či konferenčních místností. Další využití *STI* je například i u telekomunikačních kanálů či radiového přenosu pro určení kvality přenosu.

Pro určení kvality přenosu se také využívá parametrů vycházejících z energetických poměrů signálů a časových úseků průběhů z impulsní odezvy.

Tabulka 4: Doporučená minimální úroveň srozumitelnosti pro různou aplikaci prostoru podle ISO 9921:2003 [17]

Aplikace	Minimální úroveň srozumitelnosti	Maximální hlasová snaha
Komunikace osoba-osoba (delší běžná komunikace)	Dobrá	Normální
Komunikace osoba-osoba (kritická)	Dostačující	Hlasitá
Veřejná adresace ve veřejných prostorách	Dostačující	Normální
Upozornění a varování (správné porozumění kritických slov)	Dostačující	Hlasitá
Upozornění a varování (správné porozumění jednoduchých vět)	Nedostačující	Hlasitá

Míra jasnosti C_{80} udává schopnost rozlišit každé jednotlivé tóny v rychlých hudebních pasážích. Je definována jako

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \lg \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}}, \quad (2.20)$$

kde p je akustický tlak, a podle normy ČSN 73 0525 [18] je optimální hodnota $C_{80} = 1 \pm 2$ dB. Rozsah přípustných hodnot se však liší podle interpretované hudby a je uveden v následující tabulce 5.

Tabulka 5: Stupnice pro hodnocení míry jasnosti C_{80} (převzato z [22])

Rozsah přípustných hodnot [dB]	Hudební žánr
0 ± 2	Varhanní hudba, dechové nástroje, obecně pomalejší tempa
2 ± 2	Instrumentální hudba, smyčcové nástroje, pěvecké sbory
4 ± 2	Folková a populární hudba, trsací nástroje, obecně rychlejší tempa
6 ± 2	Moderní rocková a populární hudba, perkusní nástroje

Míra zřetelnosti C_{50} udává srozumitelnost řeči a je definována jako

$$C_{50} = 10 \lg \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \lg \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}. \quad (2.21)$$

Pro míru zřetelnosti norma ČSN 73 0525 [18] uvádí hodnoty větší než 0 dB za přijatelnou srozumitelnost. Prostory s nižší hodnotou míry zřetelnosti jsou označeny jako nevhodné pro přednes.

Zřetelnost D_{50} je obdobnou hodnotou k míře zřetelnosti C_{50} . Udává kvalitu poslechu řeči a definuje se jako

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}}. \quad (2.22)$$

Čas těžiště kvadrátu impulsní odezvy

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{E_{\infty}} \quad (2.23)$$

má podobné využití jako míra jasnosti C_{80} , ale vypovídá nejen o jasnosti, ale také o prostorovém vnímání hudby a mluveného slova. Ideální hodnoty času těžiště t_s pro koncertní sály se pohybují v rozmezí 120 ms až 140 ms dle normy ČSN 73 0525 [18]. Pokud čas těžiště dosahuje hodnot vyšších, pak je ukazatelem špatné míry jasnosti.

Míra přímého zvuku C_7 se používá k odhadu síly a lokalizaci přímého zvuku zdroje a je definována jako poměr energie zvuku přicházejícího do 7 ms k energii od 7 ms, tedy pomocí rovnice

$$C_7 = 10 \lg \frac{\int_0^{7\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{7\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \lg \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7}. \quad (2.24)$$

Přípustné hodnoty pro dobrou lokalizaci jsou pro hodnoty nad -15 dB.

LF_{80} neboli míra boční energie je hodnota závislá zejména na tvaru prostoru a odrazivosti ploch. Určuje prostorovost dopadajícího zvuku a je definována jako

$$LF_{80} = \frac{\sum_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} E_t \cos^2(\beta_t)}{E_{\infty}}, \quad (2.25)$$

kde β_t je úhel mezi směrem dopadu akustické vlny a osou přijímače.

Basový poměr BR společně s poměrem vysokých kmitočtů HFR udávají vyváženost znění hudby v sále. Basový poměr je definován jako

$$BR = \frac{T^{125} + T^{250}}{T^{500} + T^{1000}} \quad (2.26)$$

, poměr vysokých kmitočtů má tvar

$$HFR = \frac{T^{2000} + T^{4000}}{T^{500} + T^{1000}}, \quad (2.27)$$

kde T^{125} je doba dozvuku pro oktávové pásmo se středním kmitočtem 125 Hz, obdobně pak pro ostatní doby dozvuku. Optimální hodnota obou poměrů nabývá hodnot větších než 1.

Hladina akustického tlaku SPL souvisí nejen s výkonem zdroje, ale i s dobou dozvuku. Pokud je v místnosti kratší doba dozvuku, lze dosáhnout snížení celkové hladiny akustického tlaku. Toto snížení hladiny akustického tlaku tak může ovlivnit příjemnost prostoru pro delší časový pobyt.

S hladinou akustického tlaku také přímo souvisí míra hlasitosti G , která je definována podle

$$G = 10 \lg \frac{E_\infty}{\int_0^\infty p_{10}^2(t) dt}, \quad (2.28)$$

kde $p_{10}(t)$ je impulsní odezva měřená ve vzdálenosti 10 m od zdroje zvuku ve volném poli. Norma ČSN 73 05025 [18] opět udává optimální hodnoty, které dosahují rozsahu od -9 dB do -4 dB.

3 Software ODEON

ODEON je program pro zevrubné modelování akustických prostor. Můžeme pomocí něj simulovat a měřit interiéry. Při zavedení vhodných úprav můžeme ODEON využít i pro venkovní prostory. ODEON ve svých výpočtech využívá zejména metody zrcadlení zdrojů společně s kombinací upraveného algoritmu pro sledování paprsků. Díky tomu lze například vymodelovat a změřit akustické úpravy před tím, než budou provedeny v reálném prostoru.

Na akustické modelování však neexistuje pouze software ODEON, ale celá řada dalších řešení. Příkladem dalších programů mohou být I-Simpa, EASE, CATT-Acoustic nebo CadnaR.

3.1 Zdroje a přijímače zvuku

Pro výpočty u modelovaných akustických prostor je nutné umístit a nastavit zdroje zvuku a měřící mikrofony.

Zdroje zvuku

Zdrojem zvuků může být všesměrový bodový zdroj, hovořící osoba, reproduktor, dopravní komunikace či industriální stroj. V závislosti na zdroji zvuku, který chceme modelovat, musíme vybrat vhodný typ zdroje v modelovacím softwaru.

ODEON nabízí čtyři druhy zdrojů, kterými jsou bodové, liniové, povrchové a uspořádané zdroje.

Nejběžnějším druhem zdroje, který se využívá, je bodový. Jak již plyne z názvu, zvuk je vyzařován z jednoho bodu. Tento zdroj lze použít pro modelování hovořících osob, hrající hudební nástroje či jednoduché uspořádání reproduktorů. Pro výpočet kmitočtové odezvy a parametrů charakterizujících prostorovou akustiku se nejčastěji využívá bodových, omni nebo semi-direkcionálních zdrojů. Obecné bodové zdroje jsou definovány matematicky.

Liniovými zdroji se modelují například dopravní komunikace či potrubí emitující zvuk.

Pro modelování industriálních strojů a davů lidí se využívá povrchových zdrojů.

Uspořádané zdroje se využívají, když chceme modelovat složitější uspořádání reproduktorů.

U zdrojů je možné definovat jejich směrovost, zpoždění, zisk a jeho případnou kmitočtovou závislost v jednotlivých oktávových kmitočtových pásmech.

Reálné zdroje (lidský hlas, hudební nástroje) využíváme zejména pro auralizaci nebo výpočet akustických parametrů závislých na určité úrovni reálného zdroje.

ODEON také nabízí možnost využít Common loudspeaker format (CLF) pro přesnou simulaci a modelování reproduktorů. CLF je otevřený formát souboru, který obsahuje data o výkonech reproduktorů a jejich polárních grafech. Toho mohou využít samotní výrobci reproduktorů a poskytnout jej koncovým uživatelům pro simulaci v akustických programech.

Přijímače zvuku

Přijímače se modelují pomocí jednoduchých bodových mono mikrofónů. Do modelu lze umístit samostatné přijímače nebo lze využít mřížky přijímačů, která se využívá především při vizualizaci.

3.2 Materiály a povrchy

Všem povrchům v modelu musíme přiřadit materiál, respektive jeho akustické vlastnosti. ODEON nabízí knihovnu materiálů s předdefinovanými vlastnostmi, které můžeme při modelování využít. ODEON umožňuje definovat si vlastní materiál. U něj je nutné nastavit činitel zvukové pohltivosti α pro kmitočtová pásma od 63 Hz do 8000 Hz. Každému povrchu lze také nastavit hodnotu činitele zvukové rozptylovosti na kmitočtu 707 Hz a transparentci. Činitel zvukové rozptylovosti závisí na hrubosti povrchu a je proto přiřazen povrchu, nikoli materiálu.

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2 Akustické vlastnosti materiálů, činitel zvukové pohltivosti určuje poměr energie, která se pohltí z energie dopadající. Činitel zvukové rozptylovosti pak určuje, jakým způsobem se na povrchu odráží zvuková energie. Jeho doporučené hodnoty podle [13] jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Doporučené hodnoty činitele rozptylovosti (převzato z [13])

Materiál	Činitel rozptylovosti
Publikum	0,6-0,7
Hrubé stavební konstrukce, 0,3-0,5 m hluboké	0,4-0,5
Knihovna obsahující knihy	0,3
Zdivo s otevřenými spárami	0,1-0,2
Zdivo, plněné spáry, neomítnuté	0,05-0,1
Hladký povrch, obecný	0,02-0,05
Hladký lakovaný beton	0,005-0,02

ODEON ve své knihovně materiálů nabízí také speciální materiály, kterými jsou materiál se 100% akustickou transparentí, materiál s totální pohltivostí a materiál s totální odrazivostí.

Materiál s totální pohltivostí se využívá například při modelování otevřených oken, dveří či venkovních situací, kde strop nahradíme tímto materiálem.

ODEON nabízí možnost do činitele rozptylovosti zahrnout i rozptyl způsobený difrakcí, ať už se jedná o difrakci způsobenou omezenou velikostí povrchů nebo o hranovou difrakci.

3.3 Výpočtové algoritmy

ODEON pro své výpočty využívá modelování na základě energetických veličin a geometrické akustiky, kde jsou zvukové vlny nahrazeny paprsky. ODEON nabízí tři hlavní metody výpočtů, lišící se výpočetní náročností, ale zároveň přesností výsledků. Nejrychlejší, ale nejméně přesnou metodou je *Quick Estimate*. Tato metoda by měla být použita pouze ke zjištění předběžných výsledků před dalšími výpočty. Druhou a přesnější metodou je *Global Estimate*, pomocí které již můžeme získat přesný odhad poklesové křivky a doby dozvuku. Třetí metodou je výpočet odezvy přijímačů na zdroje. Tato metoda je časově nejnáročnější, ale přináší nejpřesnější a nejobsáhlejší výsledky. Je tedy vhodná pro finální výsledky modelování.

ODEON počítá velké množství akustických parametrů z poklesové křivky. Poklesová křivka je odvozena z impulsní odezvy, jak bylo zmíněno

v kapitole 2.3 Impulsní odezva, a obsahuje všechny informace o odrazech a pohltivosti. Zde využitá impulsní odezva však přímo neodpovídá teoretické definici impulsní odezvy. Není totiž odezvou na Diracův impuls, ale jedná se o časový průběh hustoty energie zvuku v určitém místě, která nabývá pouze kladných hodnot. ODEON tuto impulsní odezvu používá i pro výpočty potřeb auralizace.

Rychlý odhad

Quick Estimate vypočítává činitel akustické pohltivosti, který poté dosadí do Sabinova a Eyringova vzorce a získá tak odhad doby dozvuku. ODEON namísto středního koeficientu pohltivosti počítá s modifikovanou hodnotou α' , pro kterou platí

$$\alpha' = \frac{\sum_i H_i \alpha_i}{\sum_i H_i}, \quad (3.1)$$

kde H_i je počet zásahů i -tého povrchu částicemi vyslanými ze zdroje za předpokladu, že platí rozptylové podmínky, a k odrazu dochází v náhodných směrech. Počet zásahů určuje vliv na celkovou pohltivost prostoru.

Sabinův i Eyringův vzorec doby dozvuku vyžadují znalost objemu modelovaného prostoru. Objem je určen pomocí střední volné dráhy l .

$$l = \frac{4V}{S}, \quad (3.2)$$

kde V je objem prostoru a S je celková plocha.

Střední volná dráha l udává průměrnou vzdálenost pohybující se částice mezi jednotlivými odrazy, které změni její směr či energii. V tomto případě se střední volná dráha vypočte metodou ray-tracingu. Předpokladem pro výpočet je, že akustické pole je difúzního charakteru a všem povrchům se pro výpočet nastaví činitel rozptylovosti $s = 1$, namísto hodnoty přiřazené jednotlivým materiálům. Tím se zajistí difúzní charakter akustického pole.

Globální odhad

Metoda *Global Estimate* vypočítává dobu dozvuku T_{20} a T_{30} . Výpočet probíhá tak, že ze zdroje jsou v náhodných směrech vyslány částice, které se odráží na základě vektorové metody rozptylu. ODEON zaznamenává úbytek energie každé z částic v závislosti na činiteli akustické pohltivosti povrchů a ztrátě energie při přenosu vzduchem po dobu nastavené délky impulsní odezvy. Po sečtení mnoha částic se získá globální poklesovou křivku, ze které

se odečtou doby dozvuku T_{20} a T_{30} . Pokud by byla nastavena příliš krátká délka impulsní odezvy, nebylo by možné odvodit dobu dozvuku.

Odezvy přijímačů na zdroje

Odezvy přijímačů na zdroje jsou v ODEONu vypočítávány pomocí různých metod. Těmi jsou metoda sledování paprsků (ray-tracing), metoda zrcadlených zdrojů, metoda sekundárních zdrojů, metoda brzkého rozptylu či paprsková radiozita (ray-radiosity). Kombinací zmíněných metod lze dosáhnout nejlepších výsledků, neboť každá z metod má určité limity. Kombinací vznikla takzvaná hybridní metoda, která se dále dělí na metodu brzkých odrazů a metodu pozdních odrazů. Při výpočtu odezvy na bodový zdroj se využívá obou metod. Oproti tomu při výpočtu odezvy na liniový či plošný zdroj dochází k využití pouze druhé metody, tedy metody pozdních odrazů.

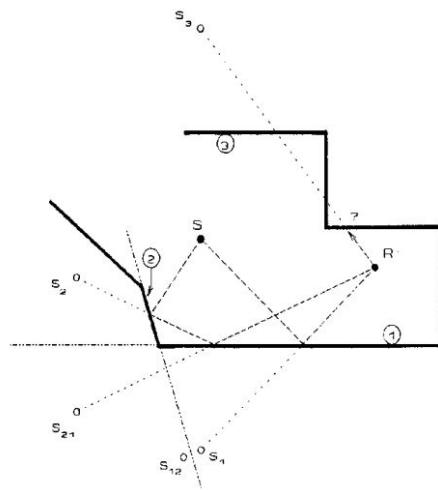
Hybridní metody se využívá pro výpočet bodové odezvy, vícebodové odezvy i odezvy v mřížce a je porovnatelná s měřením impulsní odezvy v reálném prostoru.

Metoda brzkých odrazů

Tato metoda využívá kombinace ray-tracingu, metody zrcadlených zdrojů, metody sekundárních zdrojů a metody brzkého rozptylu.

Nejprve je pomocí metody ray-tracingu nutné nalézt virtuální (zrcadlené a sekundární) zdroje vyzařující v prostoru. Ze základního zdroje jsou vyzařovány paprsky v náhodných směrech. Každý paprsek je sledován a pokud při své cestě narazí na překážku, dojde k zrcadlovému odrazu (jeho předpokladem je činitel rozptylovosti $s = 0$) a k vytvoření zrcadleného zdroje.

U jednoduchých prostor není problém počítat standardní metodou zrcadlených zdrojů, detailně popsáno v [4] a využít tedy všechny zdroje vytvořené pomocí sledování paprsků. Pro náročnější prostory tato metoda vede k obrovskému množství zbytečně zrcadlených zdrojů.



Obrázek 2: Metoda zrcadlení zdrojů (převzato z [13])

V následujícím kroku se pro zrcadlené zdroje zkontroluje viditelnost od přijímače. Pokud je zrcadlený zdroj viditelný, do reflektogramu se započítá odraz a na povrchu příslušejícímu zrcadlenému zdroji se vytvoří brzký sekundární zdroj.

Na obrázku 2 je znázorněno, že zrcadlené zdroje S_2 , S_3 a S_{12} nebudou od přijímače vidět, zatímco zrcadlené zdroje S_1 a S_{21} vidět budou. U viditelných zrcadlených zdrojů tak dojde k vytvoření sekundárních zdrojů, jak je uvedeno v [5]. Rozložení energie mezi zrcadleným zdrojem a sekundárním zdrojem je závislé na rozptylovém koeficientu povrchu. K následnému zrcadlení již zrcadlených zdrojů dochází dokud není dosaženo dostatečného řádu.

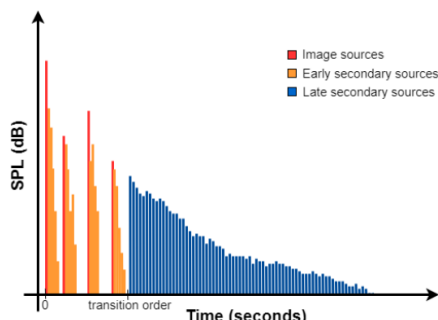
Sekundární zdroje ODEON simuluje využitím povrchových zdrojů, které vyzařují počet brzkých rozptýlených paprsků do řádu přechodu. Každý tento paprsek, který dosáhne přijímače bez kolize, se započítá do reflektogramu.

Metoda pozdních odrazů

U metody pozdních odrazů je ze zdrojů vyzařován určený počet pozdních paprsků. Tyto paprsky se šíří prostorem a odráží se pomocí metody vektorového rozptylu. S každým odrazem paprsku se zvýší jeho řád. Po dosažení řádu odrazů vyšší hodnoty, než je řád přechodu, začnou paprsky při každé kolizi v prostoru generovat pozdní sekundární zdroje. Tyto sekundární zdroje jsou generovány do maximálního řádu odrazů. Mezi vytvořenými sekundárními zdroji a přijímači dojde k

vytvoření cest a provede se kontrola jejich viditelnosti od přijímače. Pokud je sekundární zdroj viditelný od zdroje, započítá se do reflektogramu. Díky této kontrole metoda pozdních odrazů negeneruje exponenciálně rostoucí počet odrazů a výpočetní doba tak zůstane v přijatelných hodnotách.

Po započítání všech příspěvků ze zrcadlených zdrojů, brzkých sekundárních i pozdních sekundárních zdrojů do reflektogramu, získáme graf obdobný obrázku 3.

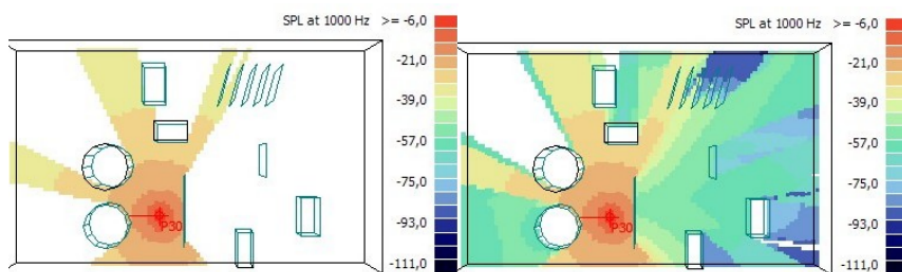


Obrázek 3: Reflektogram (převzato z [13])

Difrakce na překážce

K difrakci zvuku na překážkách dochází ve většině běžných prostor. Zvuková vlna se ohýbá kolem překážek či objektů, které mají srovnatelné rozměry s vlnovou délkou zvuku. Díky difrakci slyšíme zvuk i přímo za překážkami.

Při simulaci pomocí softwaru je tak nutné zahrnout difrakci na překážkách do výpočtů. Pokud by tomu tak nebylo, v mřížce výsledné hladiny akustického tlaku by vznikly akustické stíny viditelné na obrázku 4.



Obrázek 4: Hladina akustického tlaku v místnosti bez difrakce a s difrakcí (převzato z [15])

V případě, kdy přijímač neobdrží přímou vlnu od zdroje, detekuje ODEON jedno nebo dvou bodovou difrakci pomocí metody podrobně popsané v [16]. Počítáním difrakčních příspěvků pouze v případě, kdy přijímač neobdrží přímou vlnu, je možné zanedbat fázi zvukové vlny. S fází by bylo nutné počítat pouze v případě kombinace více příspěvků. Mezi každým zdrojem a přijímačem, kde není přímá vlna, dochází k výpočtu pouze jedné nejkratší cesty vlny difrakcí. Pomocí této metody je ODEON schopný pracovat se složitějšími objekty.

Pro výpočet příspěvku je nutné nejprve stanovit nejkratší cestu ohybu. Nejprve je vyslán paprsek ze zdroje k přijímači a první povrch, na kterém dojde k nárazu, je registrován jako povrch A. Poté se vyšle paprsek opačným směrem, tedy od přijímače ke zdroji, a první povrch nárazu je registrován jako povrch B. V případě, kdy mezi hranami povrchů A a B je přímá viditelnost, dochází k určení cesty zdroj-A-B-přijímač jako nejkratší cesty ohybu a následnému výpočtu příspěvku.

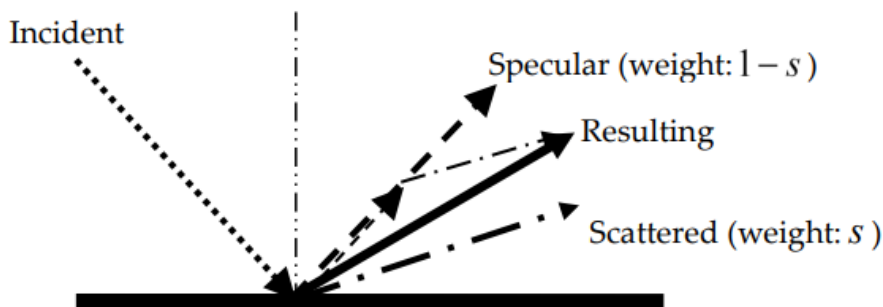
Vektorová metoda rozptylu

Vektorová metoda rozptylu je účinným způsobem, jak u výpočtu ray-tracingu zahrnout rozptyl při odrazu. Za předpokladu zrcadlového odrazu akustických vln (činitel rozptylovosti $s = 0$) se dle Snellova zákona rovná úhel dopadu

úhlu odrazu.

