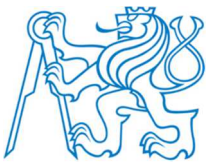


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Prostorová akustika multifunkčních sálů

Room acoustics of multifunctional halls

Diplomová práce

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí – Konstrukce budov

Vedoucí práce: Ing. Jiří Nováček, Ph.D.

Jan Novotný

Praha 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Novotný Jméno: Jan Osobní číslo: 396404

Zadávající katedra: K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí - Konstrukce budov

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Prostorová akustika multifunkčních sálů

Název diplomové práce anglicky: Room acoustics of multifunctional halls

Pokyny pro vypracování:
Diplomová práce se bude zabývat multifunkčními sály z pohledu prostorové akustiky. Práce bude obsahovat aktuální přehled akustických požadavků a doporučení na tento druh uzavřených prostorů, a dále rešerši přístupů k jejich navrhování. Těžištěm práce bude návrh akustických úprav nejméně jednoho multifunkčního sálu, založený na simulačních výpočtech pomocí programu ODEON, pokud možno doplněných měřením akustických podmínek v sálu bez navrhovaných úprav (výchozí stav).

Seznam doporučené literatury:
Stavební fyzika 3 - Akustika pozemních staveb, Kaňka, J., Nováček, J., učební skriptum ČVUT, 2015
Room acoustics - Kuttruff, H., London: Spon Press, 2009
Prostorová akustika, Kolmer, F., Kyncl, J. SNTL-ALFA, 1980
Příslušné právní předpisy a technické normy

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jiří Nováček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10. 10. 2017 Termín odevzdání diplomové práce: 8. 1. 2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

[redacted]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

17. 10. 2017
Datum převzetí zadání

[redacted]
Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. JAN NOVOTNÝ

Název diplomové práce: PROSTOROVÁ AKUSTIKA MULTIFUNKČNÍCH SÁLŮ

Základní část: KPS podíl: 100 %

Formulace úkolů: PŘEHLED AKUSTICKÝCH POŽADAVKŮ NA MULTIFUNKČNÍ SÁLY. NÁVRH AKUSTICKÝCH ÚPRAV JEDNOHO MULTIFUNKČNÍHO SÁLU, ZALOŽENÝ NA VÝSLEDCÍCH MĚŘENÍ A VLASTNÍCH VÝPOČTŮ.

Podpis vedoucího DP: [redacted] Datum: 17.10.2017

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

3. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra: .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

Poznámka:
Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci.
(Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V ……. dne …….. ……

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Nováčkovi, Ph.D. za podklady, cenné rady a čas, který mi věnoval při přípravě této práce. Dále patří velké díky rodině, za podporu po celou dobu mého studia na škole, a zvláště v době přípravy této diplomové práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá multifunkčními sály z pohledu prostorové akustiky. K přiblížení dané problematiky práce obsahuje teoretický základ, jak obecných poznatků z akustiky, tak požadavků a doporučení pro samotný návrh prostoru. Cílem práce je návrh akustických úprav na konkrétním multifunkčním sále, vedoucích k optimalizaci poslechových podmínek. Pro účely této práce byl vybrán objekt v pražských Holešovicích, ve kterém se následně provedlo akustické měření. Na základě tohoto měření byl následně vytvořen model objektu v počítačovém softwaru. Takto vytvořený model poté slouží k samotným návrhům úprav a simulacím vedoucích k získání výsledků navržených opatření. Součástí práce je také kontrolní výpočet, který spolu s výsledky získaných z reálného měření a počítačové simulace, slouží k závěrečnému vyhodnocení akustických úprav.

Klíčová slova

Akustika, prostorová akustika, multifunkční sál, doba dozvuku, zvuková pohltivost, Odeon software

Annotation

This diploma thesis investigates a multifunctional hall from the room acoustic point of view. In order to allow a general public to understand the content, there is also a section with a theory of an acoustics. For the purpose of having a more realistic boundary conditions a real multifunctional hall in a Prague district Holesovice has been chosen for measurements. Those measurements have been used for an optimisation of the acoustics in the hall. A model of the mutifunctional hall has been created in a specific software based on all obtained measurements. This model allows an assesments resulting in a series of requirements and recommendations. Another part of this thesis is a verification calculations, which together with the results from real measurements and simulations allows to make a final statement for the recommended modifications.