Druhou možností je předpoklad difuzního odrazu (činitel rozptylovosti $s = 1$), při kterém se dopadající paprsek se stejnou pravděpodobností odrazí do všech směrů nezávisle na příchozím směru. Dle Lambertova kosinového zákona je intenzita odraženého paprsku přímo úměrná kosinu úhlu θ mezi směrem dopadajícího paprsku a normálou povrchu.

V reálném případě dochází ke kombinaci obou jevů, proto se jejich výpočet provádí pomocí vektorové metody rozptylu, která je závislá na činiteli rozptylovosti s . Výpočet touto metodou je naznačen na obrázku 5. Zrcadlový odraz váhujeme koeficientem $(1 - s)$, difuzní odraz váhujeme koeficientem s a tyto dva odrazy následně sečteme pomocí vektorového součtu. Tak získáme směr a intenzitu výsledného paprsku.



Obrázek 5: Vektorová metoda rozptylu (převzato z [13])

Detailní popis vektorové metody rozptylu je k nalezení v [14].

3.4 Základní parametry pro výpočet

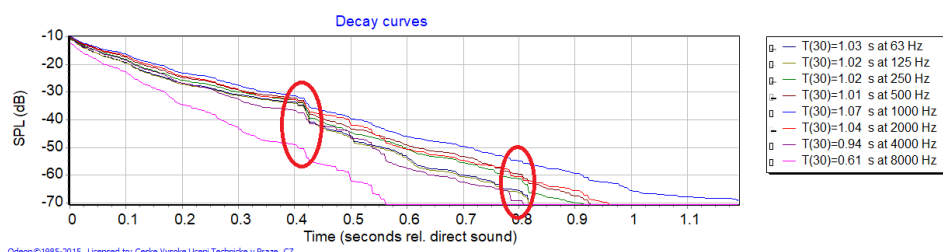
Výpočetní parametry ODEONu určují, jak budou provedeny následující výpočty. ODEON nabízí tři možnosti předvolených parametrů *Survey*, *Engineering* a *Precision*. První předvolba zajišťuje rychlý výpočet pro odhad vlastností daného prostoru díky nižšímu počtu pozdních paprsků, nižšímu počtu brzkých rozptylových paprsků a vyloučení úhlové pohltivosti. Druhá možnost umožní již relativně přesné výsledky bez vysoké časové náročnosti s doporučeným počtem pozdních paprsků, povolenou úhlovou pohltivostí a dvojnásobným počtem brzkých rozptylových paprsků. Nejpřesnější, ale také časově nejnáročnější, je pak třetí předvolba, u které se více než řádově zvýší množství pozdních paprsků.

Hlavními parametry pro výpočet, které můžeme v ODEONu nastavit, jsou délka impulsní odezvy a počet pozdních paprsků.

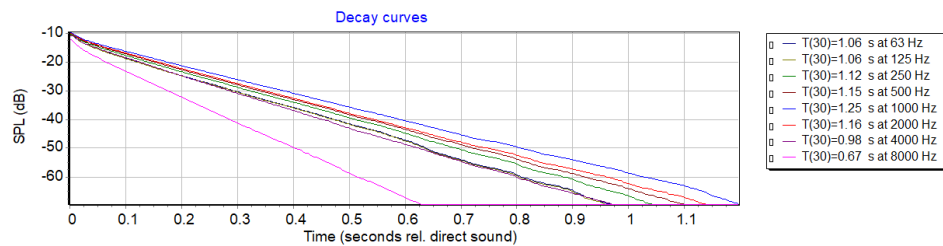
Parametr délky impulsní odezvy udává čas v ms, pro který bude počítána poklesová křivka. Jak je zmíněno v kapitole 3.3 Výpočtové algoritmy, tak zde využitá impulsní odezva odpovídá časovému průběhu hustoty energie v určitém místě a nikoliv odezvě na Diracův impuls. Délka impulsní odezvy by měla být alespoň 2/3 nejdelší doby dozvuku přes všechna oktávová pásma. Odhad doby dozvuku lze získat pomocí funkce *Quick Estimate*, která jak již bylo zmíněno, určí dobu dozvuku ze Sabinova a Eyringova vzorce. Pokud by byla délka impulsní odezvy nastavená kratší než zhruba 2/3 doby dozvuku, nebylo by možné určit dobu dozvuku T_{30} , neboť by byl dynamický rozsah poklesové křivky nižší než potřebných 35 dB. Doporučené je však nastavit délku impulsní odezvy na dobu shodnou s dobou dozvuku.

Počet pozdních paprsků ovlivní hustotu odrazů v pozdní části poklesu. Nastavení příliš nízké hodnoty může vést k nepřesným a chybným výsledkům, oproti tomu příliš vysoká hodnota zvýší výpočetní čas. Hodnoty, které ODEON nabízí v předvolbách, vychází nejen z tvaru a velikosti místnosti, ale také z počtu povrchů v modelu. Pro místnost podlouhlého tvaru, která obsahuje mnoho povrchů, je tak počet pozdních odrazů doporučen vyšší než pro místnost tvaru krychle, která obsahuje málo povrchů.

Nastavení příliš malého počtu pozdních paprsků lze poznat z poklesové křivky pro výpočet bodové odezvy. V takovém případě nebude poklesová křivka plynulá, ale vyskytnou se na ní skokové poklesy. Na následujícím obrázku 6 je vidět skokový pokles na poklesové křivce při nastavení extrémně malé hodnoty. Na obrázku 7 je znázorněn plynulý pokles křivky při správném nastavení.

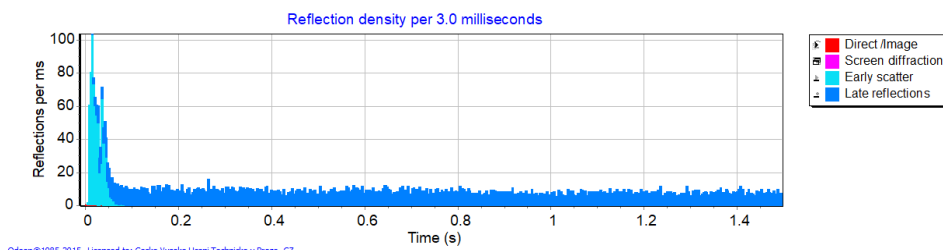


Obrázek 6: Poklesová křivka při nízkém počtu pozdních paprsků

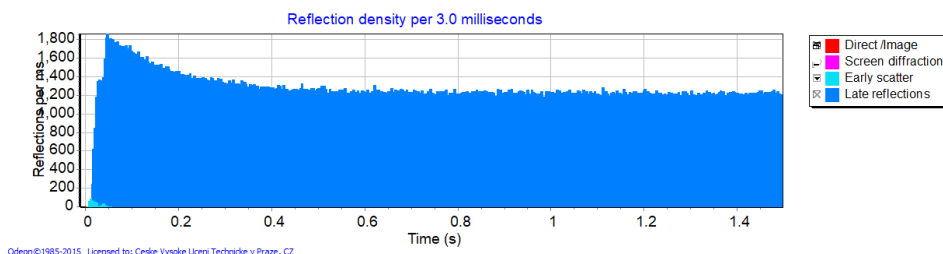


Obrázek 7: Poklesová křivka při správném počtu pozdních paprsků

Kromě této možnosti ODEON nabízí i graf hustoty odrazů, ze kterého lze také pozorovat správné nastavení počtu pozdních paprsků. Na obrázku 8 znázorňuje příliš nízkou hustotu odrazů pro dosažení správných výsledků. Pro jejich dosažení by měla být hustota odrazů vyšší než 25 odrazů/ms, což lze pozorovat na obrázku 9, kde je tato hodnota mnohonásobně překročena.



Obrázek 8: Hustota odrazů při nízkém počtu pozdních paprsků



Obrázek 9: Hustota odrazů při správném počtu pozdních paprsků

ODEON nabízí k nastavení mimo délky impulsní odezvy a počtu pozdních paprsků i mnoho dalších parametrů, kterými jsou například maximální řád odrazu, rozlišení impulsní odezvy, řád přechodu, počet brzkých paprsků, úhlová pohltivost, ohyb vln podél hran či povrchový rozptyl. Tyto parametry je však vhodné ponechat v základním nastavení, jak je doporučeno v manuálu k softwaru ODEON [13]. Pouze ve vybraných případech experimentování,

nebo zkoumání specifických případů je vhodné tyto parametry měnit.

Maximální řád odrazu určí kolikrát se paprsek může odrazit a pro běžné výpočty by měl nabývat co největší hodnoty. V případě takové analýzy se budou paprsky odrážet do délky impulsní odezvy. Pouze ve výjimečných případech dojde k dosažení maximálního řádu odrazu dříve, než je nastavená délka impulsní odezvy. Nejvyšší hodnota, kterou lze nastavit, je 10000. Nižší hodnota maximálního řádu odrazu se nastavuje pouze v případě, chceme-li získat výsledky pouze pro velmi brzké odrazy.

Rozlišení impulsní odezvy je délka časového kroku, se kterým se ukládá hodnota energie jednotlivých odrazů během výpočtu bodové odezvy do histogramu impulsní odezvy. Doporučené rozlišení podle manuálu ODEONu [13] jsou 3 ms.

Řád přechodu určuje, při jakém řádu odrazu ODEON změní výpočet z brzké metody zrcadlených zdrojů na pozdní metodu paprskové radiozity. Pro většinu prostor je doporučena hodnota 2. V místnostech, kde je od přijímače viditelné pouze malé množství zrcadlených zdrojů, je možné snížit řád přechodu na hodnotu 1 či 0. Pokud je řád přechodu 0, pak bude bodová odezva stanovena pouze metodou sledování paprsků či paprskové radiozity.

V základním nastavení nabývá maximální řád odrazu hodnoty 10000, rozlišení impulsní odezvy 3 ms, řád přechodu 2 a počet brzkých paprsků je dvojnásobnou hodnotu počtu pozdních paprsků. Úhlová pohltivost, ohyb vln podél hran a povrchový rozptyl jsou při tomto nastavení zapnuty.

3.5 Vizualizace

Výsledky modelování lze pro snadnější představu a interpretaci vizualizovat pomocí vizualizačních nástrojů.

Vhodným nástrojem pro vizualizaci šíření zvukových vln je funkce *3D Billiard*, která ze zdroje zvuku emituje malé billiardové koule. Pomocí tohoto nástroje lze zjistit, zda nedochází k soustředování zvuku ze zakřivených geometrií, či k třepotavé ozvěně mezi dvěma rovnoběžnými povrchy.

Další možností vizualizace je využití mřížky pro zobrazení akustických parametrů v ploše. U mřížky lze nastavit vzdálenost od povrchu, nad kterým parametry počítáme, a vzdálenost jednotlivých přijímačů v mřížce, tedy její rozlišení. Pro ušetření výpočetního času lze spočítat mřížku s nižším rozlišením a poté ji interpolovat.

ODEON nabízí i možnost Auralizace, která zde není rozebrána, neboť by byla nad rámec této práce.

4 Modelování a simulace

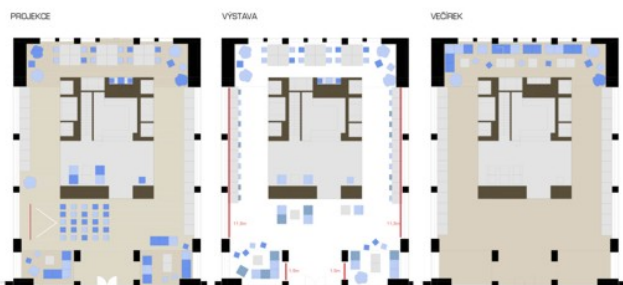
4.1 Zkoumaný prostor a jeho využití

Prostor FEL Caffé se nachází v přízemí budovy Fakulty elektrotechnické ČVUT, na adrese Technická 1902/2, 160 00 Praha 6. Tento prostor je většinu roku studenty využíván jako studovna a kavárna. Několikrát do roka se zde konají i jiné události. Těmi mohou být například workshopy, posterové výstavy nebo hudební produkce. Z tohoto důvodu je nutné, aby byl prostor akusticky přizpůsoben všem těmto variantám využití.

V roce 2012 byla vypsána studentská soutěž na návrh interiéru studovny s kavárnou FEL Caffé. V této soutěži zvítězil návrh číslo 13 Barbory Fraňkové a Jana Harciníka. Vizualizace návrhu na obrázku 10 byla následně realizována v létě roku 2012. Od té doby je prostor ve stejném stavu a právě na něm bude provedena akustická analýza.



Obrázek 10: Grafická vizualizace návrhu FEL Caffé (převzato z [23])



Obrázek 11: Variabilita návrhu FEL Caffé (převzato z [23])

Jan Harciník má na svých webových stránkách i půdorysné schéma variability prostoru, obrázek 11, ze kterého vyjdeme při následném zaměřování a modelování. Využití v praxi dostalo u jednotlivých případů drobných změn,

které jsou v modelu také vyobrazeny.

Prostor FEL Caffé v současné době nabízí 31 pracovních stolů, tedy zhruba 62 míst, dále studijní koutky pro 12 lidí a sedačky až pro 20 lidí. Studovna dokáže při plném obsazení pojmout 94 lidí.

Případ studovny/kavárny

Nejčastějším využitím prostoru FEL Caffé je případ studovny a kavárny. Z pozorování tohoto využití bylo zjištěno, že studenti budou v celém prostoru rovnoměrně rozmístěni a průměrná obsazenost prostoru bude dosahovat hodnoty 50 %.

Případ workshopu/výstavy

Dalším využitím FEL Caffé je konání workshopu či pořádání posterových výstav. V případě konání těchto akcí lze předpokládat změnu rozmístění lidí a obsazenosti oproti běžnému využití. Příklad rozmístění posterové výstavy je znázorněn na obrázku 12. Z tohoto snímku budeme vycházet při modelování prostoru pro případ workshopu, či výstavy. Zde lze také očekávat nižší obsazenost, která však bude více centralizována podél posterů.



Obrázek 12: Posterová výstava v prostorách FEL Caffé (převzato z [24])

Případ hudební produkce

Posledním, ale neméně důležitým využitím prostoru FEL Caffé je konání hu-

dební produkce. Zde vyjdeme z případu studentské soutěže Synth challenge na obrázku 13. I v tomto případě bude rozložení zdrojů a posluchačů, tedy přijímačů v prostoru, velmi odlišné oproti běžnému stavu. Případ hudební produkce budeme zkoumat z hlediska živé hudby.



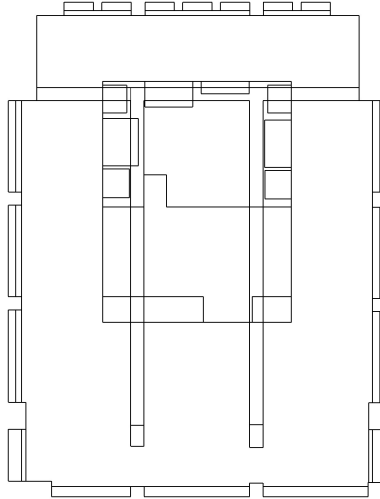
Obrázek 13: Synth Challenge v prostorách FEL Caffé (převzato z [25])

4.2 Zaměření a modelování prostoru

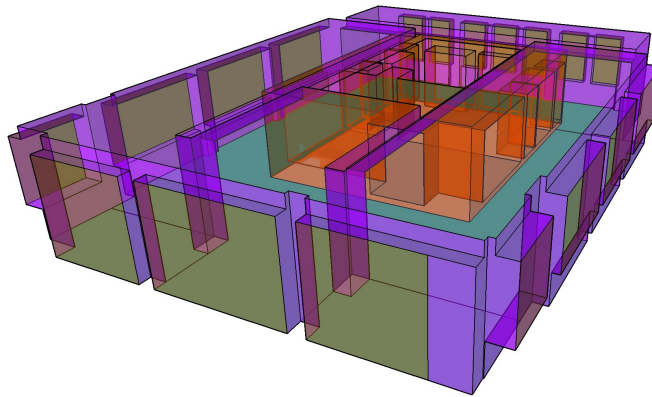
Pro zaměření prostor FEL Caffé bylo využito laserového dálkoměru Bosch DLE 73 Professional. Výstupem tohoto zaměření je vnitřní půdorys na obrázku 14.

Hrubé rozměry prostoru jsou délka 18,7 m, šířka 14,8 m a výška 3,3 m. Vnitřní plocha všech stěn nabývá hodnoty $1014,1 \text{ m}^2$, z toho plocha podlahy činí $215,6 \text{ m}^2$. Objem místnosti je díky vnitřní vestavbě kavárny menší, než kdyby byla místnost pouze tvaru kvádrů. Objem prostoru FEL Caffé je tak $V \approx 736 \text{ m}^3$.

Vytvoření 3D modelu bylo provedeno pomocí modelovacího softwaru SketchUp. Modelování geometrie prostoru by bylo možné provést i za pomoci jiných programů, kterými jsou například modelovací CAD systémy, či samotný akustický software ODEON, který nabízí funkci Extrusion Modeller. Modelování pomocí softwaru SketchUp bylo zvoleno z důvodu jednoduchosti ovládání a kompatibility se softwarem ODEON. Vymodelovaný prostor FEL Caffé je na obrázku 15. Za pomoci pluginu SU2Odeon přímo od tvůrců ODEONu je tak možné jedním kliknutím exportovat geometrii modelu pro další využití v akustickém softwaru.



Obrázek 14: Zaměřený půdorys FEL Caffé



Obrázek 15: 3D model prostoru FEL Caffé v softwaru SketchUp

Vzhledem k tomu, že se jedná o zcela uzavřený vnitřní prostor, nebylo nutné se zabývat problémy při modelování prostor otevřených, kdy například otevřená okna či dveře modelujeme jako povrch a poté jim přiřadíme materiál s činitelem akustické pohltivosti $\alpha = 1$.

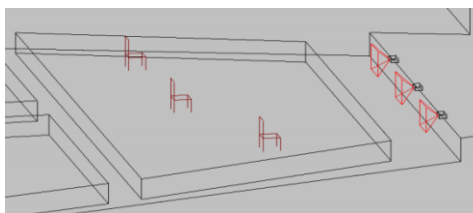
Obsazenost prostoru a její modelování

Modelování obecnstva v prostorech pro akustickou simulaci lze provést více způsoby. Ve velkých prostorech, například hudebních sálech, divadlech či stadionech, se obecnstvo modeluje pomocí pohltivých a odrazivých ploch, kterým jsou přiřazeny materiály s vhodnými akustickými vlastnostmi. V takových případech se řeší akustické pole difúzního charakteru, kdy je hustota akustické energie ve všech místech vyrovnaná a dochází zde k odrazům akustických vln, které dopadají ze všech směrů se stejnou pravděpodobností.

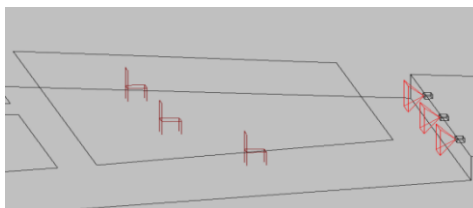
Tuto skutečnost lze modelovat způsoby zmíněnými v [26]. Jedná se o modelování pomocí *kvádrů obecnstva*, *plovoucí roviny*, či *rovinou podlahy*, na obrázcích 16 až 18. Z důvodu větších pohltivých ploch v případě kvádrů obecnstva a plovoucí roviny u těchto dvou modelů dochází ke značnému snížení doby dozvuku oproti modelování rovinou podlahy.

V menším prostoru, kdy se přijímače, tedy obecnstvo, budou nacházet blíže ke zdroji zvuku, budou mít větší roli na přenos zvuku přímé akustické vlny od zdroje. Jejich narušením či pohlcením dojde k přímému ovlivnění akustiky prostoru a tuto skutečnost je nutné do modelu zahrnout. Proto je vhodné zvolit modelování variantou pohltivé plochy kolmé ke zdroji zvuku s nastavením vhodného činitele akustické pohltivosti.

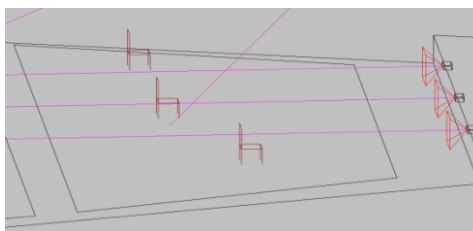
Samotná akustická pohltivost obecnstva nejvíce závisí na jejich oblečení a jeho poréznosti. Pohltivost oblečení je výrazná při středních a vyšších frekvencích a zároveň velmi individuální pro jednotlivé osoby. Dochází také ke změnám pohltivosti z důvodu obměny oblečení v závislosti na sezóně či módě. Velkou roli hraje také druh sedadel, na kterých obecnstvo



Obrázek 16: Kvádr obecnstva (převzato z [26])



Obrázek 17: Plovoucí rovina (převzato z [26])



Obrázek 18: Rovina podlahy (převzato z [26])

sedí, hustota obsazení a rozložení sedadel. Podle [4] existují dvě experimentální možnosti, kterými lze určit akustickou pohltivost obecnstva a sedadel. První z nich je umístění sedadel nebo osob do dozvukové místnosti a měření změny doby dozvuku, kterou způsobí. Z této změny lze odvodit jejich pohltivost. Druhou metodou je měření doby dozvuku přímo v koncertních sálech a odvození pohltivosti z této hodnoty.

Vhodný způsob jak charakterizovat pohltivost osob je využití ekvivalentní pohltivé plochy A , která je frekvenčně závislá. V tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty ekvivalentní pohltivé plochy naměřené v dozvukové místnosti.

Tabulka 7: Ekvivalentní pohltivá plocha osob v m^2 (převzato z [4])

Typ osoby	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Stojící muž v těžkém kabátu	0,17	0,41	0,91	1,30	1,43	1,47
Stojící muž bez kabátu	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Hudebník sedící s nástrojem	0,60	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08

Další možností je využít efektivní obsazené plochy a této ploše přiřadit správný činitel akustické pohltivosti. V tabulce 8 jsou ukázány možné hodnoty činitelů akustické pohltivosti i s efektivní obsazenou plochou. Tato varianta byla zvolena v našem modelu.