Keywords

Acoustics, room acoustics, multifunctional hall, reverberation time, sound absorption, Odeon Software

Obsah

Úvod ... - 9 -
1 Stručné poznatky z akustiky ... - 10 -
1.1 Základní akustické pojmy a veličiny ... - 10 -
1.2 Zdroje zvuku - akustická emise, veličiny ... - 11 -
1.3 Šíření zvuku ve volném prostoru – volné zvukové pole ... - 12 -
1.4 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru ... - 13 -
1.4.1 Pohlcování zvuku ... - 13 -
1.4.2 Pole přímých a odražených vln – difúzní zvukové pole ... - 14 -
2 Prostorová akustika ... - 16 -
2.1 Geometrická akustika ... - 16 -
2.1.1 Směšování (ozvěna) ... - 17 -
2.2 Vlnová akustika ... - 18 -
2.2.1 Difuzita zvukového pole ... - 19 -
2.3 Statistická akustika ... - 19 -
2.3.1 Doba dozvuku ... - 20 -
2.3.1.1 Výpočet doby dozvuku ... - 20 -
2.3.1.2 Optimální doba dozvuku ... - 23 -
2.3.1.3 Měření doby dozvuku ... - 24 -
3 Prvky a materiály zlepšující prostorovou akustiku ... - 26 -
3.1 Základní princip ... - 26 -
3.2 Rozdělení dle funkčního principu a konstrukčního uspořádání ... - 27 -
4 Vybraný multifunkční sál ... - 31 -
4.1 Popis vybraného prostoru ... - 31 -
4.2 Stávající akustický stav ... - 32 -
4.3 Měření v objektu ... - 32 -
4.3.1 Výsledky měření ... - 36 -
4.3.2 Hodnocení stávajícího stavu na základě měření ... - 37 -
4.4 Počítačová simulace ... - 40 -
4.4.1 Příprava modelu ... - 40 -
4.4.2 Výstupy z modelu ... - 43 -
4.4.3 Hodnocení stávajícího stavu na základě modelování ... - 44 -
4.4.4 Hodnocení stávajícího stavu – další sledované parametry ... - 46 -

4.5 Kontrolní ruční výpočet ..... - 47 -
4.5.1 Porovnání původního stavu s ostatními metodami ..... - 47 -
4.6 Návrh akustických úprav ..... - 48 -
4.6.1 Doplnění sledovaných parametrů ..... - 48 -
4.6.2 Postup návrhu úprav ..... - 51 -
4.6.2.1 Popis jednotlivých úprav ..... - 51 -
4.6.2.2 Vyhodnocení jednotlivých úprav ..... - 53 -
4.6.3 Vyhodnocení celkového návrhu akustických úprav ..... - 59 -
4.6.4 Akustické úpravy – závěr ..... - 63 -
Závěr ..... - 64 -

Použitá literatura ..... - 66 -

Seznamy ..... - 70 -
Seznam použitých symbolů ..... - 70 -
Seznam obrázků ..... - 72 -
Seznam tabulek ..... - 74 -
Seznam rovnic ..... - 75 -
Seznam použitého softwaru ..... - 76 -
Seznam příloh ..... - 77 -

Poznámky ..... - 110 -

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá prostorovou akustikou zaměřenou na multifunkční sály. Cílem práce je představit tuto problematiku jak z obecného pohledu, tak na konkrétním příkladu. Ten spočívá v uplatnění požadavků a doporučení na návrhu akustických úprav vybraného konkrétního sálu. V práci jsou k tomuto účelu využity jak klasický přístup manuálních výpočtů, tak především počítačová simulace daného objektu. Ta je optimalizována na základě provedeného akustického měření v sále.

Práce obsahuje část teoretickou, která je věnována základním poznatkům dané problematiky. Jejím cílem je nejprve čtenáře seznámit se základy akustiky z obecného pohledu, následně pak přiblížit problematiku prostorové akustiky. V této části jsou představeny přístupy, jednotlivé jejich části, zásady a doporučení pro samotné projektování. V rámci teoretické části jsou také popsány jednotlivé parametry užívané v této tematice. Závěr této sekce tvoří představení jednotlivých prvků a materiálů užívaných při návrhu, případně rekonstrukcích prostorů zajišťujících zlepšení prostorové akustiky.

Praktická část práce se již týká vybraného multifunkčního sálu. Je zde postupně popsán vybraný prostor a stávající akustický stav. Dále je zde popsáno měření, které bylo v sále provedeno, zobrazeny jeho výsledky a na jejich základě vyhodnocen současný stav. Následně je vytvořen model určený k simulaci akustického chování vybraného sálu. Postupně je popsána tvorba a samotná práce s modelem. Po optimalizaci modelu na základě výsledků provedených měřením na místě, probíhá simulace chování prostoru za různých v textu specifikovaných stavů. Jednotlivé posuzované stavy jsou následně vyhodnoceny dle požadavků příslušných norem. Jedním z hlavních bodů této části jsou pak samotné akustické úpravy. Ty jsou v textu jednotlivě popsány, zadány do simulace a následně vyhodnoceny. Po dílčím vyhodnocení jednotlivých úprav a jejich vlivu na příslušné parametry jsou vybrány konkrétní pro finální návrh. Ten je poté přes simulaci následně vyhodnocen a je zobrazen finální stav vybraného prostoru včetně všech navrhovaných úprav. Celý průběh práce s počítačovým softwarem je sledován pomocí kontrolních ručních výpočtů.

1 Stručné poznatky z akustiky

Akustika je jedním z nejstarších oborů fyziky. Ve svých různých disciplínách se zabývá vznikem zvukového vlnění, jeho následným šířením a přenosem prostorem až po vnímání lidskými smysly.

Tento vědní obor má mnoho podoborů, např.: fyzikální, hudební, fyziologickou akustiku, součástí je samozřejmě i stavební akustika. Ta zkoumá zvukové jevy v interakci se stavebními konstrukcemi budov a prostorová akustika, která řeší šíření zvuku v obecném prostoru. [9]

Za zakladatele české akustiky je považován profesor fyziky z Karlovy univerzity Čeněk Strouhal (1850-1922).

1.1 Základní akustické pojmy a veličiny

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí, které je člověk schopen vnímat sluchem. Zvuk tedy vzniká pomocí kmitání částic daného prostředí, kterým se dále šíří pomocí vlnění. Tento jev je charakteristický pro podélné vlnění v plynech nebo kapalinách, kdy jednotlivé částice prostředí kmitají ve směru šíření zvuku. Rychlost šíření je pak rovna rychlosti zvuku. V případě vlnění v pevných látkách se pak tento jev nazývá chvěním. [9]