Tabulka 8: Činitel akustické pohltivosti obecnstva a sedadel (převzato z [4])

Typ obsazení	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Publikum na dřevěných židlích, dvě osoby na m^2	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87
Publikum na dřevěných židlích, jedna osoba na m^2	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78
Publikum v čalouněných křeslech, $0,85\text{ m} \times 0,63\text{ m}$	0,72	0,82	0,91	0,93	0,94	0,87
Publikum v čalouněných křeslech, $0,90\text{ m} \times 0,55\text{ m}$	0,55	0,86	0,83	0,87	0,90	0,87
Neobsazená čalouněná křesla, $0,90\text{ m} \times 0,55\text{ m}$	0,44	0,56	0,67	0,74	0,83	0,87

Modelování osob provedeme vytvořením pohltivé plochy o velikosti 1 m^2 a dosazením činitele akustické pohltivosti publika na dřevěných židlích pro jednu osobu na m^2 .

4.3 Nastavení v softwaru ODEON

Pro provedení akustické analýzy je nutné správně nastavit parametry zmíněné v kapitole 3.4 Základní parametry pro výpočet, dále správně nastavit

a umístit zdroje a přijímače a v neposlední řadě přiřadit povrchům odpovídající materiály. Po provedení těchto kroků je možné přikročit k akustické analýze.

Pro všechny případy byla nastavená délka impulsní odezvy na 2000 ms, což je hodnota více než dostatečná pro získání poklesových křivek. Počet pozdních paprsků byl u všech případů nastaven dle doporučení ODEONu pro přesnost *Engineering*. V případě studovny byla tato hodnota 1201, v případě workshopu/výstavy 1000 a u případu hudební produkce 1122. Všechny ostatní parametry byly ponechány v nastavení doporučeném pro přesnost *Engineering*.

Zdroje a přijímače

Jako první se musí nastavit zdroje zvuku pro následnou analýzu. ODEON nabízí čtyři druhy zdrojů, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1 Zdroje a přijímače zvuku. Těmi jsou bodový, liniový, povrchový a uspořádaný. V našem případě všechny zdroje budou modelovány jako bodové. U zdrojů, které budeme považovat za osoby, využijeme směrové charakteristiky odpovídající lidské hlavě, kterou ODEON nabízí v rámci své knihovny zdrojů.

V prvním případě modelování studovny/kavárny musíme vytvořit dvě možnosti. Pro první možnost použijeme mít 3 pozice zdroje a 6 přijímačů pro určení doby dozvuku. U místností do 500 sedadel norma ČSN EN ISO 3382-1 [20] určuje minimální počet míst mikrofonů na hodnotu 6 při měření doby dozvuku. Z tohoto důvodu bylo i v našem případě zvoleno 6 přijímačů. Více pozic zdroje užíváme z důvodu nemožnosti dosáhnout difúzního pole v celém prostoru. Získání přesnějšího výsledku docílíme změřením doby dozvuku pro více pozic zdroje a následným zprůměrováním výsledných hodnot. Pro druhou možnost, pak budou bodové zdroje na každém místě, kde předpokládáme výskyt osoby, pro získání dalších parametrů. Jednotlivé zdroje zvuku budou mít v tomto případě hladinu akustického tlaku $L_{W,A} = 68,4$ dB. Tuto hodnotu uvádí norma ČSN EN ISO 3382-3 [21] jako hladinu akustického výkonu řeči při normálním úsilí bez rozdílu pohlaví.

Z tohoto nastavení budeme moci například určit celkovou hladinu akustického tlaku v prostoru. V kapitole 4.1 Zkoumaný prostor a jeho využití je uvedeno předpokládané obsazení 50 %, tedy 47 lidí neboli zdrojů náhodně rovnoměrně rozmístěných po celém prostoru. Toto rozložení bylo zvoleno z důvodu náhodného způsobu obsazování prostoru, kdy není určeno, kam si nově příchozí mají sednout a mohou se tak dobrovolně rozhodnout. Na obrázku A.2 je zobrazené toto námi zvolené „náhodné“ rovnoměrné rozložení. U každého zdroje jsme nastavili jeho souřadnicovou polohu, orientaci, směrovou

charakteristiku a zisk.

U případu workshopu/výstavy očekáváme výskyt zdrojů zvuku podél posterů v přední části místnosti, kde se nachází výstava. Nelze však opomenout možnost výskytu zdrojů zvuku v zadní části místnosti. Zdroje zvuků podél posterů jsou rozmístěné rovnoměrně náhodně. Dále jsou náhodně umístěny tři zdroje ve střední a zadní části prostoru, čímž je zahrnuta možnost výskytu zdrojů i jinde než pouze v přední části prostoru. Na obrázku A.24 je zobrazené toto rozmístění zdrojů. Předpokládaný počet zdrojů je v tomto případě dvacet. Opět je nutné nastavit zdrojům jejich souřadnice, orientaci, směrové vlastnosti a zisk.

Pro hudební produkci očekáváme hlavní výskyt zdrojů v části před publikem. Jak je znázorněno na obrázku A.41, v našem případě živé hudby to budou dva hudebníci, u kterých opět využijeme zdroje se směrovou charakteristikou odpovídající lidské hlavě. Příjímače zvuku jsme zde umístili na pozice publika do první, prostřední a poslední řady, abychom získali přehled akustických vlastností v celém publiku.

Ve všech třech případech jsme využili i možnosti grafické vizualizace výsledků pomocí mřížky přijímačů, pro kterou jsme vybrali všechny podlahové povrchy prostoru FEL Caffé a vzdálenost přijímačů v mřížce jsme nastavili na 0,5 m.

Materiály

Nastavení materiálů je u všech tří případů totožné. Na obvodové zdi a strop jsme aplikovali materiál 4002, natřená omítka. Pro podlahu jsme museli zvolit materiály dva, neboť ve střední části je použité linoleum, v našem případě materiál 6000, linoleum na betonu. Oproti tomu je v zadní části a předních bočních částech na podlaze položen koberec, tedy materiál 7004, zátěžový koberec na betonu. Na okenní povrchy byl použit materiál 10006, okenní otvor zasklený. Vnitřní vestavba FEL Caffé je provedena z nezjištěného dřevěného materiálu. V našem modelu jsme využili materiál 3068, překližkové obložení. Stejný materiál jsme také využili na studijní stoly. Na křesla byl aplikován materiál 11006, prázdná křesla čalouněná látkovým potahem. Posledním materiálem, který jsme v modelech využili, byl materiál 11003, obecnostvo na dřevěných židlích, 1 os./m². V tabulce 9 jsou názorně ukázány činitele akustické pohltivosti α pro jednotlivá kmitočtová pásma.

Tabulka 9: Činitel zvukové pohltivosti pro materiály použité při modelování (převzato ze softwaru ODEON)

Materiál	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Natřená omítka	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Linoleum na betonu	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Zátěžový koberec na betonu	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Okenní otvor zasklený	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Překližkové obložení	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Prázdná křesla čalouněná látkou	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
Obecnostvo na dřevěných židlích	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78

4.4 Grafické vyhodnocení akustické analýzy a vizualizace pomocí ODEONu

Po nastavení zdrojů, přijímačů, materiálů a základních výpočetních parametrů, jsme v softwaru ODEON provedli akustickou analýzu třech případů využití prostoru FEL Caffé pomocí metod popsanych v kapitole 3.3 Výpočtové algoritmy. Většina popisovaných grafů a obrázků je k nalezení v přílohách. Správnost nastavení výpočetních parametrů jsme u všech případů ověřili kontrolou grafů hustoty odrazů, obrázky A.3, A.4 a A.5, kde pro všechny tyto případy překračuje hustota odrazů hodnotu 25 odrazů/ms. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.4 Základní parametry pro výpočet, tak hustota vyšší než tato hodnota vede k dosažení správných výsledků.

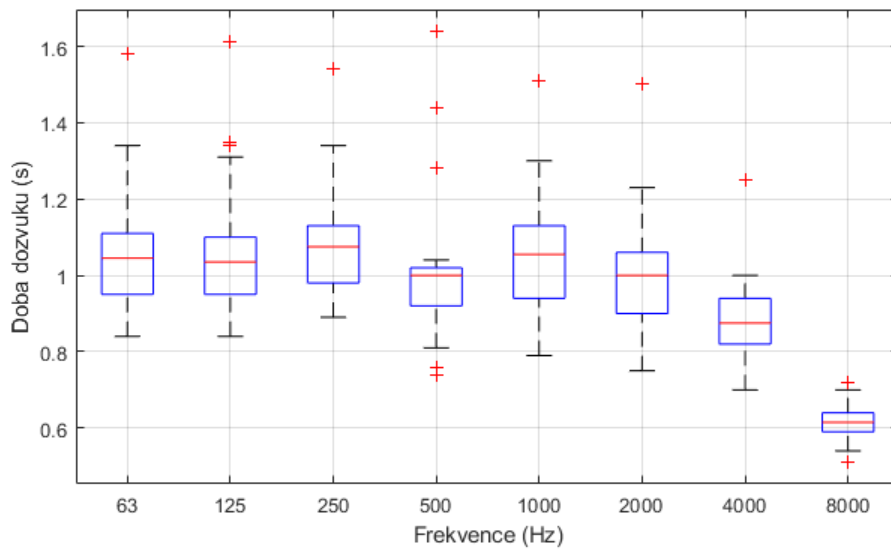
Případ studovny/kavárny

Jako první jsme provedli akustickou analýzu pro případ studovny/kavárny metodou *Global Estimate*. Pomocí globálního odhadu jsme získali graf poklesové křivky A.6, ze které jsme získali dobu dozvuku pro jednotlivá kmitočtová pásma zobrazená v grafu A.7.

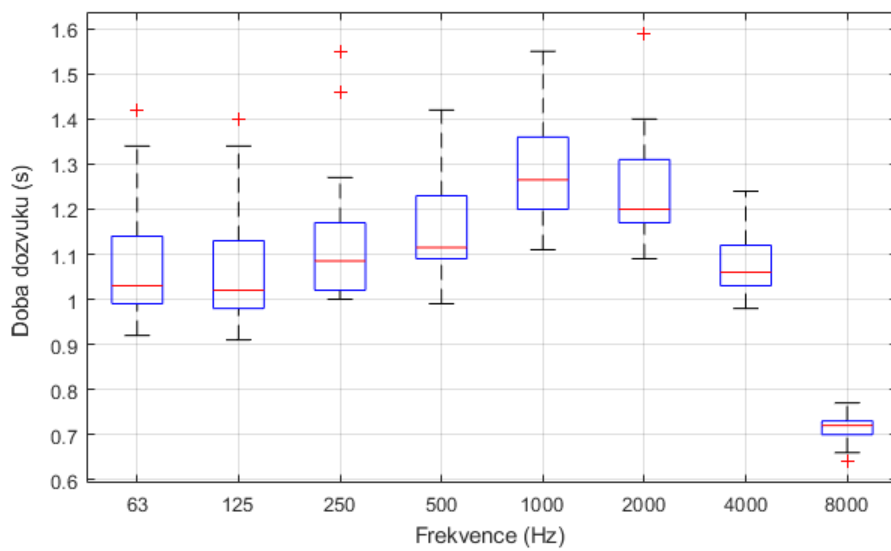
Pro první případ rozestavení zdrojů a přijímače na obrázku A.8 jsme provedli výpočet doby dozvuku bodovými odezvami pro 6 přijímačů a 3 pozice zdroje. Pro výsledné hodnoty u jednotlivých variant obsazenosti jsme vytvořili krabicové grafy na obrázcích 19 až 21.

Do následující grafu na obrázku 22 jsme vynesli dobu dozvuku v závislosti na kmitočtu pro tři variace obsazenosti prostoru.

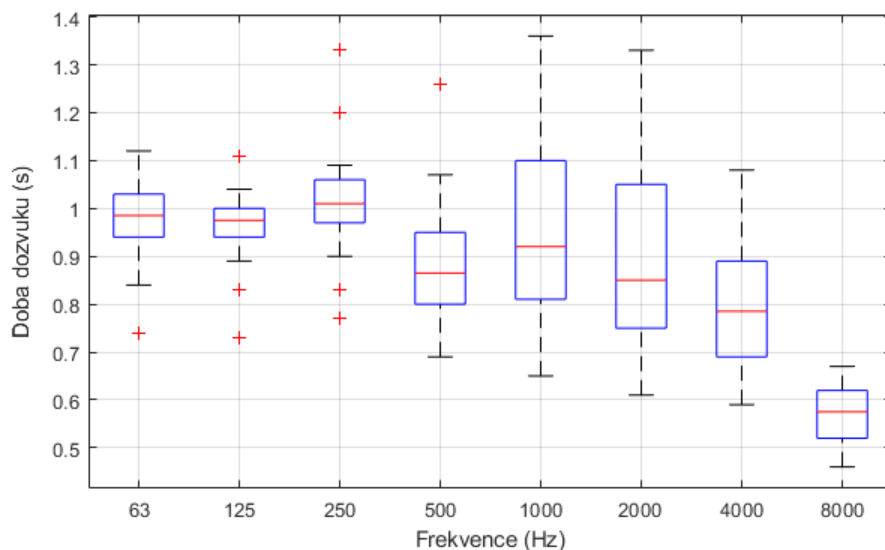
Doba dozvuku pro obsazenost 50 % bude $T_{30} = 1,04$ s. Pro variaci prostoru s obsazeností 0 % vychází doba dozvuku $T_{30} = 1,22$ s. V případě obsazenosti 100 % je doba dozvuku $T_{30} = 0,92$ s. Tento rozdíl dob dozvuku byl očekávaný z důvodu zvýšení či snížení pohltivosti, ke kterému dochází změnou obsazenosti prostoru.



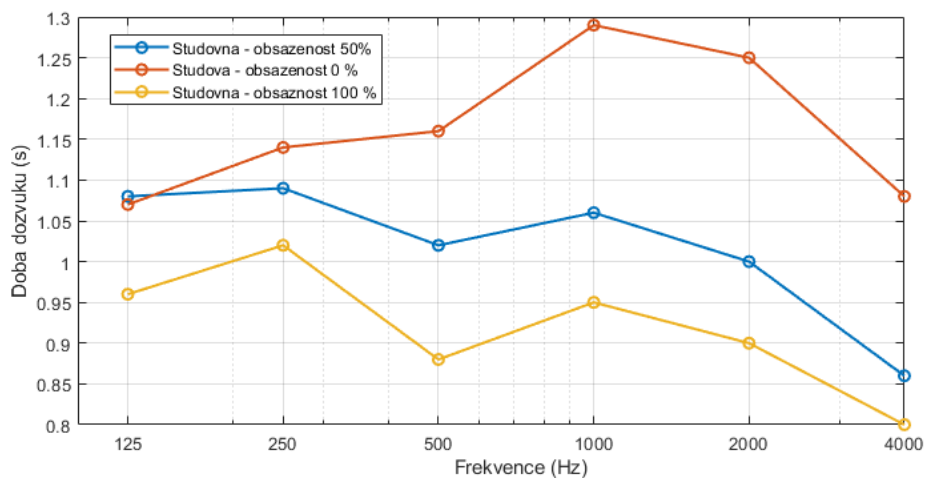
Obrázek 19: Krabicový graf doby dozvuku T_{30} pro obsazenost 50 %



Obrázek 20: Krabicový graf doby dozvuku T_{30} pro obsazenost 0 %



Obrázek 21: Krabicový graf doby dozvuku T_{30} pro obsazenost 100 %



Obrázek 22: Doba dozvuku T_{30} analyzovaných případů obsazenosti

Pro dobu dozvuku jsme také nechali spočítat bodovou odezvu pro nastavenou mřížku, která je na obrázku A.9.

Následně jsme provedli výpočet bodové odezvy v místě přijímače, který

byl umístěn do středu přední části místnosti, a pro nastavenou mřížku. Výstupem těchto analýz jsou grafy A.10 až A.22.

Na grafu A.10 názorně vidíme poklesovou křivku bodové odezvy v místě přijímače. Parametry z grafů A.11 až A.15 jsme pro lepší přehlednost vynesli do tabulky 10 a přidali akustické parametry času těžiště T_s a hladiny akustického tlaku váženého filtrem A $SPL(A)$. Z analýzy jsme také získali index srozumitelnosti STI , pro který vyšla hodnota $STI = 0,56$.

Tabulka 10: Vypočtené akustické parametry pomocí bodové odezvy v místě přijímače pro případ studovny/kavárny

Oktávové pásmo (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Doba dozvuku T_{30} (s)	1,07	1,07	1,10	1,03	1,07	1,01	0,91	0,65
Čas těžiště T_s (ms)	84	84	91	85	90	87	78	58
Míra přímého zvuku C_7 (dB)	-10,7	-11,3	-11,5	-11,0	-11,7	-12,1	-11,2	-10,4
Míra zřetelnosti C_{50} (dB)	-1,2	-1,3	-1,9	-1,5	-1,9	-1,8	-1,1	0,9
Míra boční energie LF_{80} (-)	0,239	0,246	0,261	0,270	0,269	0,301	0,300	0,300
Hladina akustického tlaku SPL (dB)	55,2	55,4	60,2	62,8	57,1	49,7	43,1	35,2
Hladina akustického tlaku $SPL(A)$ (dB)	29,0	39,2	51,5	59,6	57,1	50,9	44,0	34,0

Vizualizaci výsledků je vhodné z ODEONu získat pomocí výpočtu odezvy pro přijímače v mřížce. Dostaneme tak přehled jednotlivých parametrů v celém prostoru s vyznačením na barevné škále, jak je znázorněno na obrázcích A.16 až A.22. Názorně zde lze vidět, jak se liší akustické parametry v jednotlivých částech prostoru FEL Caffé.

Případ workshopu/výstavy

Druhou analýzou byl případ využití FEL Caffé pro pořádání workshopu/výstavy. Opět jsme zde nejprve provedli globální odhad pomocí metody *Global Estimate*, poté vypočetli bodovou odezvu v místě přijímače a jako poslední jsme provedli vizualizaci díky výpočtu odezvy přijímačů v mřížce.

Výstupem metody *Global Estimate* je poklesová křivka v grafu A.25 a z ní následně odečtené hodnoty doby dozvuku v grafu A.26.

Bodová odezva byla opět počítána pro přijímač umístěný do středu přední části místnosti. Graf A.27 zobrazuje poklesovou křivku pro bodovou odezvu a následující graf A.28 ukazuje odečtenou dobu dozvuku. Dalšími výstupy jsou grafy A.29 pro míru přímého zvuku C_7 , A.30 pro míru zřetelnosti C_{50} , A.31 pro míru boční energie LF_{80} a A.32 pro hladinu akustického tlaku SPL v místě přijímače. Všechny hodnoty jsme opět uvedli do tabulky.

Bodovou odezvou v mřížce jsme opět získali vizualizaci akustických parametrů v prostoru na obrázcích A.33 až A.39.

Tabulka 11: Vypočtené akustické parametry pomocí bodové odezvy v místě přijímače pro případ workshopu/výstavy

Oktávové pásmo (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Doba dozvuku T_{30} (s)	0,88	0,88	0,93	0,88	0,93	0,86	0,79	0,58
Čas těžiště T_s (ms)	52	53	57	53	59	57	51	38
Míra přímého zvuku C_7 (dB)	-5,8	-6,1	-6,4	-5,8	-6,9	-6,9	-6,1	-5,3
Míra zřetelnosti C_{50} (dB)	2,4	2,2	1,8	2,3	1,6	1,8	2,5	4,4
Míra boční energie LF_{80} (-)	0,245	0,252	0,261	0,252	0,254	0,268	0,267	0,260
Hladina akustického tlaku SPL (dB)	55,1	55,2	60,0	62,8	56,9	49,2	42,9	36,0
Hladina akustického tlaku $SPL(A)$ (dB)	28,9	39,1	51,3	59,5	56,9	50,4	43,9	34,9

Případ hudební produkce

Posledním případem je využití FEL Caffé pro hudební produkci. U živé hudební produkce jsme stejně jako v předchozích případech provedli globální odhad metodou *Global Estimate*. Výsledkem zde je opět graf A.42 poklesové křivky a graf A.43 získané doby dozvuku.

Následně jsme počítali bodovou odezvu pro tři přijímače. První přijímač R1 se nacházel v první řadě, druhý přijímač R2 ve třetí řadě a třetí přijímač R3 v páté řadě publika. V grafech A.44 až A.50, jsou znázorněny jednotlivé akustické parametry pro každý z přijímačů R1, R2 a R3.

Výpočtem bodové odezvy pro přijímače v mřížce jsme získali vizualizaci parametrů v celém prostoru. Tyto vizualizace jednotlivých parametrů jsou na obrázcích A.51 až A.57.

Analýza reprodukováného ozvučení prostoru

Volba správného ozvučení prostoru bude hrát velkou roli. Například v případě nouzového hlášení je nutné, aby ve všech místech bylo hlášení slyšitelné a srozumitelné. To se zajistí požadavkem vyrovnaného akustického tlaku v celém prostoru a dle normy ČSN 73 0527 [19], je nutné dodržet doporučení, aby v jakémkoliv místě poslechu převažovala intenzita přímého zvuku nad intenzitou odražených vln.

Dodržení těchto požadavků se zajistí správnou volbou počtu zdrojů, jejich směrových charakteristik v kombinaci s jejich rozmístěním, orientací a výkonem.

Jak bylo zmíněno v kapitole 3.1 Zdroje a přijímače zvuku, ODEON nabízí možnost využití formátu CLF pro simulaci reproduktorů dostupných na trhu. V našem případě využijeme katalogu CLF, který ODEON nabízí a použijeme základní unidirekcionální reproduktor Bosch LB UW_06_Fx s výkonem 6 W. Hladina akustického výkonu tohoto zdroje je $L_{W,A} = 101,6$ dB.

Celkem jsme využili 9 těchto reproduktorů rozmístěných v prostoru podle obrázku A.60. Po provedení analýzy dostaneme výsledky na obrázcích A.61 až A.66. Obrázek A.61 ukazuje míru přímého zvuku C_7 , která, jak bylo zmíněno v kapitole 2.6 Kvalitativní parametry přenosu, udává poměr energie zvuku přicházejícího do 7 ms k energii od 7 ms. Z grafu A.62 distribuční funkce můžeme vidět, že míra přímého zvuku pro 5. percentil dosahuje hodnoty $C_7 = -11,1$ dB, což lze považovat za dostatečné pro sílu přímého zvuku. Na obrázku A.63 můžeme vidět, jak je akustický tlak vyrovnaný ve všech místech, kde očekáváme posluchače. Obrázek A.65 ukazuje vizualizaci rozložení indexu srozumitelnosti STI . Nejnižší hodnota STI , které prostor nabývá je 0,57. Tato hodnota odpovídá „Dostačující“ subjektivní srozumitelnosti a dle doporučení minimální úrovni srozumitelnosti z tabulky 4, tak vyhovuje doporučení normy ISO 9921:2003.

4.5 Zhodnocení výsledků podle doporučení ČSN

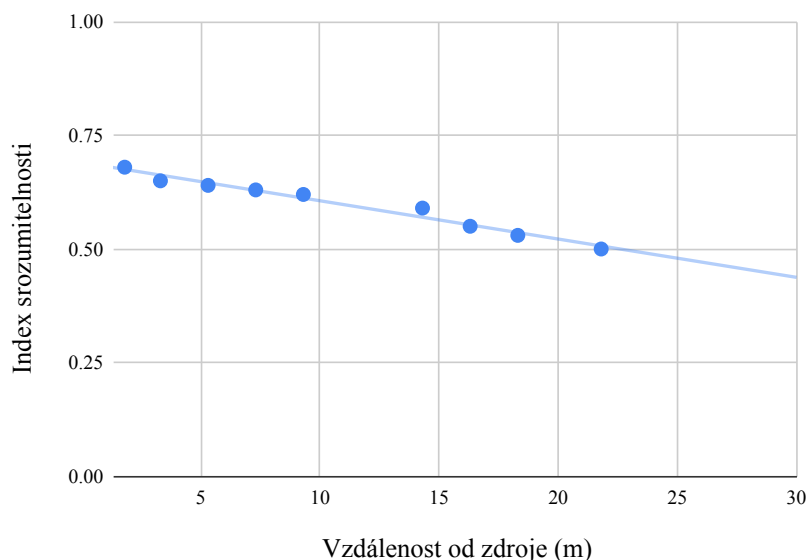
Dle doporučení českých technických norem ČSN 73 0525 [18] a 73 0527 [19] by měl náš prostor splňovat určité předpoklady pro zajištění dobré akustiky. Tyto předpoklady jsou závislé na druhu využití prostoru a jsou jimi objem místnosti, poměr stěn v prostoru, doba dozvuku a mnohé další.

Prostor FEL Caffé je většinu času využíván jako studovna/kavárna. Pro případ studovny a čítárny nemá norma ČSN 73 0527 [19] na dobu dozvuku T_0 , tedy ani toleranční pásmo, neboli přípustné rozmezí dob dozvuku T/T_0 , stanovená doporučení. Důležitou doporučenou hodnotou je zde přípustný hluk pozadí čítárny a studovny, který by podle doporučení neměl přesahovat hodnotu $L_{pAeq} = 40$ dB. Ekvivalentní hladina akustického tlaku se využívá pro hluky s ustáleným charakterem. V případě občasných hluků, či hluků s proměnným charakterem je vhodnější určovat maximální hladinu akustického tlaku. V takovém případě, lze doporučený limit zvýšit o 3 až 5 dB. Na studovnu/kavárnu lze pohlížet jako na prostor otevřené kanceláře, pro který obsahuje doporučení norma ČSN EN ISO 3382-3 [21]. Ta udává, že otevřené kanceláře lze hodnotit i jinými parametry, které se měří všesměrovým zdrojem ve výšce hlavy osoby, tedy 1,2 m, o hladině akustického výkonu $L_{W,S} = 68,4$ dB, který je umístěn ve vzdálenosti minimálně 0,5 m od stolů a minimálně 2,0 m od stěn.

Těmito parametry a jejich ideálními hodnotami jsou vzdálenost rušení $r_d \leq 5$ m, a hladina akustické tlaku řeči v 4 m od zdroje zvuku $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB.

Z měřicí linie na obrázku A.58 vybereme 6 až 10 pracovních míst, pro které zpracujeme regresní přímkou hodnot indexu srozumitelnosti STI jako

funkce vzdálenosti. Z té můžeme odečíst hodnoty vzdálenosti rušení r_d pro $STI = 0,50$ a vzdálenosti soukromí r_s pro $STI = 0,20$. V běžných prostorech se může stát, že vzdálenost soukromí nelze stanovit, pokud je ve všech bodech měření $STI > 0,20$. Tak je tomu i v našem případě. Vzdálenost rušení nabývá hodnoty $r_d = 22,5$ m.



Obrázek 23: Regresní přímka hodnot STI jako funkce vzdálenosti

Z obrázku A.59 můžeme odečíst hladinu akustického tlaku řeči ve 4 m od zdroje zvuku $L_{p,A,S,4m} = 55,7$ dB. Studovna tedy neodpovídá optimálním akustickým podmínkám stanoveným pro otevřené kanceláře, nicméně jak je uvedeno v samotné normě [21], tak většina otevřených kanceláří má špatné nebo nedostatečné akustické podmínky a otevřené kanceláře s dobrými akustickými podmínkami jsou vzácné.

Pro ostatní případy využití, tedy jak workshopy/výstavy, tak i hudební produkci, lze prostor považovat za víceúčelový sál, který musí být přizpůsobený pro přenos živé hudby i řeči. Maximální objem místnosti doporučený pro přenos řeči a živé hudby z hlediska jejich akustického výkonu je pro řeč $V = 5000$ m³ a pro komorní hudbu také $V = 5000$ m³. V našem případě má prostor FEL Caffé vnitřní objem $V \approx 736$ m³ a je tedy menší než maximální doporučený. Akustický výkon zdrojů by měl být v obou případech tedy dostatečný pro ozvučení.

U prostor s objemem $V < 200$ m³ by se tvar místnosti měl podobat,

ne však rovnat krychli. Pro uzavřené prostory o objemu $V > 200 \text{ m}^3$ je doporučený poměr stěn 1 : 1,25 : 1,6 nebo 1 : 1,5 : 2,5 či 1 : 1,7 : 2,9 a zároveň žádný z rozměrů prostoru nesmí být celistvým násobkem jakéhokoliv ze zbývajících rozměrů. Prostor FEL Caffé má rozměry (v×š×d): 331×1378×1824 cm. Poměr stěn vyjde 1 : 4,2 : 5,5. Z důvodu komplexity prostoru FEL Caffé nebude požadavek na poměr stran místnosti hrát velkou roli i přes to, že doporučený poměr není dodržen. Doporučení je dodrženo alespoň z hlediska, že ani jeden z rozměrů není celistvým násobkem některého ze zbývajících rozměrů.

U případu studovny/kavárny jsme počítali, že prostor FEL Caffé je schopný při plném obsazení pojmout 94 osob. Tento počet odpovídá i doporučení ČSN 73 0527 [19], dle které je třeba ve víceúčelovém sále počítat 5 až 7 m^3 na 1 osobu. Prostor FEL Caffé má objem $V \approx 736 \text{ m}^3$. Při započítání vyššího limitu 7 m^3 na 1 osobu, dostaneme maximální doporučenou hodnotu 105 osob v místnosti.

Norma ČSN 73 0525 [18] udává optimální dobu dozvuku v závislosti na druhu využití a objemu prostoru. Pro objem prostoru FEL Caffé $V \approx 736 \text{ m}^3$ vychází optimální doba dozvuku pro řeč $T_0 = 0,78 \text{ s}$ a komorní hudbu $T_0 = 1,02 \text{ s}$. Norma ČSN 73 0527 [19] specifikuje optimální dobu dozvuku pro víceúčelové sály o objemu $500 < V < 20000 \text{ m}^3$ podle vzorce

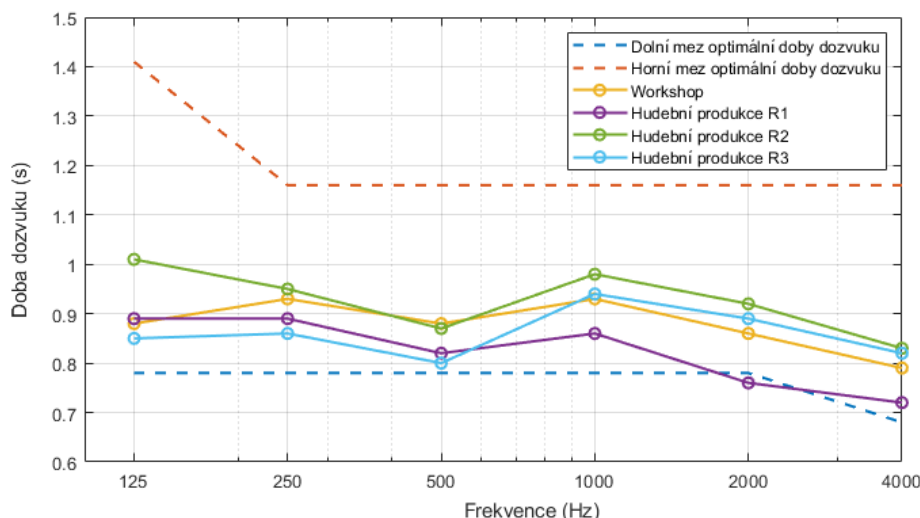
$$T_0 = 0,3582 \log V - 0,061, \quad (4.1)$$

kde V je objem místnosti. Pro prostor FEL Caffé vyjde tedy optimální doba dozvuku $T_0 = 0,97 \text{ s}$. V normě je také uvedeno přípustné rozmezí dob dozvuku T/T_0 prostor určených k přednesu hudby i řeči, ukázané v tabulce 12 společně s vypočtenými mezemi optimální doby dozvuku.

Tabulka 12: Přípustné rozmezí dob dozvuku T/T_0

Střední kmitočet oktávového pásma (Hz)	Dolní mez (-)	Horní mez (-)	Dolní mez optimální doby dozvuku (s)	Horní mez optimální doby dozvuku (s)
125	0,8	1,45	0,78	1,41
250	0,8	1,2	0,78	1,16
500	0,8	1,2	0,78	1,16
1000	0,8	1,2	0,78	1,16
2000	0,8	1,2	0,78	1,16
4000	0,65	1,2	0,63	1,16

Na obrázku 24 je vidět graf doby dozvuku T_{30} pro analyzované případy workshopu/výstavy a hudební produkce, v porovnání s přípustným rozmezím doby dozvuku daným normou ČSN 73 0527. Z grafu vidíme, že doba dozvuku pro všechny případy, kromě hudební produkce pro přijímač R1 na kmitočtu $f = 2000 \text{ Hz}$, spadá do doporučených mezí daných normou.



Obrázek 24: Doba dozvuku T_{30} analyzovaných případů v porovnání s doporučenými mezemi

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.6 Kvalitativní parametry přenosu norma ČSN 73 0525 udává doporučení i u dalších akustických parametrů. Pro míru jasnosti C_{80} uvádí optimální hodnotu v rozmezí 1 ± 2 dB. Tento parametr uvádí schopnost rozlišit jednotlivé tóny v rychlých hudebních pasážích. U akustické analýzy pro hudební produkci vyšla míra jasnosti podle tabulky 13.

Tabulka 13: Míra jasnosti C_{80} v případě hudební produkce

Oktávové pásmo (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Přijímač R1 (dB)	6,0	5,9	3,6	7,5	7,1	8,9	9,7	13,0
Přijímač R2 (dB)	4,2	4,1	3,5	6,9	6,2	7,5	8,1	10,3
Přijímač R3 (dB)	4,6	4,4	4,3	6,4	5,6	7,0	7,3	11,3

Žádná z hodnot míry jasnosti C_{80} tak nespadá do rozmezí optimálních hodnot daných normou, nicméně jak je uvedeno v [22], tak rozsah přípustných hodnot se liší dle interpretované hudby. Většina hodnot míry jasnosti se nachází v rozmezí 6 ± 2 dB či 4 ± 2 dB a prostor je tak vhodný pro interpretaci folkové, populární, či moderní rockové hudby.

Míra zřetelnosti C_{50} by měla nabývat hodnoty větší než 0 dB pro zajištění přijatelné srozumitelnosti. V tabulce 14 je přehled hodnot míry zřetelnosti C_{50} pro všechny případy využití prostor FEL Caffé.

Tabulka 14: Míra zřetelnosti C_{50} pro jednotlivé případy

Oktávové pásmo (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Studovna/kavárna (dB)	-1,2	-1,3	-1,9	-1,5	-1,9	-1,8	-1,1	0,9
Workshop/výstava (dB)	2,4	2,2	1,8	2,3	1,6	1,8	2,5	4,4
Hudební produkce - R1 (dB)	2,2	2,2	0,8	4,5	3,9	5,8	6,4	8,7
Hudební produkce - R2 (dB) (dB)	1,7	1,6	0,9	3,7	2,6	3,4	3,9	5,9
Hudební produkce - R3 (dB) (dB)	2,0	1,7	2,2	3,8	3,2	4,4	4,4	7,5

Jediným případem, nevyhovujícím doporučení norem, je využití prostor jako studovny, kde jsou zdroje zvuku rovnoměrně rozmístěny po celém prostoru. V takovém případě je podle [22] v místě příjemce, srozumitelnost řeči na stupnici subjektivního hodnocení označena pouze jako „uspokojivá“, tedy nabývá hodnot v rozmezí -4 až 1 dB. Pro ostatní případy lze, podle této stupnice hodnotit srozumitelnost řeči jako „dobrou“, pro níž míra zřetelnosti nabývá hodnot 2 až 7 dB.

Optimální hodnota času těžiště t_s pro koncertní sál nabývá hodnot mezi 120 a 140 ms. Podle normy ČSN EN ISO 3382-1 [20] se typické hodnoty pro hudbu pohybují v rozmezí 70 až 150 ms a pro řeč 60 až 80 ms. V tabulce 15 jsou uvedeny časy těžiště kvadrátu impulsní odezvy pro analyzované případy.

Tabulka 15: Čas těžiště t_s pro jednotlivé případy

Oktávové pásmo (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Studovna/kavárna (dB)	84	84	91	85	90	87	78	58
Workshop/výstava (dB)	52	53	57	53	59	57	51	38
Hudební produkce - R1 (dB)	49	48	54	35	40	29	26	17
Hudební produkce - R2 (dB) (dB)	61	61	61	44	52	48	44	35
Hudební produkce - R3 (dB) (dB)	62	61	61	44	49	41	40	25

Zde vidíme, že hodnoty času těžiště t_s nabývají hodnot nižších než je typické.

5 Závěr

Cílem teoretické části bylo seznámit se s prostorovou akustikou, jejími parametry, metodami určení parametrů a jejich interpretací. Dále se seznámit s metodami počítačového modelování a jejich základní analýzou. Byly zde rozebrány tři metody prostorové akustiky, tedy geometrická, vlnová a statistická, dále akustické vlastnosti materiálů, zejména pak činitel akustické pohltivosti a činitel rozptylovosti. U impulsní odezvy byly popsány tři způsoby jejího určení a dále využití těchto způsobů. Značná část byla věnována době dozvuku, jakožto klíčovému parametru prostorové akustiky. Následně byla rozebrána nutnost využití kmitočtových pásem a v neposlední řadě byla

část práce věnována kvalitativním parametrům přenosu zvuku, jejich výpočtu a interpretaci.

Cílem praktické části bylo vytvořit model prostoru FEL Caffé pro tři případy využití s variacemi a na nich provést akustickou analýzu s vizualizací, grafickým vyhodnocením a zhodnocení z pohledu požadavků doporučení ČSN. Modelování bylo provedeno pro tři případy využití, tedy pohled studovny, pořádání workshopu a konání hudební produkce. U případu studovny jsme také zkoumali variace při změně obsazenosti a jejím vlivu na dobu dozvuku. Do analýz bylo zahrnuto i doporučení na vhodné ozvučení prostoru pro nouzové signály a hlášení. Všechny akustické analýzy proběhly v pořádku a vyšly očekávané výsledky. Při porovnání s hodnotami, které udávají doporučení ČSN, většina hodnot vychází v normě. Akustické parametry vycházející mimo doporučené optimální hodnoty jsou v práci zhodnoceny a prostor by mohl užít akustických úprav a jejich následné simulace a analýzy.

Zadání bakalářské práce bylo tedy splněno a dalším možným krokem v této problematice, by byl návrh možných akustických úprav, jejich případná simulace a provedení.

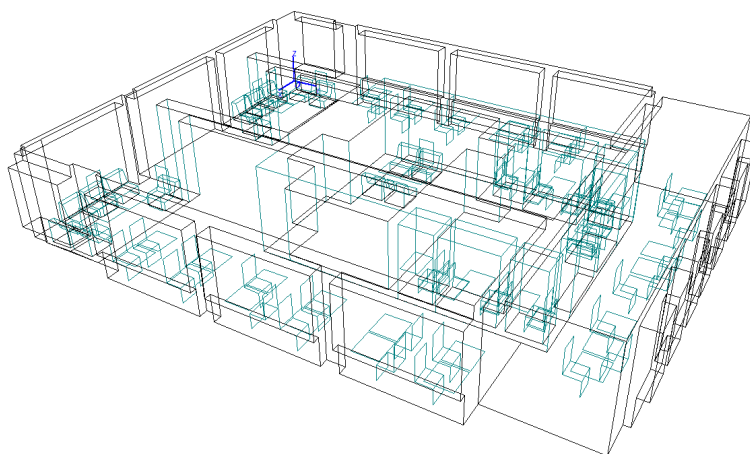
Použitá literatura

- [1] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1.
- [2] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. ISBN 04-514-80
- [3] FEYNMAN, Richard. Lectures in Physics, Volume 1, Chapter 47 *Sound. The wave equation*. Caltech, 2011. ISBN 978-0-465-02493-3
- [4] KUTTRUFF, Heinrich. *Room Acoustics*. 4. vyd. Londýn: Spon Press, 2000. ISBN 0-203-18623-0.
- [5] RINDEL, Jens Holger. The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. *Journal of vibroengineering*. 2000, 3(4), 219-224. ISSN 1392-8716.
- [6] BALÍK, Miroslav. *Použití analyzátoru MLSSA a příklady měření impulsových odezev v prostorách Purkyňova 118* [online]. *Elektrorevue*, 2003, č. 26. [cit. 8.1.2020]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03026/index.html>.
- [7] HEE, Jens. *Impulse response measurements using MLS*. [online]. 2003 [cit. 8.1.2020]. Dostupné z: <http://jenshee.dk/signalprocessing/mls.pdf>.
- [8] TUČEK, Jan. *Měření impulsové odezvy v akustice*. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra fyziky.
- [9] SCHROEDER, Manfred R. *New method of measuring reverberation time*. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1965, 37, 409. DOI 10.1121/1.1909343.
- [10] HAK, C. C. J. M., WENMAEKERS, R. H. C., LUXEMBURG, van, L. C. J. *Measuring room impulse responses : impact of the decay range on derived room acoustic parameters*. *Acta Acustica united with Acustica*. 2012, 98(6), 907-915. DOI 10.3813/AAA.918574.
- [11] BURDA, Jan. *Návrh a měření parametrů akustických difúzních prvků*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [12] ODEON APPLICATION NOTE - Calculation of speech transmission index in rooms [online]. 2014 [cit. 7. 12. 2019]. Dostupné z: https://odeon.dk/pdf/Application_Note_SpeechTransmissionIndex.pdf.

- [13] ODEON Room Acoustics Software - User's Manual. Version 14 [online]. 2018 [cit. 12. 1. 2020]. Dostupné z: https://odeon.dk/download/Version14/ODEON_Manual.pdf.
- [14] CHRISTENSEN, Claus Lyngge a Jens Holger RINDEL. *A new scattering method that combines roughness and diffraction effects* [online]. Forum Acusticum, 2005 [cit. 12. 1. 2020]. Dostupné z: https://www.eecs.yorku.ca/course_archive/2005-06/W/6335/feb20/CLC%20fa2005.pdf.
- [15] CHRISTENSEN, Claus Lyngge, NIELSEN, Gry Bælum a Jens Holger RINDEL. *Diffraction around corners and over wide barriers in room acoustic simulations*. The 16th International Congress on Sound and Vibration 2009, ICSV 2009. 2.
- [16] PIERCE, Allan. *Diffraction of sound around corners and over wide barriers*. Journal of The Acoustical Society of America, 1974, 55(5), 941-955 . DOI 10.1121/1.1914668.
- [17] ČSN EN ISO 9921. *Ergonomie - Hodnocení řečové komunikace*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [18] ČSN 73 0525. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [19] ČSN 73 0527. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely* Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [20] ČSN EN ISO 3382-1. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči* Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [21] ČSN EN ISO 3382-3. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 3: Otevřené kanceláře* Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [22] BURDA, Jan. *Řešení akustiky vnitřního prostředí s použitím softwaru ODEON AUDITORIUM* [online]. 2018 [cit. 10. 1. 2020]. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/řešen%C3%AD-akustiky-vnitřn%C3%ADho-prostřed%C3%AD-s-použit%C3%ADm-softwaru-odeon-auditorium-811>.