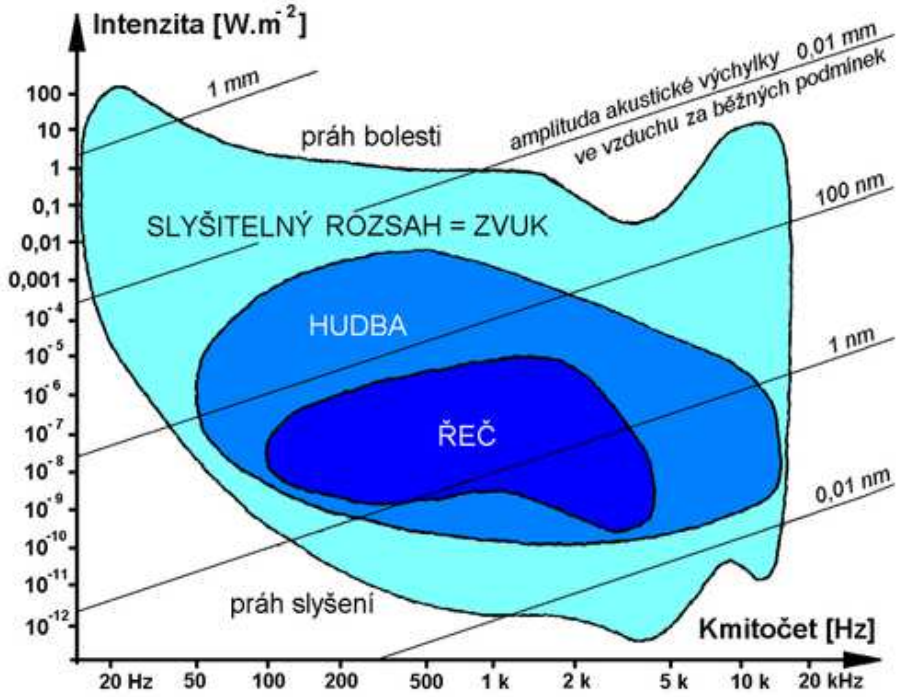
$$c = 331{,}8 + 0{,}6t_e \quad [\mathrm{m}.s^{-1}] \tag{1}$$

kde: c … rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m.s^{-1}]
t_e … teplota vzduchu [°C]

Základními parametry, které určují fyzikálně zvuk, je jeho kmitočet a akustický tlak, který reprezentuje akustickou energii v místě působení. Vyjadřuje kladné (+) a záporné (-) odchylky od hodnoty barometrického tlaku, které vyvolává postupná zvuková vlna. [9]

U člověka je oblast slyšení vymezena:

- pásmem slyšitelných kmitočtů: 16 Hz ÷ 16 000 Hz
- rozsahem intenzity zvuku: 10^{-12} W.m^{-2} ÷ 10^{2} W.m^{-2}



Obr. 1 – Slyšitelný rozsah kmitočtů a intenzit mechanického kmitání [22]

1.2 Zdroje zvuku - akustická emise, veličiny

Zdroje zvuku vytváří zařízení a předměty v prostředí, kde vzniká akustická energie a od nichž se šíří do okolí.

Charakter akustického vlnění v okolí zdroje je ovlivněn velikostí a tvarem zdroje, proto z tohoto hlediska rozlišujeme 3 základní typy zdrojů: bodové, přímkové a plošné zdroje. [10]

Veličiny akustické emise:

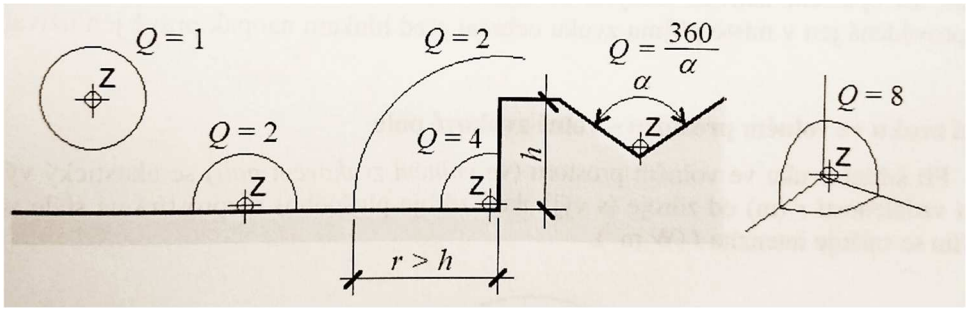
1) L_w [dB] - Hladina akustického výkonu

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad [dB] \tag{2}$$

kde: P … akustický výkon [W]

P_{ref}… referenční hodnota $P_{ref} = 10^{-12}$ W

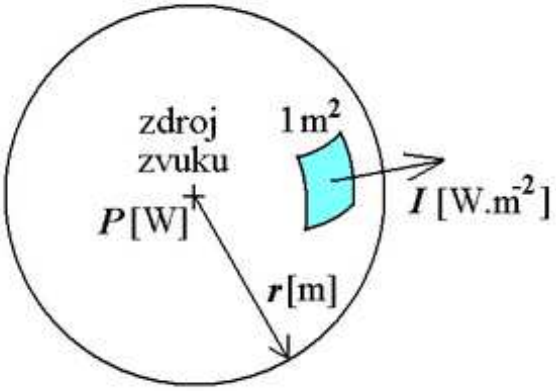
2) Q [-] – činitel směrovosti



Obr. 2 – Činitel směrovosti [10]

1.3 Šíření zvuku ve volném prostoru – volné zvukové pole

Během šíření zvuku ve volném prostoru se akustický výkon P [W] s rostoucí vzdáleností r [m] od zdroje zvuku rozprostírá na stále větší plochu S [m^2] a tím se snižuje intenzita I [W.m^{-2}], jak je patrné na následujícím obrázku. [10]



Obr. 3 – Šíření zvuku – volné zvukové pole [23]

Výpočet hladiny akustického tlaku bodového zdroje v určité vzdálenosti se spočítá podle vztahu:

$$L = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad [dB] \tag{3}$$

kde: L_w … hladina akustického výkonu [dB]
Q … činitel směrovosti [-]
r … vzdálenost od bodového zdroje [m]

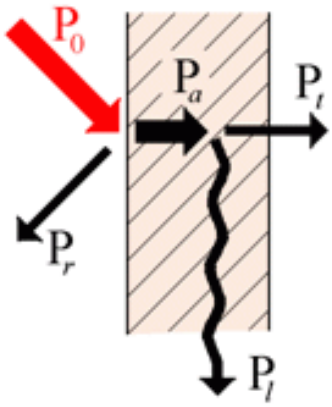
K útlumu zvuku ve volném prostoru dochází nejčastěji vlivem několika faktorů, nejčastěji se jedná o: útlum zvuku ve vzduchu, útlum zvuku vlivem gradientu větru, útlum zvuku vlivem gradientu teploty, útlum vlivem sněhu, útlum zvuku ohybem přes překážku.

1.4 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

Na rozdíl od šíření zvuku ve volném prostoru dochází při šíření v prostoru uzavřeném ke zvyšování hladiny akustického tlaku *L* vlivem odrazu zvuku od ploch tvořící tento prostor. Odraz od stěn, stropu, podlahy má za následek zvýšení hladiny akustického tlaku v porovnání se stavem, jaký by nastal na volném prostranství. [10]

1.4.1 Pohlcování zvuku

Důležitou roli představuje pohltivost jednotlivých povrchů ohraničujících daný prostor. Na následujícím obrázku je znázorněn rozklad akustického výkonu při dopadu na překážku.



Obr. 4 – Distribuce akustického výkonu při dopadu na překážku [24]

Z předchozího obrázku lze definovat:

činitel odrazu : $\rho = \frac{P_r}{P_0}$ [-] (4)

činitel pohltivosti: $\alpha = \frac{P_a}{P_0}$ [-] (5)

činitel průzvučnosti: $\tau = \frac{P_t}{P_0}$ [-] (6)

Ztrátový činitel: $\eta = \frac{P_t}{P_l}$ [-] (7)

Pozn. Dále bude pro práci zejména důležitý činitel pohltivosti α [-], který určuje zvukovou pohltivost konstrukce A_i [m^2], případně celkovou pohltivost prostoru A [m^2]. Ukázka vybraných hodnot α [-] pro základní materiály je k dispozici v Příloha 1.