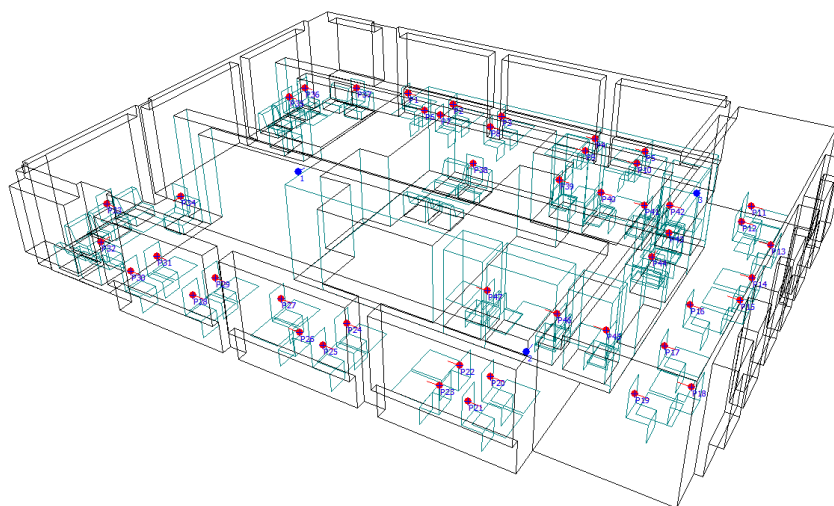
- [23] HARCINIK, Jan a Barbora FRÁŇKOVÁ. In: *Jan Harciník - architektura a urbanismus* [online]. [cit. 4. 5. 2020]. Dostupné z: <http://harcinik.kvalitne.cz/projekty/cafel.html>.
- [24] ČVUT FEL. [Putovní výstava k událostem...] In: *Facebook* [online]. 25. listopadu 2019 [cit. 4. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/CVUTFEL/posts/10157515936956259>.
- [25] SAMI FEL ČVUT. In: *sami.fel.cvut* [online]. [cit. 4. 5. 2020]. Dostupné z: <http://sami.fel.cvut.cz/synthchallenge2018/results/>.
- [26] HAMMOND, Ross, HILL, Adam a Peter MAPP. *On the accuracy of audience implementations in acoustic computer modelling*. 145th Convention of the Audio Engineering Society, At New York, USA [online]. 2018 [cit. 4. 5. 2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/339104672_On_the_accuracy_of_audience_implementations_in_acoustic_computer_modelling

A Přílohy



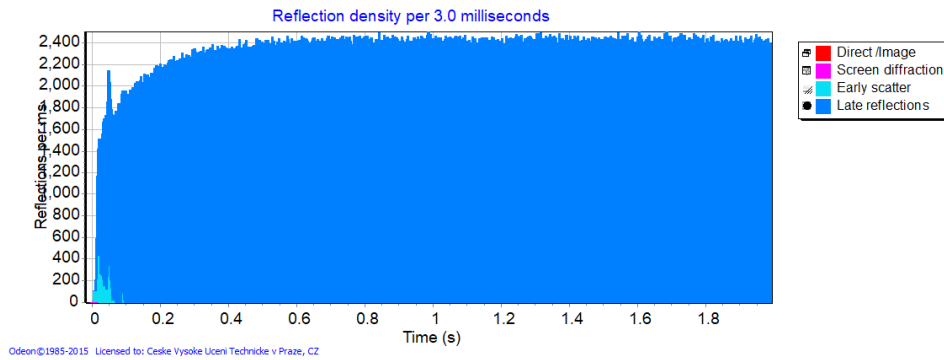
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucteni Technicke v Praze, CZ

Obrázek A.1: Model FEL Caffé upravený pro potřeby studovny/kavárny

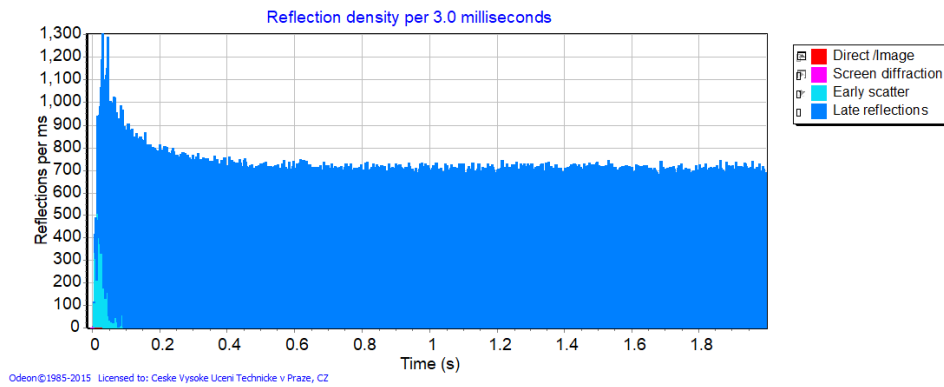


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucteni Technicke v Praze, CZ

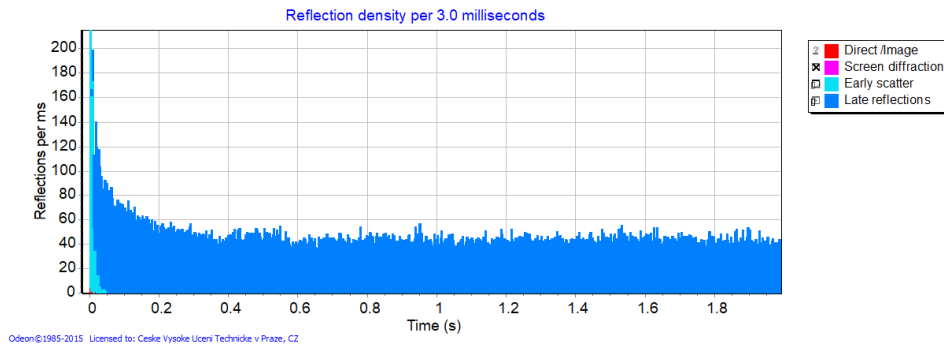
Obrázek A.2: Rozmístění zdrojů a přijímačů pro případ studovny/kavárny



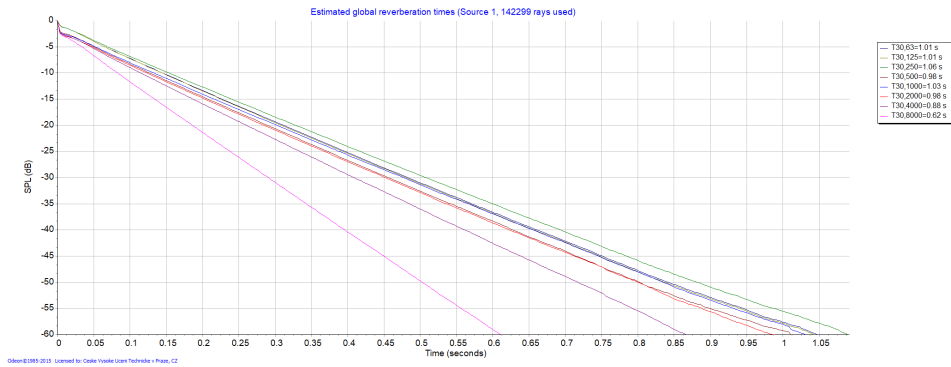
Obrázek A.3: Graf hustoty odrazů pro studovnu/kavárnu



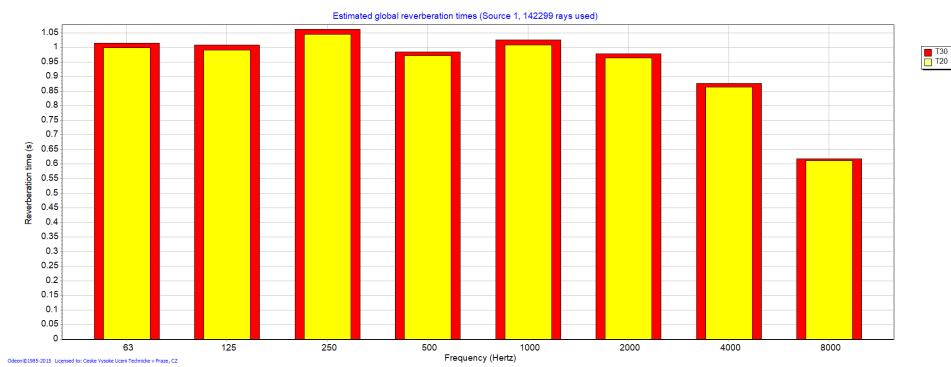
Obrázek A.4: Graf hustoty odrazů pro workshop/výstavu



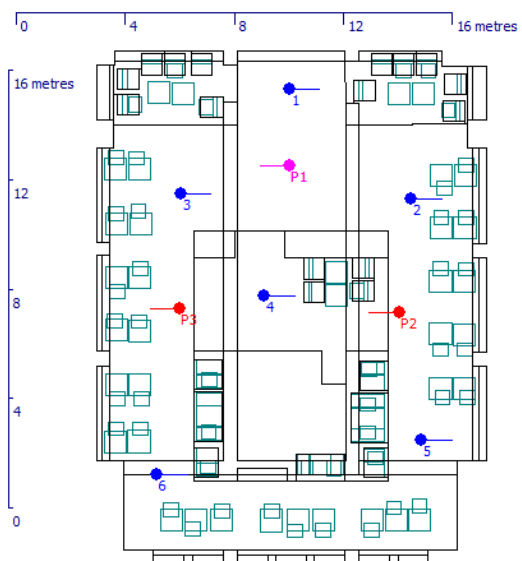
Obrázek A.5: Graf hustoty odrazů pro hudební produkci



Obrázek A.6: Vypočtená poklesová křivka pomocí *Global Estimate* pro případ studovny/kavárny

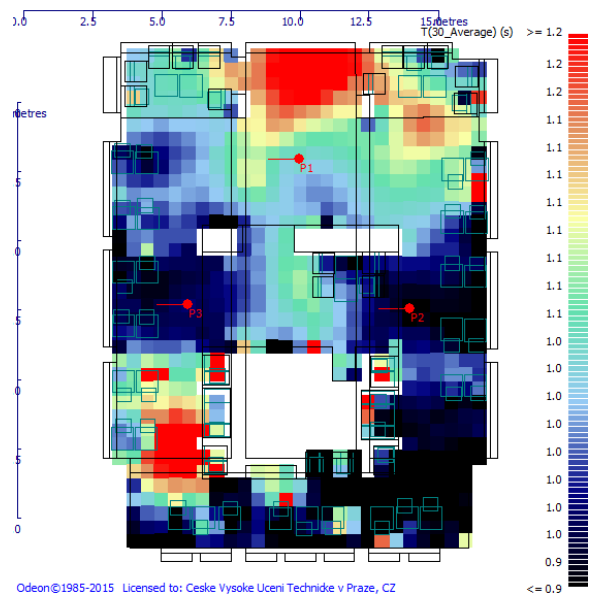


Obrázek A.7: Vypočtená doba dozvuku pomocí *Global Estimate* pro případ studovny/kavárny



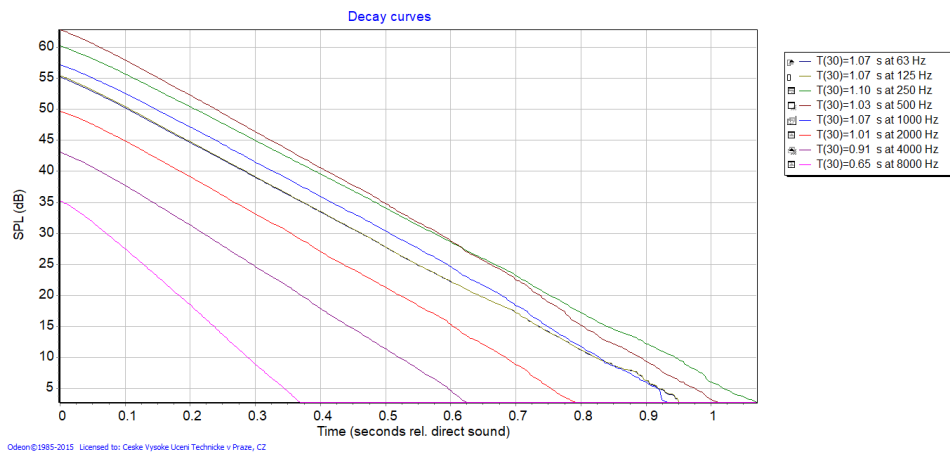
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.8: Rozestavení přijímačů a zdrojů po výpočet doby dozvuku u případu studovny/kavárny

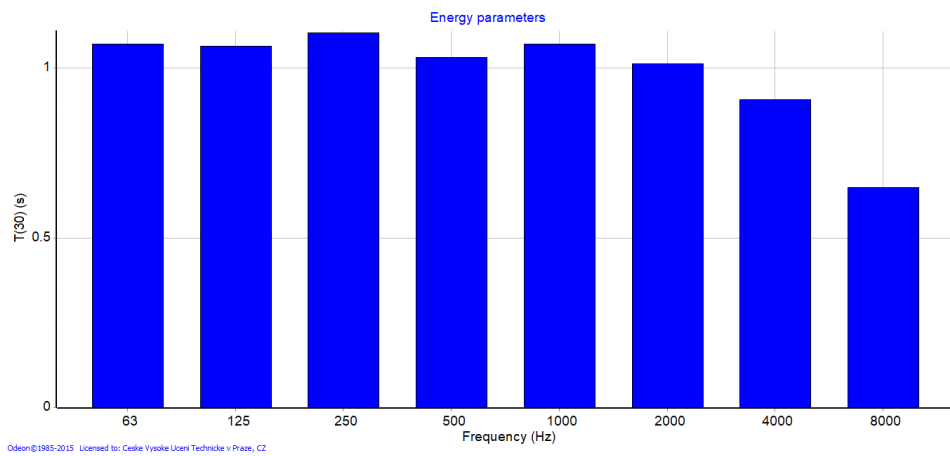


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

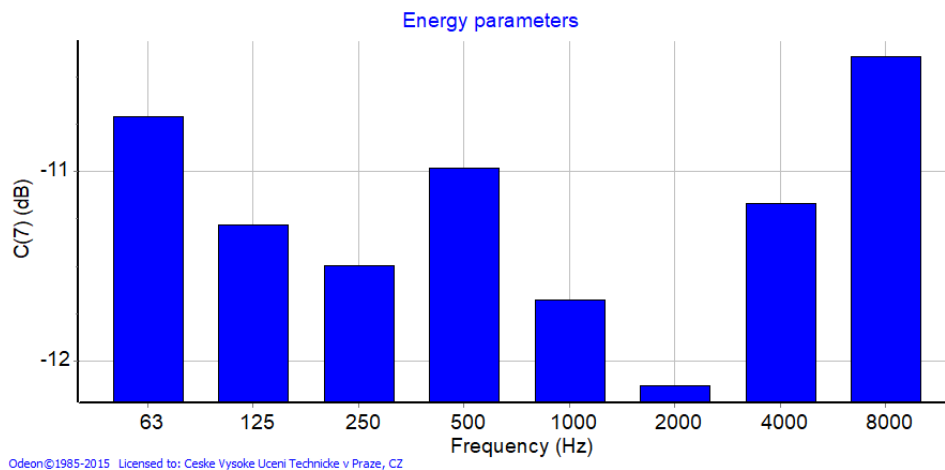
Obrázek A.9: Vypočtená doba dozvuku pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



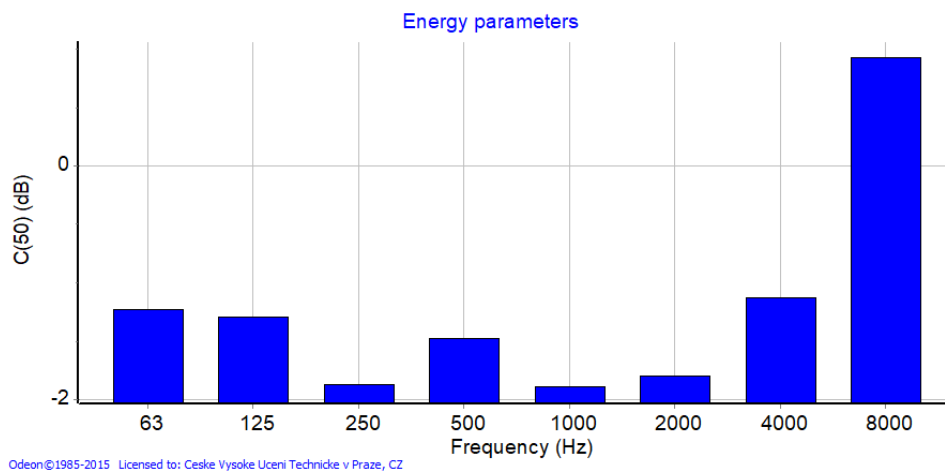
Obrázek A.10: Vypočtená poklesová křivka pomocí bodové odezvy pro případ studovny/kavárny



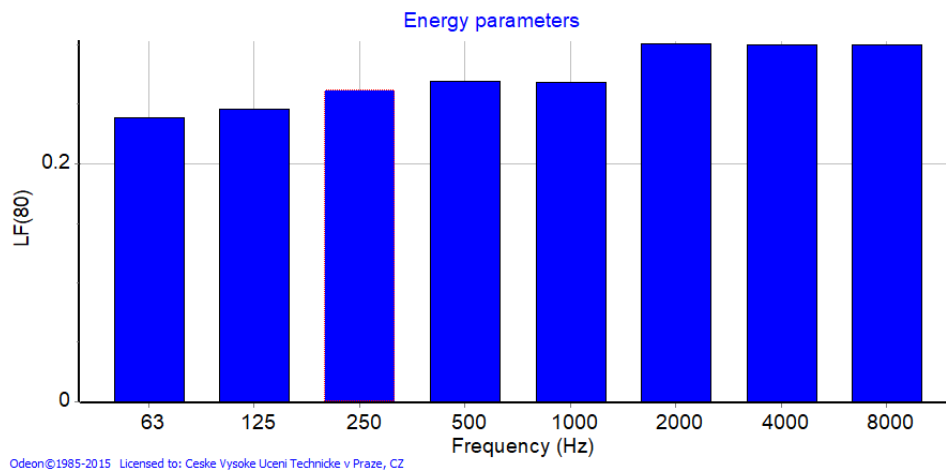
Obrázek A.11: Vypočtená doba dozvuku pomocí bodové odezvy pro případ studovny/kavárny



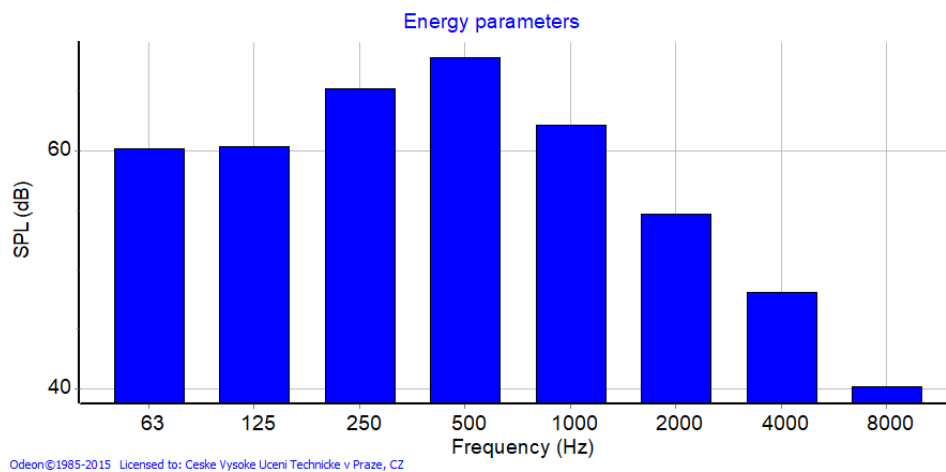
Obrázek A.12: Vypočtená míra přímého zvuku C_7 pomocí bodové odezvy pro případ studovny/kavárny



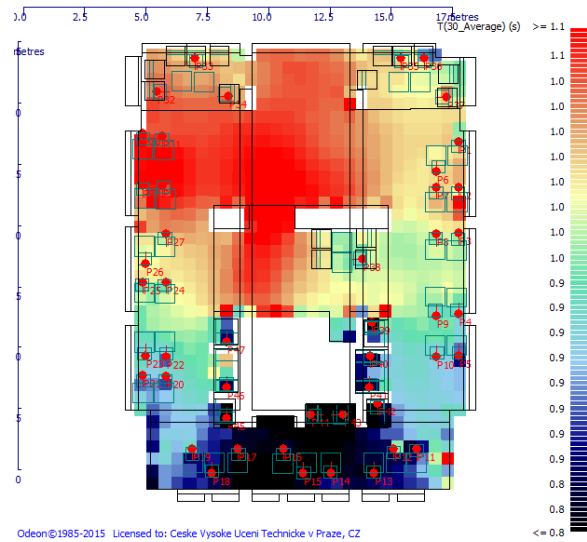
Obrázek A.13: Vypočtená míra zřetelnosti C_{50} pomocí bodové odezvy pro případ studovny/kavárny



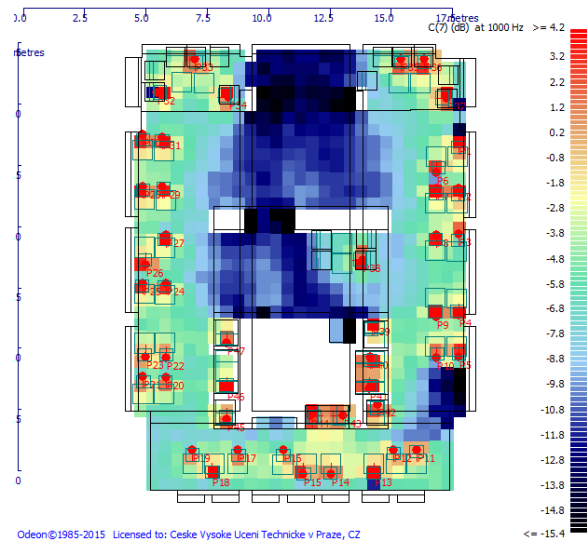
Obrázek A.14: Vypočtená míra boční energie LF_{80} pomocí bodové odezvy pro případ studovny/kavárny



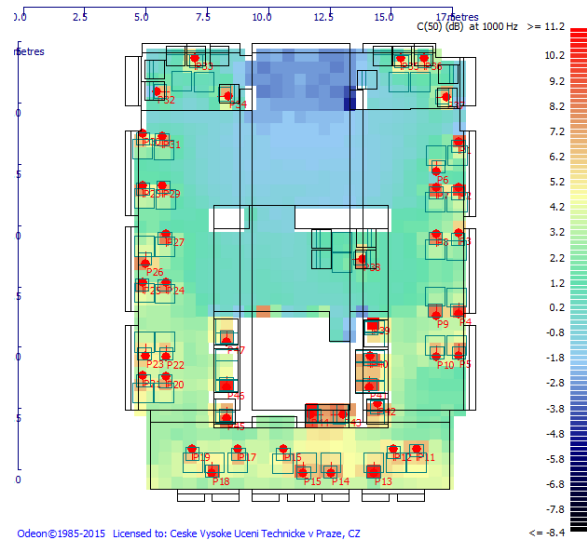
Obrázek A.15: Vypočtená hladina akustického tlaku SPL pomocí bodové odezvy pro případ studovny/kavárny



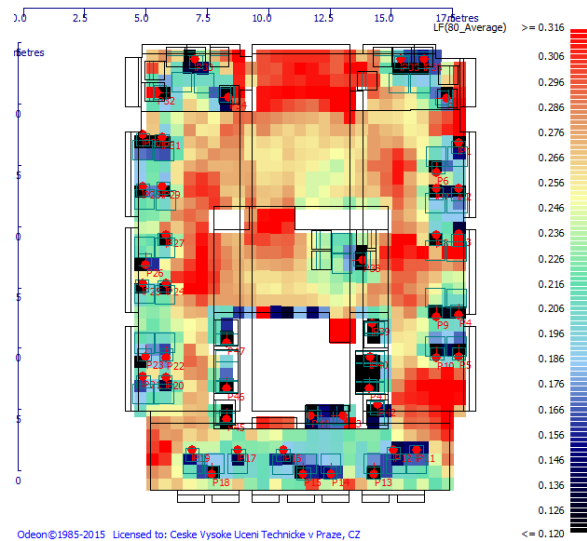
Obrázek A.16: Vypočtená průměrná doba dozvuku T_{30} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



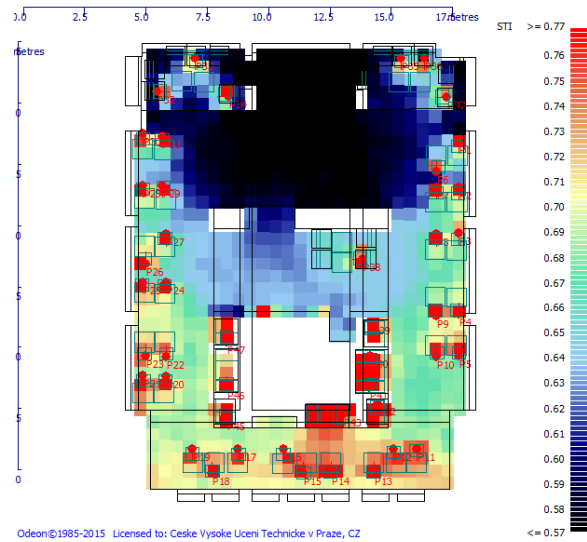
Obrázek A.17: Vypočtená míra přímého zvuku C_7 pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



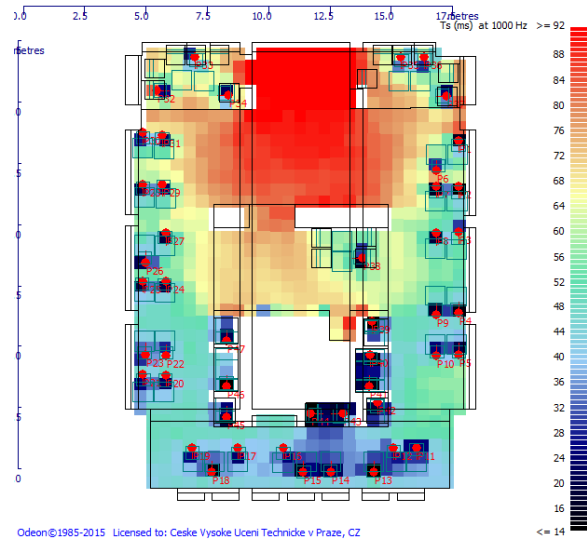
Obrázek A.18: Vypočtená míra zřetelnosti C_{50} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



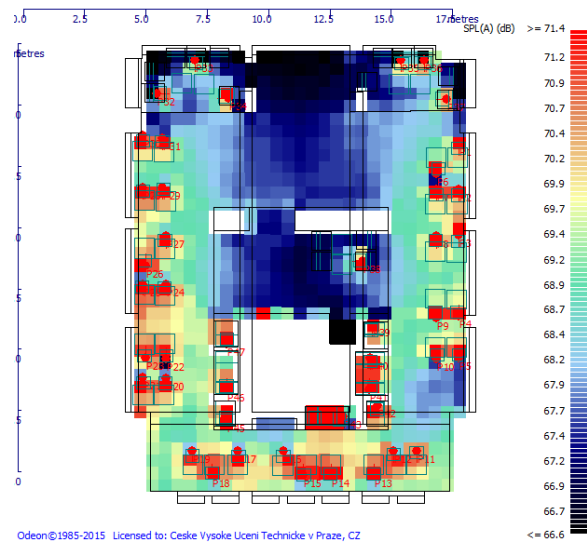
Obrázek A.19: Vypočtená průměrná míra boční energie LF_{80} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



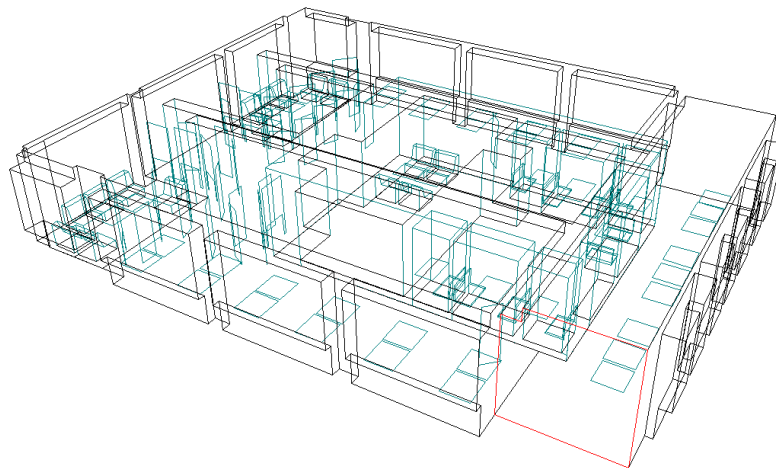
Obrázek A.20: Vypočtený index srozumitelnosti STI pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



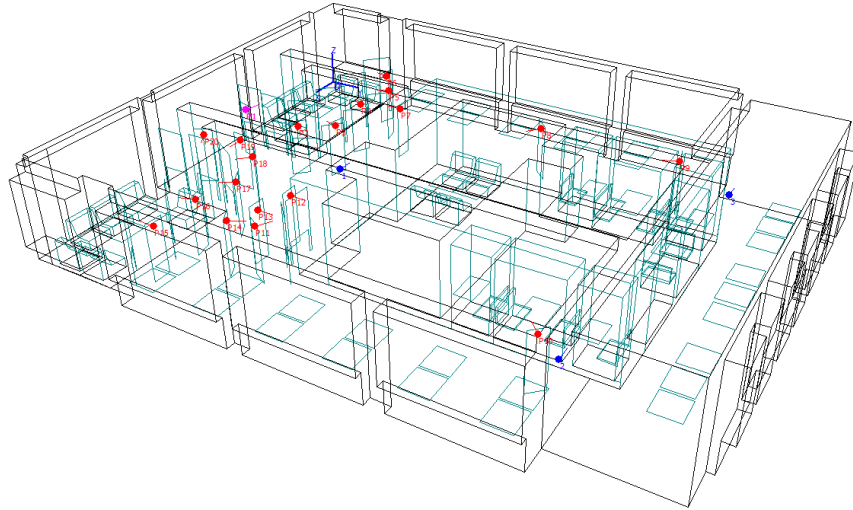
Obrázek A.21: Vypočtený čas těžiště t_s pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny



Obrázek A.22: Vypočtená hladina akustického tlaku $SPL(A)$ pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny/kavárny

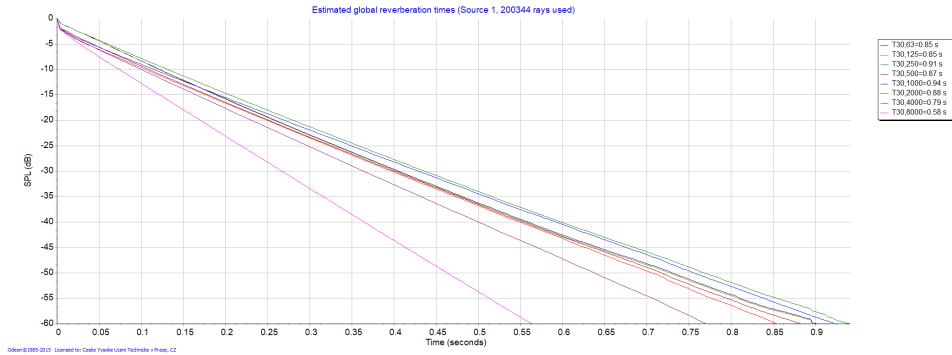


Obrázek A.23: Model FEL Caffé upravený pro potřeby workshopu/výstavy



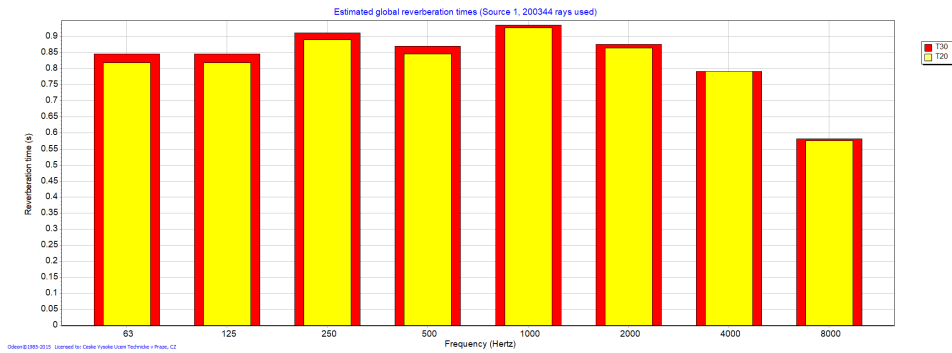
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.24: Rozmístění zdrojů a přijímačů pro případ workshopu/výstavy

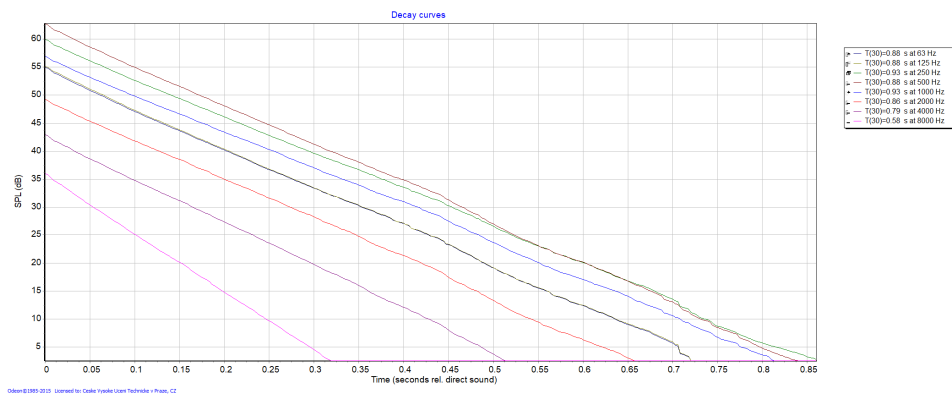


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

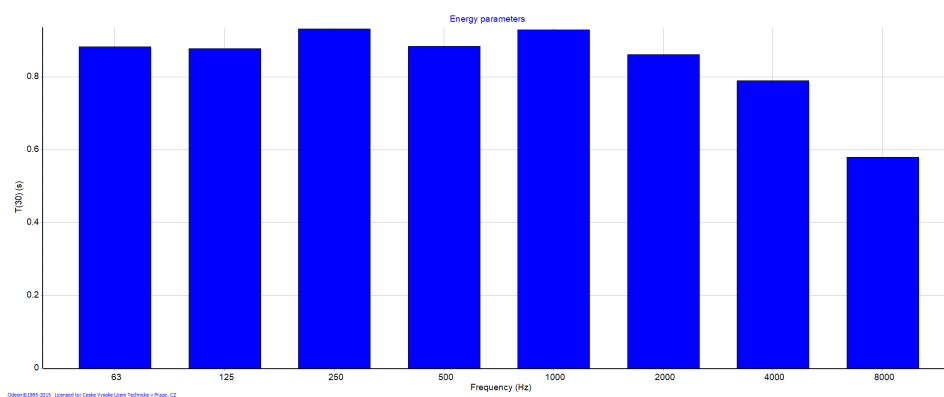
Obrázek A.25: Vypočtená poklesová křivka pomocí *Global Estimate* pro případ workshopu/výstavy



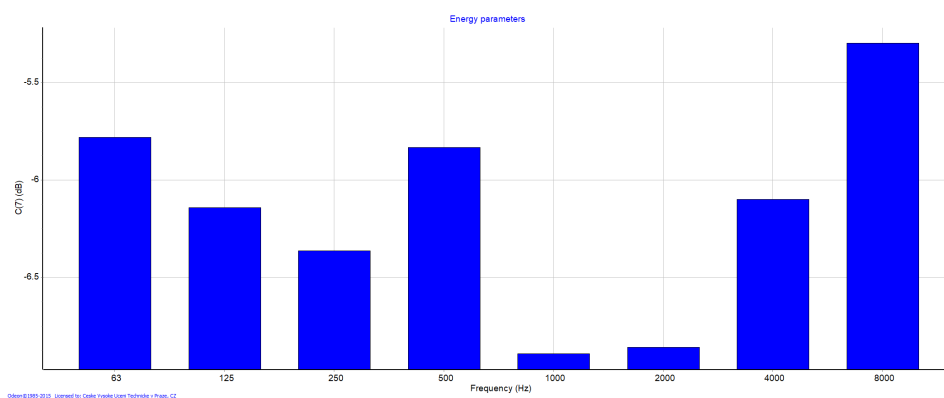
Obrázek A.26: Vypočtená doba dozvuku pomocí *Global Estimate* pro případ workshopu/výstavy



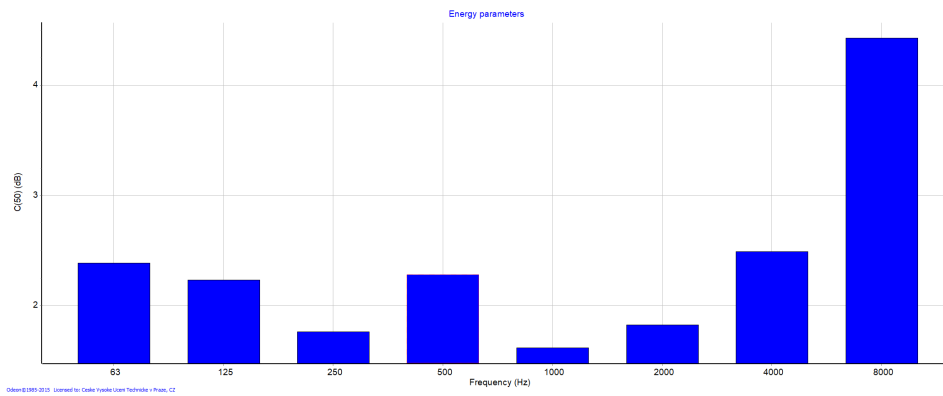
Obrázek A.27: Vypočtená poklesová křivka pomocí bodové odezvy pro případ workshopu/výstavy



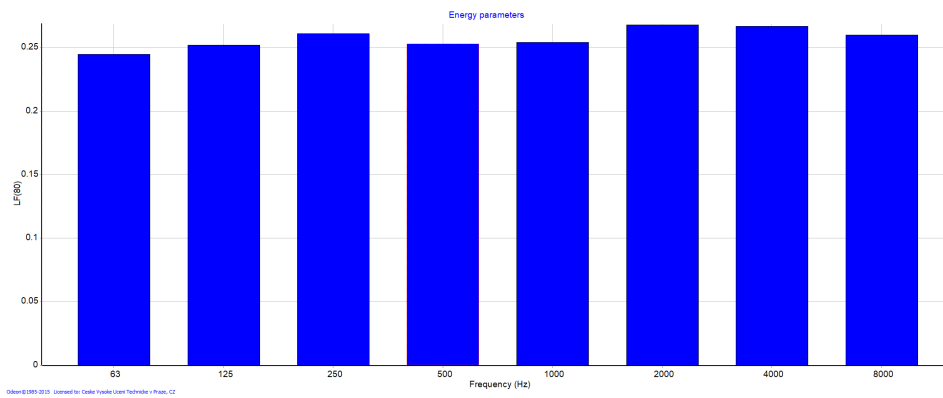
Obrázek A.28: Vypočtená doba dozvuku pomocí bodové odezvy pro případ workshopu/výstavy



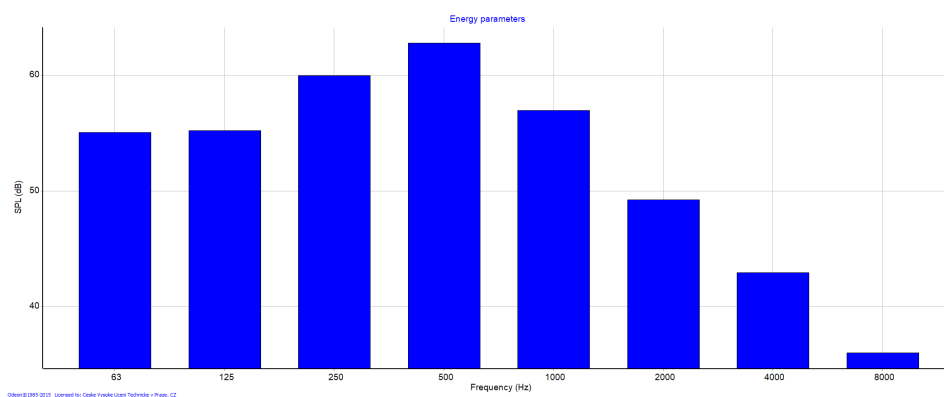
Obrázek A.29: Vypočtená míra přímého zvuku C_7 pomocí bodové odezvy pro případ workshopu/výstavy



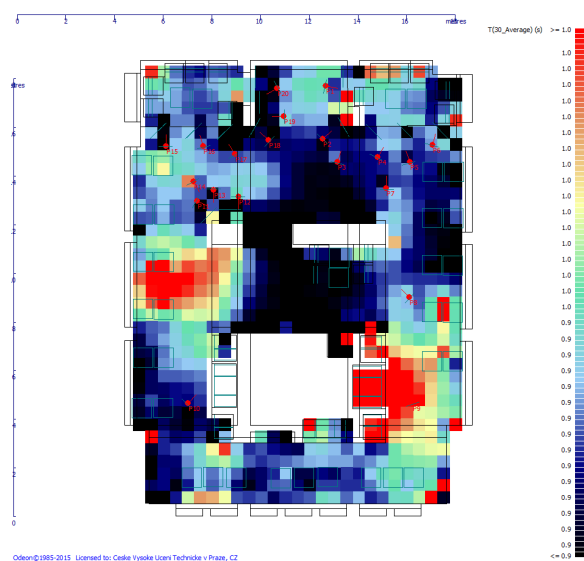
Obrázek A.30: Vypočtená míra zřetelnosti C_{50} pomocí bodové odezvy pro případ workshopu/výstavy



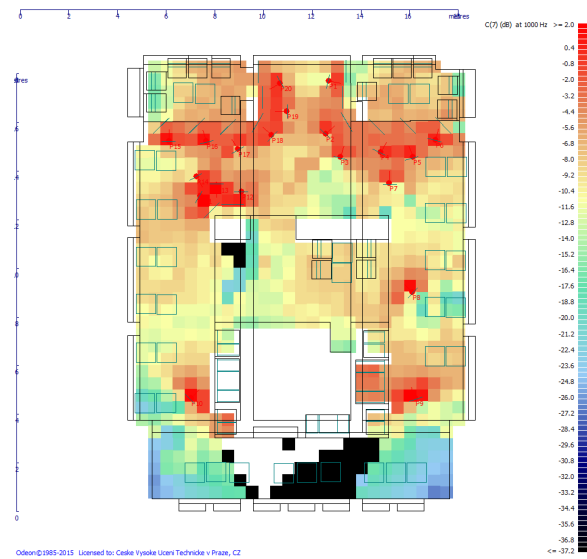
Obrázek A.31: Vypočtená míra boční energie LF_{80} pomocí bodové odezvy pro případ workshopu/výstavy



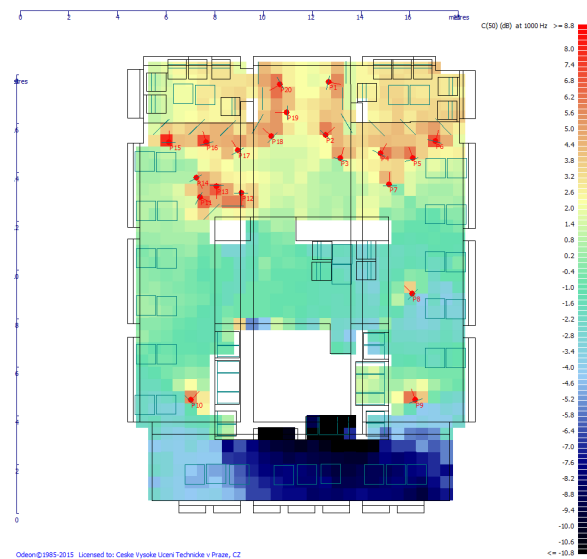
Obrázek A.32: Vypočtená hladina akustického tlaku SPL pomocí bodové odezvy pro případ workshopu/výstavy



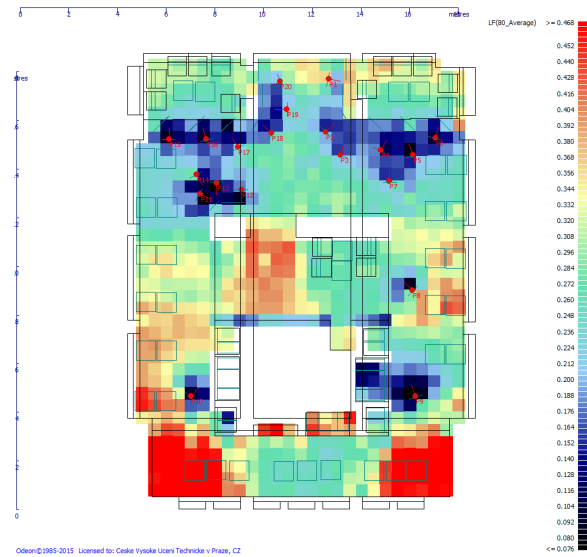
Obrázek A.33: Vypočtená průměrná doba dozvuku T_{30} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy