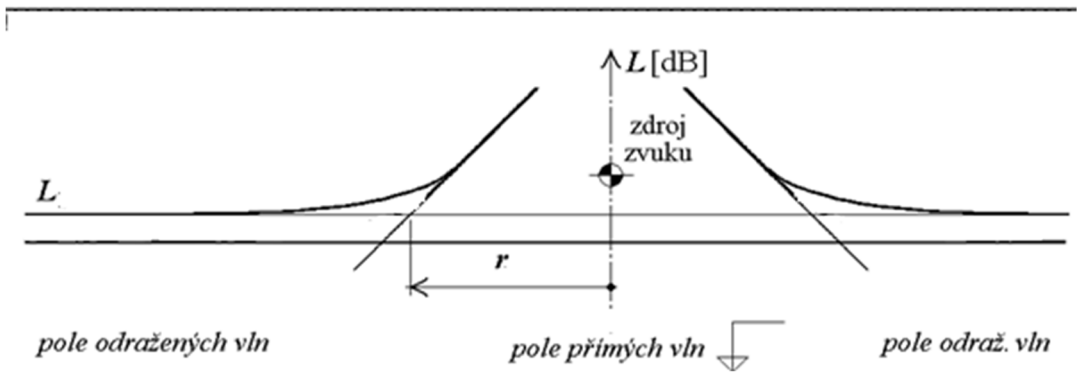
Celková zvuková pohltivost A [m^2] je dána součtem zvukové pohltivosti všech ploch, které daný prostor ohraničují, popřípadě i zvukové pohltivosti předmětů a osob, které se v daném prostoru nacházejí.

$$A = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \,.\, S_i \quad [m^2] \tag{8}$$

Pozn. Činitel pohltivosti α [-], tím pádem i pohltivost A [m^2] jsou závislé na kmitočtu zvuku, proto je potřeba počítat v jednotlivých kmitočtových pásmech (obvykle oktávových).

1.4.2 Pole přímých a odražených vln – difúzní zvukové pole

Na následujícím obrázku je zachyceno rozložení hladiny akustického tlaku s rostoucí vzdáleností od zdroje zvuku.



Obr. 5 – Řez místností se zdrojem zvuku ve středu prostoru [24]

V blízkém okolí zdroje zvuku se nachází pole přímých vln, ve kterém pokles akustického tlaku probíhá obdobně jako ve volném prostoru. Posluchač je zde schopen rozpoznat, odkud zvuk přichází. Toto pole je ohraničeno dozvukovou vzdáleností r_k. Za touto hranicí se již nachází pole odražených vln, ve kterém převládá vlnění, které se tam dostalo po vícenásobném odrazu.

Hodnotu hladiny akustického tlaku L [dB] v poli odražených vln je možné stanovit podle následujícího vztahu:

$$L = L_w + 10\ log\left[\frac{4(1-\alpha_m)}{A}\right] \quad [dB] \tag{9}$$

kde: L_w … hladina akustického výkonu zdroje zvuku [dB]

α_m … střední činitel pohltivosti [-]

$$\alpha_m = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \cdots + S_i\alpha_i + \cdots + S_n\alpha_n}{S_1 + S_2 + \cdots + S_i + \cdots + S_n} = \frac{A}{\sum S} \quad [-] \tag{10}$$

Hladinu akustického tlaku L [dB] současně v poli přímých i odražených vln charakterizuje tzv. Berankův vztah (který je kombinací vztahů *(3)* a *(9)*):

$$L = L_w + 10\ log\left[\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4(1-\alpha_m)}{A}\right] \quad [dB] \tag{11}$$

Ze vztahu (11) lze úpravou získat vztah pro výpočet dozvukové vzdálenosti r_k:

$$r_k = \sqrt{\frac{A.Q}{16\pi.(1-\alpha_m)}} \quad [m] \tag{12}$$

2 Prostorová akustika

Prostorová akustika se zabývá šířením zvuku v uzavřených nebo polouzavřených prostorech. Jejím cílem již není ochrana proti hluku, ale tento obor se zabývá zajištěním dobré slyšitelnosti a srozumitelnosti zvuku. Správně navržená prostorová akustika místnosti (daného prostoru) by měla zajistit příjemný a čistý zvuk při poslechu hudby a vysokou srozumitelnost mluveného slova.