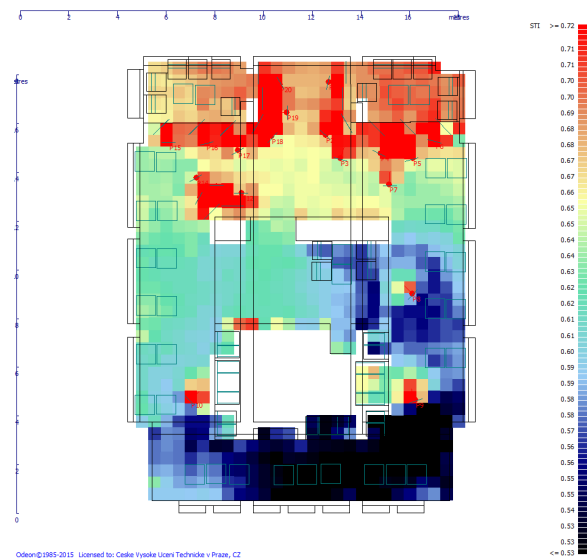
Obrázek A.34: Vypočtená míra přímé energie C_7 pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy



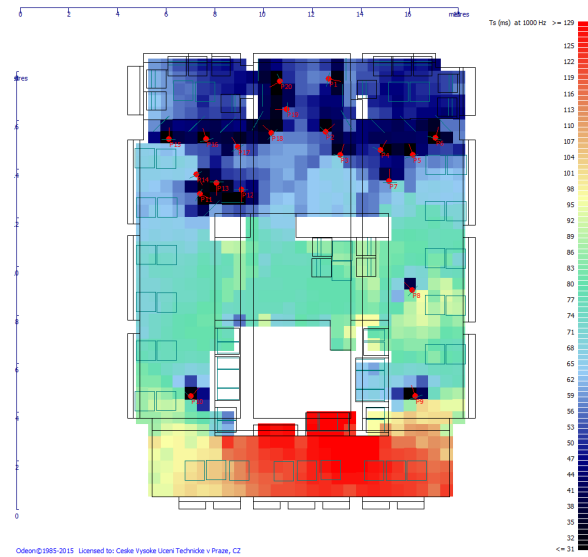
Obrázek A.35: Vypočtená míra zřetelnosti C_{50} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy



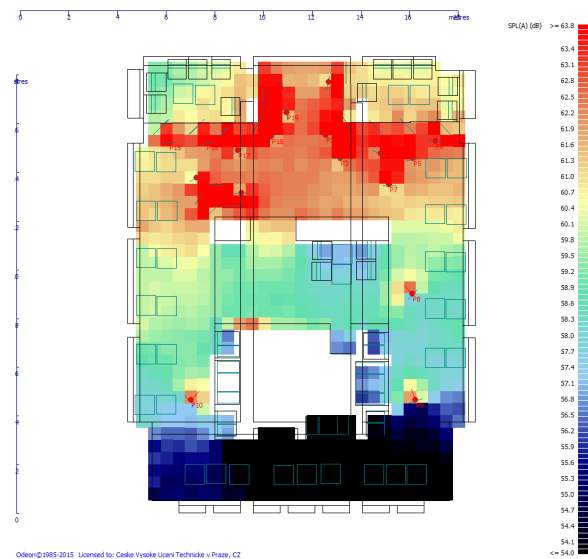
Obrázek A.36: Vypočtená průměrná míra boční energie LF_{80} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy



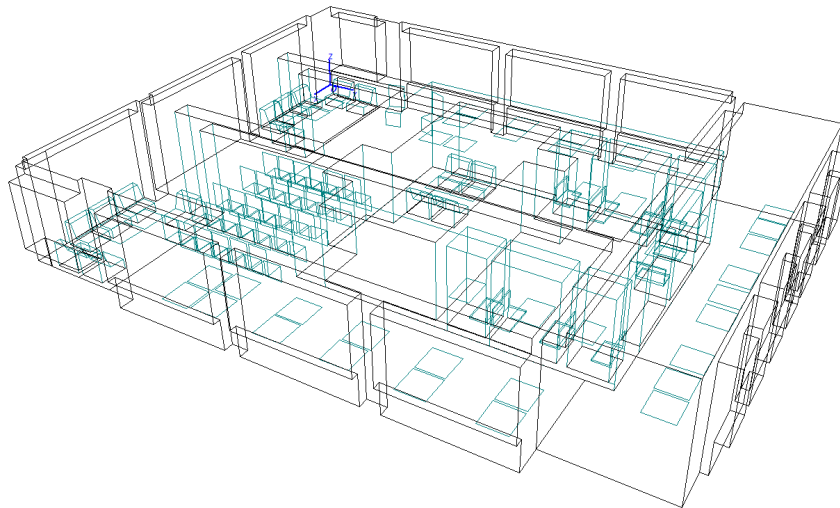
Obrázek A.37: Vypočtený index srozumitelnosti STI pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy



Obrázek A.38: Vypočtený čas těžiště t_s pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy

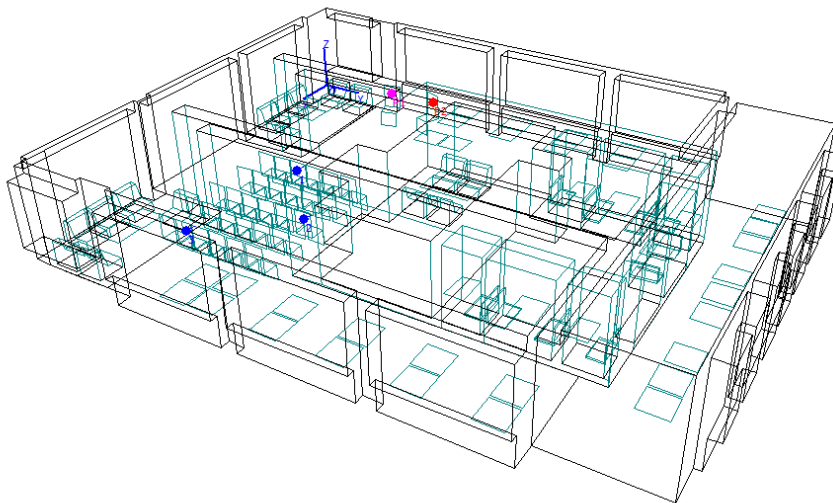


Obrázek A.39: Vypočtená hladina akustického tlaku $SPL(A)$ pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ workshopu/výstavy



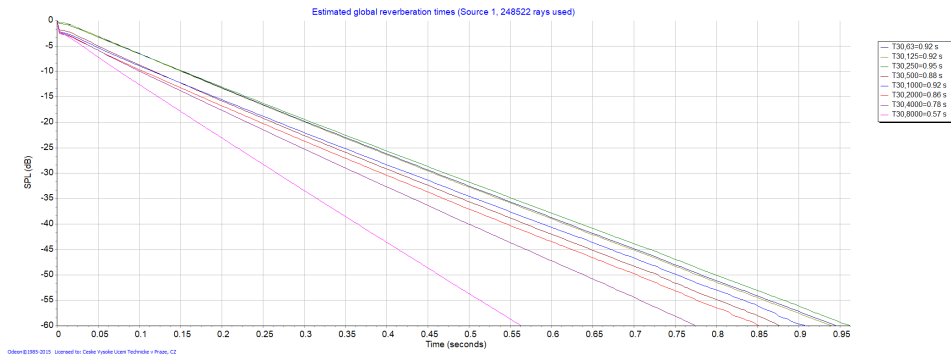
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.40: Model FEL Caffé upravený pro potřeby hudební produkce

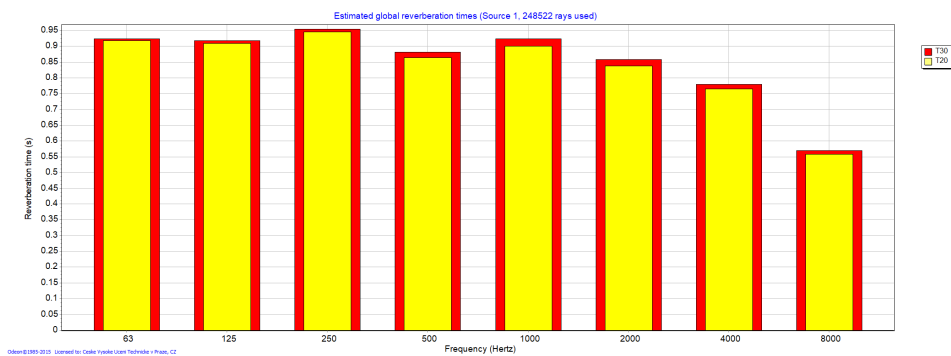


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

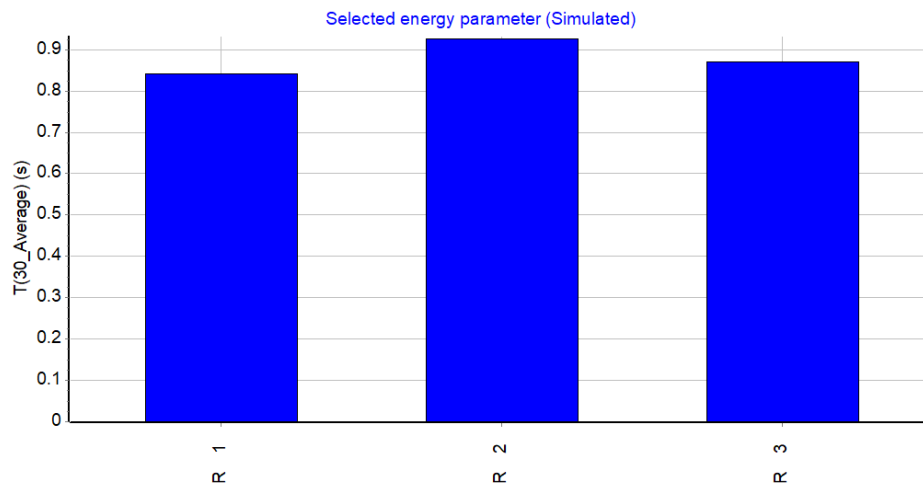
Obrázek A.41: Rozmístění zdrojů a přijímačů pro případ hudební produkce



Obrázek A.42: Vypočtená poklesová křivka pomocí *Global Estimate* pro případ hudební produkce

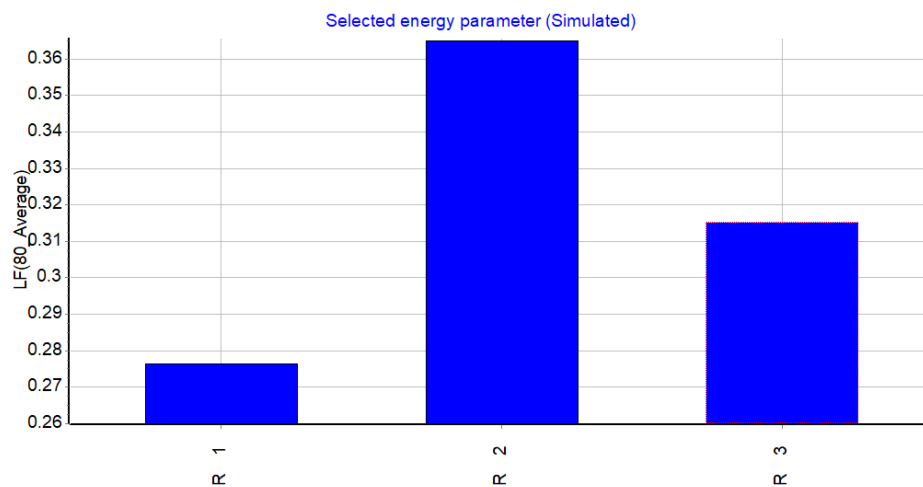


Obrázek A.43: Vypočtená doba dozvuku pomocí *Global Estimate* pro případ hudební produkce



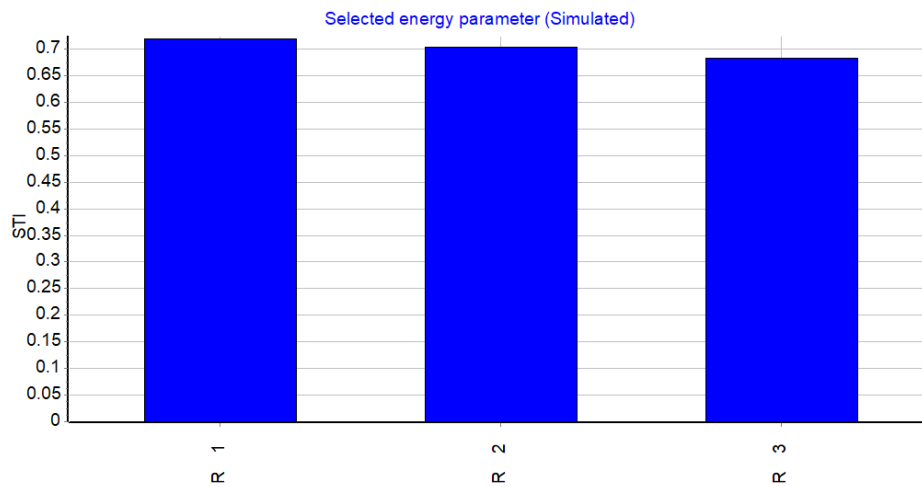
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.44: Vypočtená průměrná doba dozvuku tří bodových odezev pro případ hudební produkce



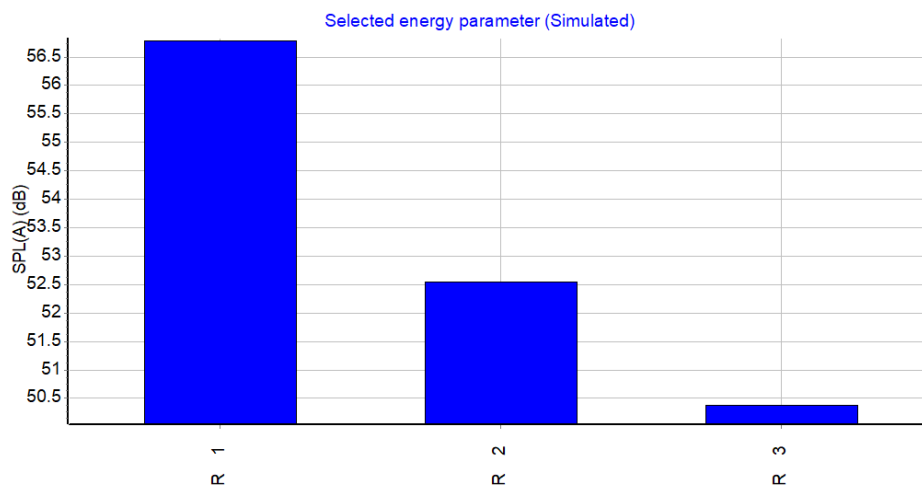
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.45: Vypočtená míra boční energie LF_{80} tří bodových odezev pro případ hudební produkce



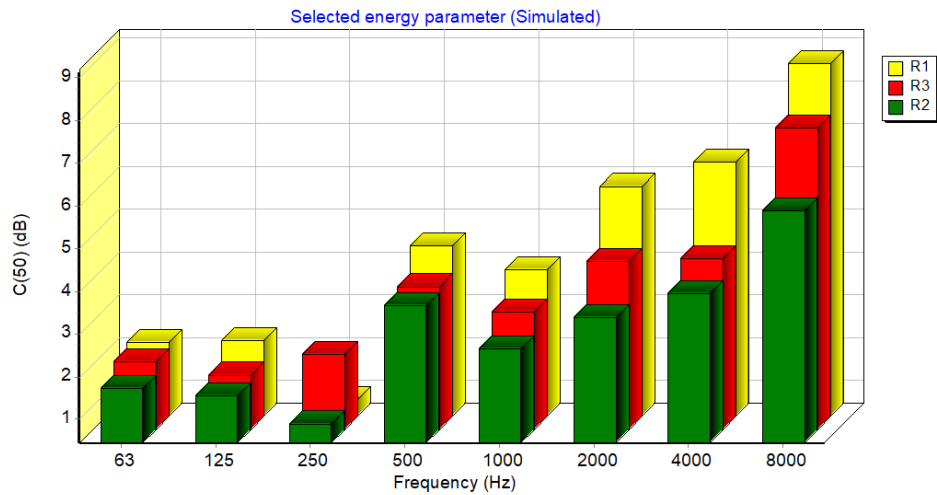
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.46: Vypočtený index srozumitelnosti STI tří bodových odezev pro případ hudební produkce

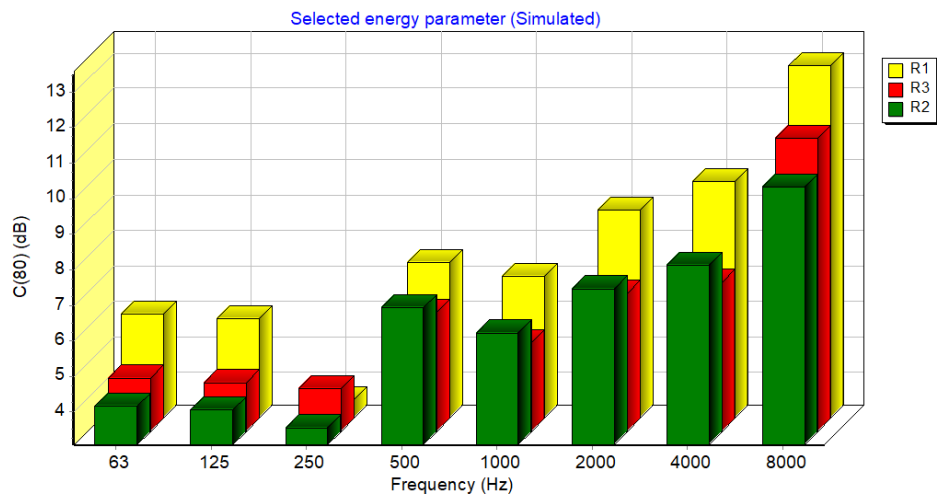


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

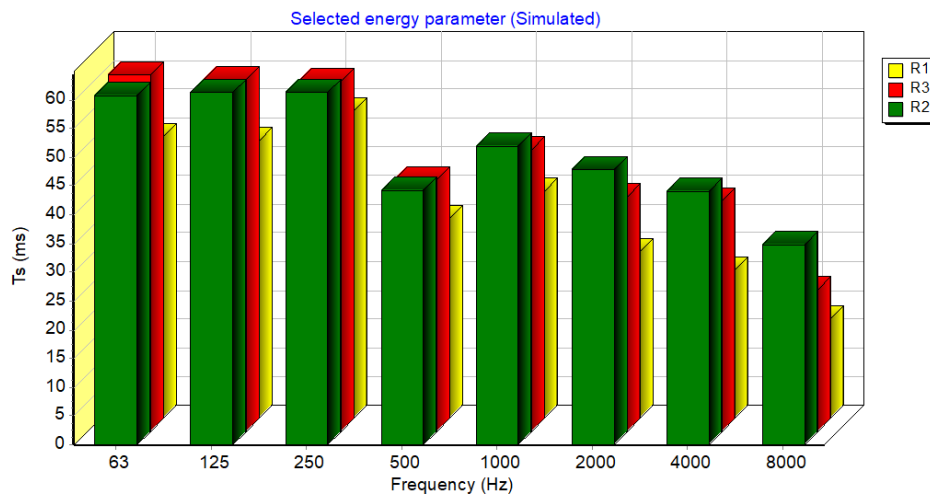
Obrázek A.47: Vypočtená hladina akustické energie $SPL(A)$ tří bodových odezev pro případ hudební produkce



Obrázek A.48: Vypočtená míra zřetelnosti C_{50} tří bodových odezav pro případ hudební produkce

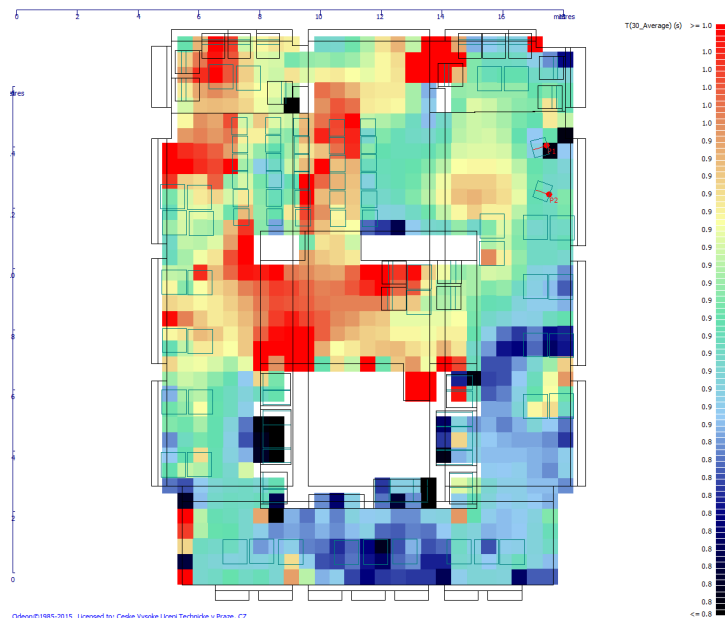


Obrázek A.49: Vypočtená míra jasnosti C_{80} tří bodových odezav pro případ hudební produkce



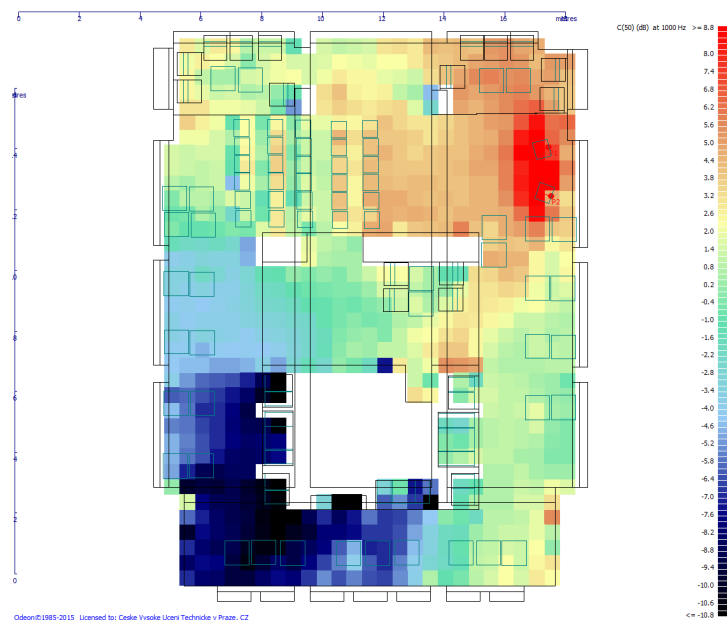
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.50: Vypočtený čas těžiště t_s tří bodových odezví pro případ hudební produkce

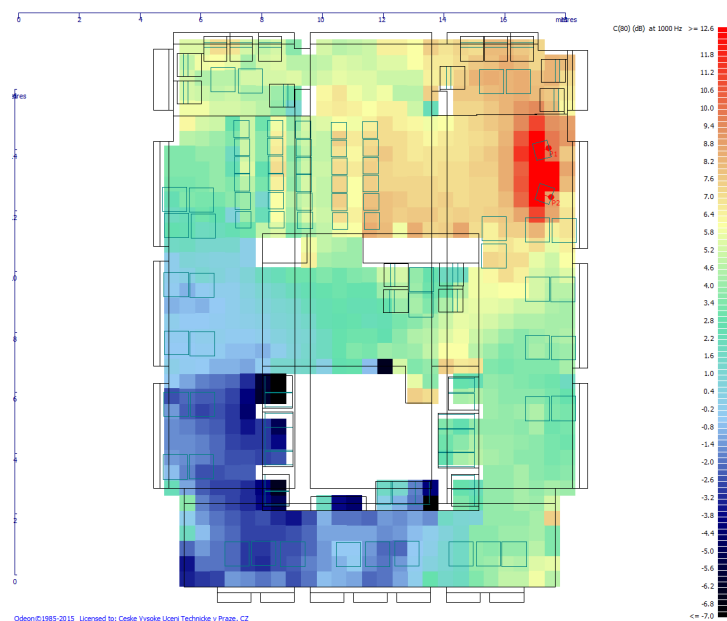


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

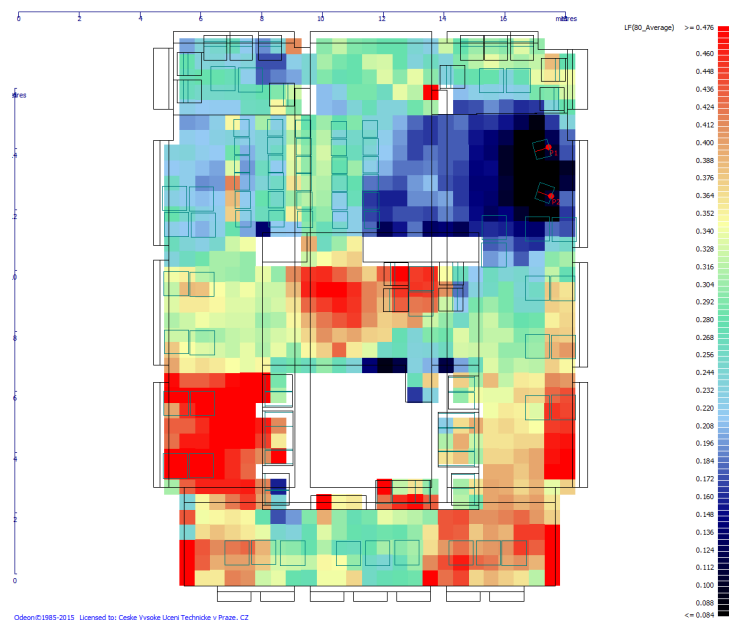
Obrázek A.51: Vypočtená průměrná doba dozvuku T_{30} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



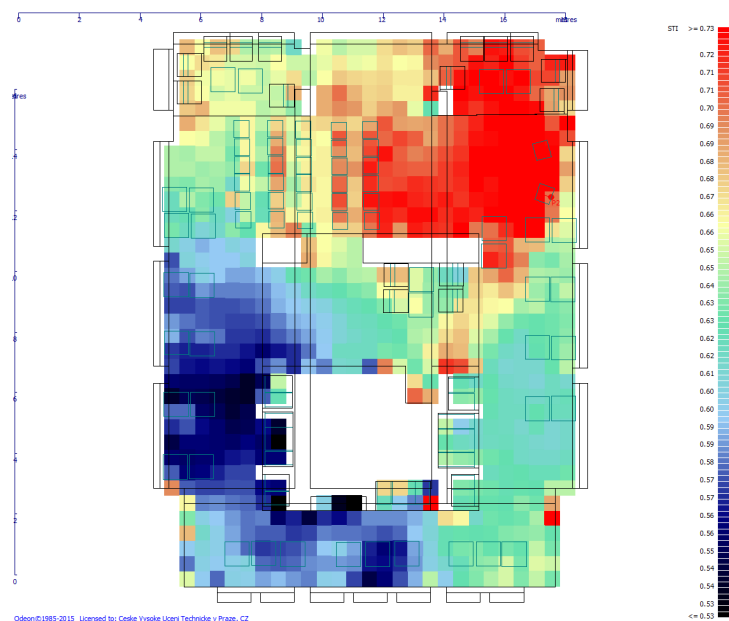
Obrázek A.52: Vypočtená míra zřetelnosti C_{50} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



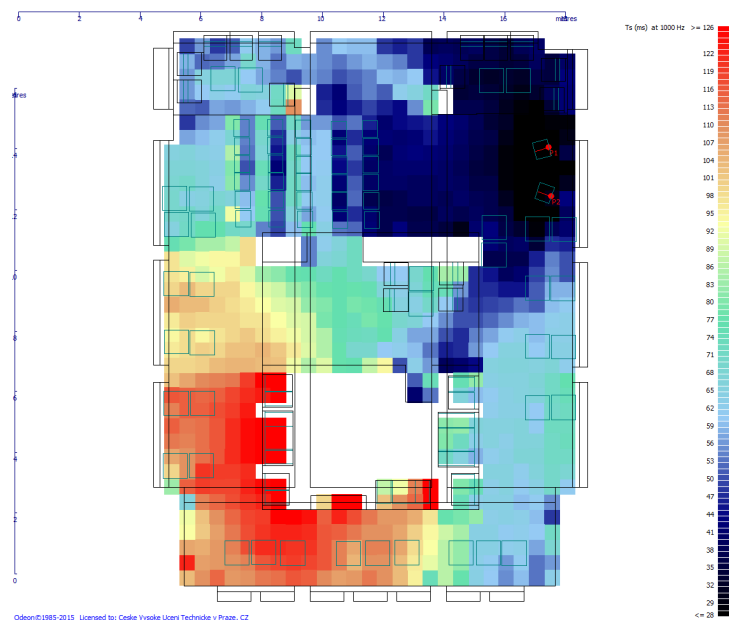
Obrázek A.53: Vypočtená míra jasnosti C_{80} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



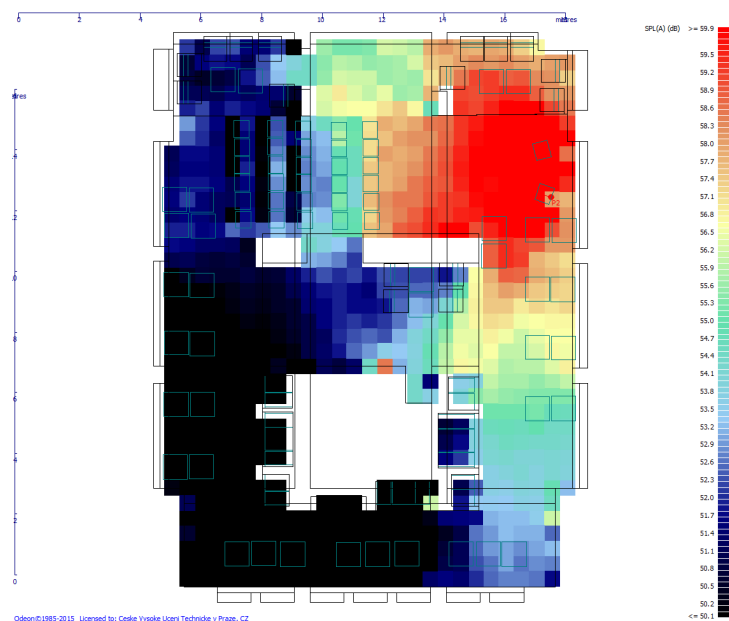
Obrázek A.54: Vypočtená míra boční energie LF_{80} pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



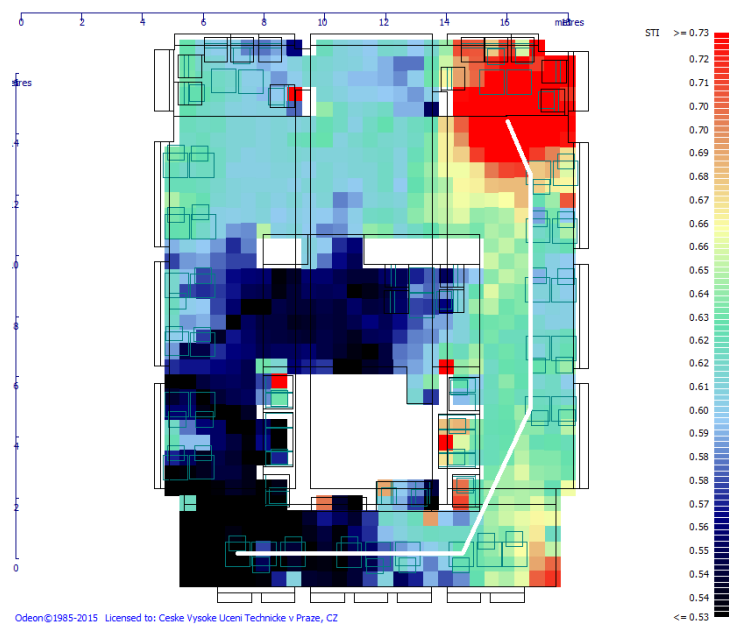
Obrázek A.55: Vypočtený index srozumitelnosti STI pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



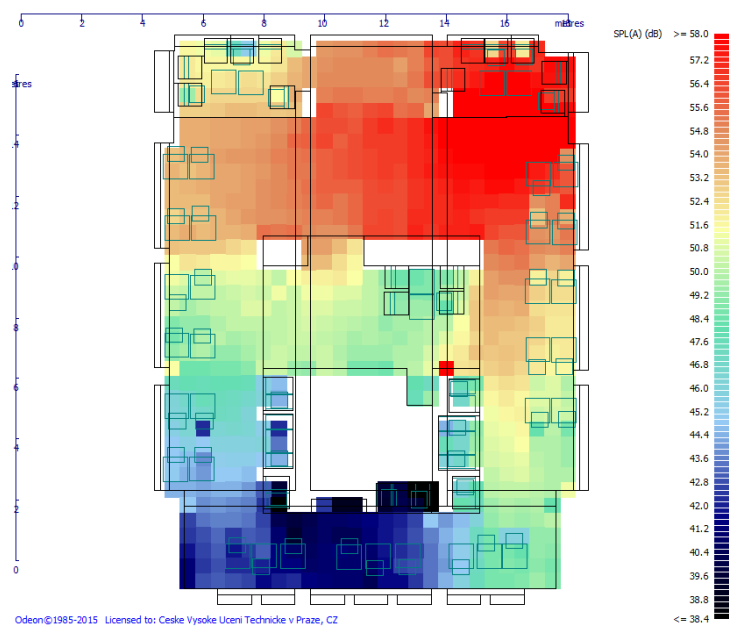
Obrázek A.56: Vypočtený čas těžiště t_s pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



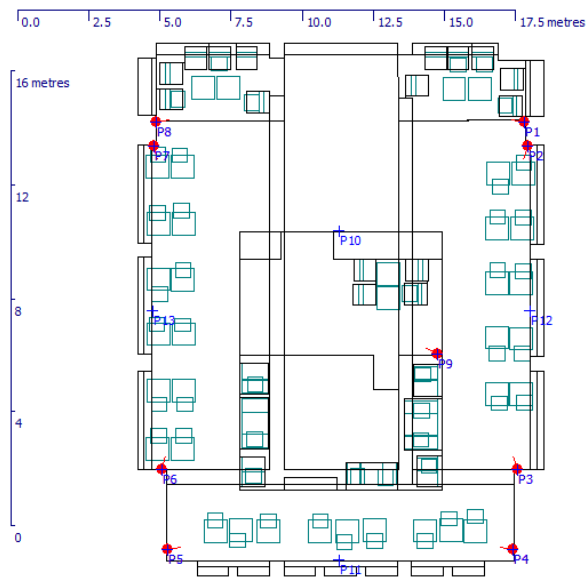
Obrázek A.57: Vypočtená hladina akustického tlaku $SPL(A)$ pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ hudební produkce



Obrázek A.58: Nerovná linie měření s grafickým vyhodnocením parametru STI pro případ studovny jako otevřené kanceláře

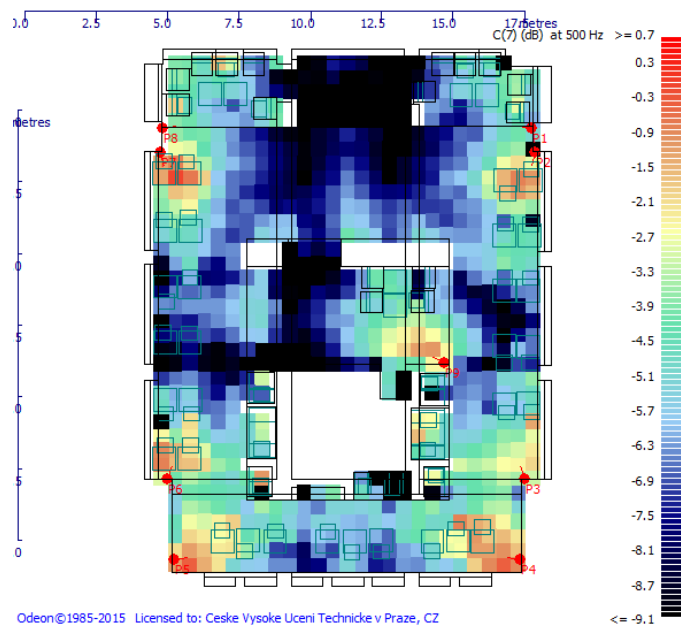


Obrázek A.59: Vypočtená hladina akustického tlaku $SPL(A)$ pomocí bodové odezvy v mřížce pro případ studovny jako otevřené kanceláře



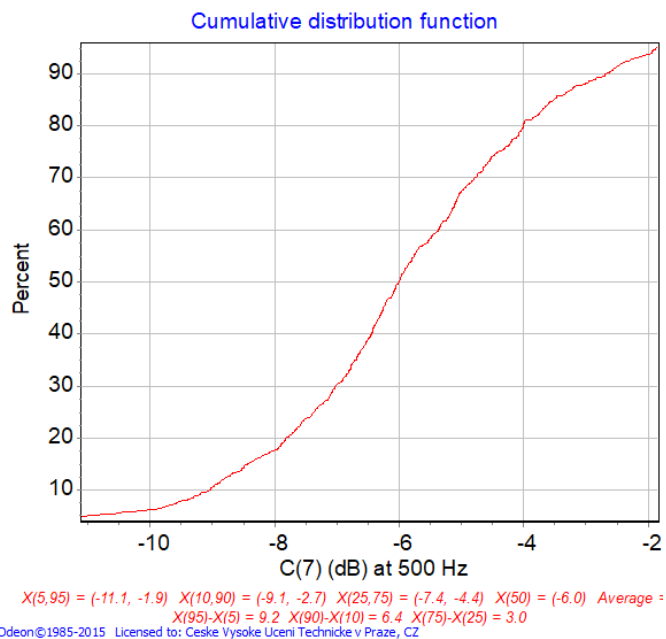
Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

Obrázek A.60: Rozmístění zdrojů pro reprodukováné ozvučení

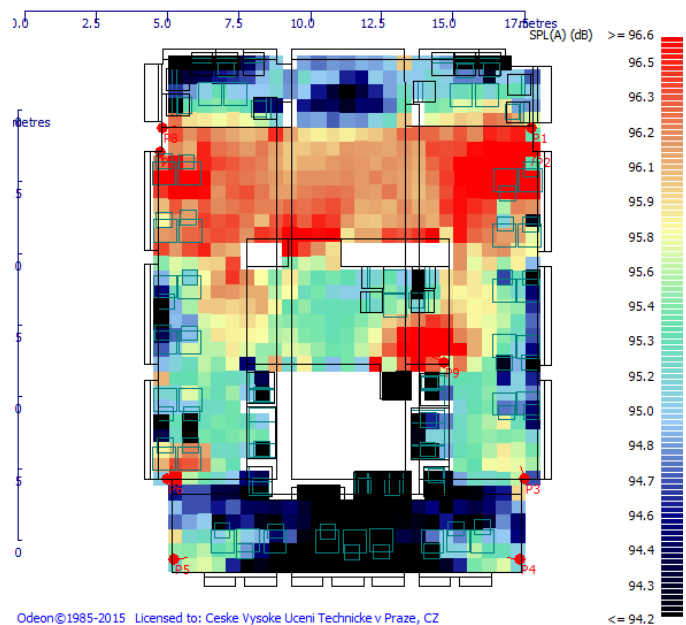


Odeon©1985-2015 Licensed to: Ceske Vysoke Ucení Technické v Praze, CZ

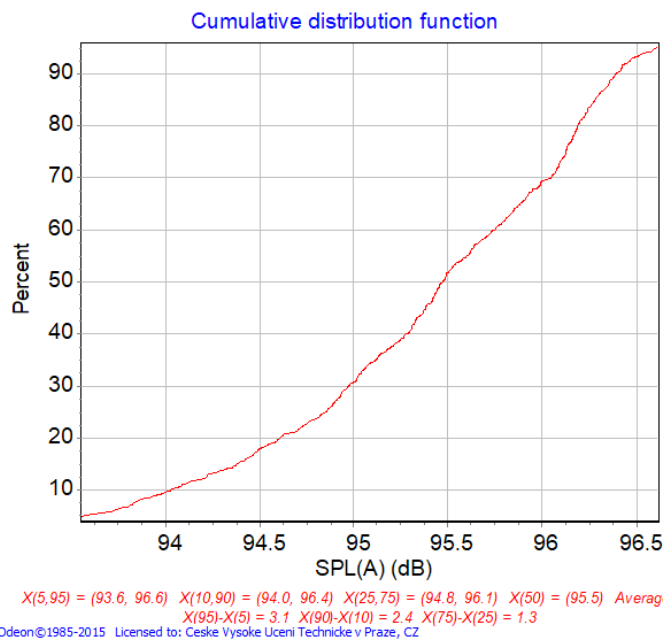
Obrázek A.61: Vypočtená míra přímého zvuku C_7 pomocí bodové odezvy v mřížce pro reprodukováné ozvučení



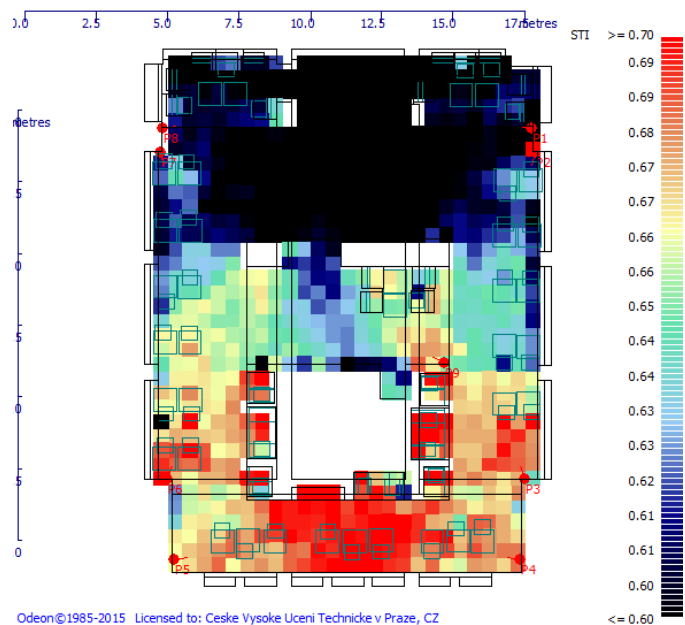
Obrázek A.62: Vypočtená distribuční funkce míry přímého zvuku C_7 pomocí bodové odezy v mřížce pro reprodukováné ozvučení



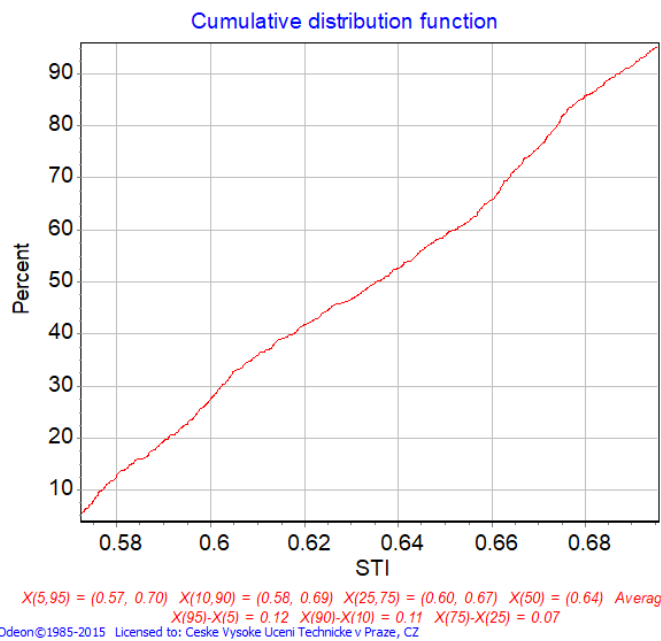
Obrázek A.63: Vypočtená hladina akustického tlaku $SPL(A)$ pomocí bodové odezy v mřížce pro reprodukováné ozvučení



Obrázek A.64: Vypočtená distribuční funkce hladiny akustického tlaku $SPL(A)$ pomocí bodové odezvy v mřížce pro reprodukováné ozvučení



Obrázek A.65: Vypočtený index srozumitelnosti STI pomocí bodové odezvy v mřížce pro reprodukováné ozvučení



Obrázek A.66: Vypočtená distribuční funkce indexu srozumitelnosti *STI* pomocí bodové odezvy v mřížce pro reprodukované ozvučení