Obecně prostorová akustika zkoumá objekty (prostory) určené k poslechu zvuku, sledování produkcí. Zvuk v těchto prostorech by měl být kmitočtově vyrovnaný. Zároveň s tímto požadavkem by mělo být určeno k jakému účelu bude daný prostor sloužit. Může se jednat o prostory jako např. kina, divadla, kostely, koncertní sály, přednáškové síně, atd. Jednotně se tyto prostory nazývají jako auditoria. [10]

Je zřejmé, že jiné požadavky budou pro návrh akustiky přednáškových sálů (důraz kladen zejména na srozumitelnost mluveného slova) a jiné u nahrávajících studií (důraz kladen na kvalitu poslechu hudby, tzn. vyrovnaná kmitočtová charakteristika ve slyšitelném spektru).

Metody řešení akustického prostoru

Obecně se zvuková vlna šíří prostředím od svého zdroje, dokud nenarazí na překážku (tlumení), kde dojde buď k odrazu (energie vlny je odražena jiným směrem) nebo lomu vlny (většina energie se bude šířit ohybem dál za překážku).

Existuje více způsobů, jak řešit problematiku akustického prostoru. Níže budou popsány 3 hlavní metody: vlnová akustika, geometrická akustika, statistická akustika.

2.1 Geometrická akustika

Intenzita zvuku směrem od zdroje zákonitě klesá, tím pádem je zapotřebí při návrhu zajistit zesílení intenzity do nejvzdálenějších bodů od zdroje. Zesílení se může zajistit jak pomocí elektroakustiky (za pomoci mikrofonů a soustav reproduktorů), tak samozřejmě už primárně návrhem a vhodným umístěním odrazivých konstrukcí. [9]

Geometrická akustika využívá zjednodušení mechanizmů šíření zvuku pouze na případy odrazu vln od překážek. Díky tomuto předpokladu se dá přirovnat zvuková vlna k paprsku v optice, avšak za předpokladu zvuku o vyšších kmitočtech. Geometrická

akustika poté sleduje dráhy paprsků od zdroje k přijímači. Zvukové vlny se tak odráží od ohraničujících konstrukcí podle tzv. Fermatova principu (tzn. nejkratší možnou trasou).

2.1.1 Směšování (ozvěna)

Obecně platí, že odražený zvuk urazí delší vzdálenost v porovnání s přímo šířeným zvukem, tím pádem dorazí k posluchači s určitým zpožděním. Následně potom záleží, jestli je zpoždění malé nebo velké. V prvním případě lidské ucho vyhodnotí oba signály jako jeden zvuk a pouze tehdy může odražený zvuk způsobit zesílení. Čím větší je rozdíl vzdáleností drah přímé a odražené a s tím spojené větší časové zpoždění, dochází k poruchám srozumitelnosti mluveného slova. Pomyslnou hranicí, kdy už odrazy od velmi vzdálených ploch nemají velký vliv pro srozumitelnost je více jak trojnásobek dráhy přímé. Zvuk už působí s mnohem menší intenzitou a v důsledku maskování není vnímán rušivě. Podobný výsledek se dosáhne obložením zvuk pohlcujícím obkladem (*viz kapitola 3*) nebo změnou tvaru nežádoucí odrazné plochy.

Rozdíl drah [m]	Časové zpoždění [s]	Vliv na srozumitelnost
méně než 10	méně než 0,03	zesílení zvuku - vnímáno jako jeden zvuk
10 až 17	0,03 až 0,05	směšování hlásek
17 až 34	0,05 až 0,1	ozvěna
více než 34	více než 0,1	jednoslabičná ozvěna

Obr. 6 – Dovolený rozdíl drah mezi přímým a odraženým zvukem [10]

K posílení zvukového signálu ve zkoumaných prostorech se nejčastěji používá stavebních opatření. Příkladem může být použití několika odrazných ploch, rovinných nebo zakřivených, které se umísťují zpravidla na strop sálu. Důležitou zásadou je směrování odrazů zvuku ve směru od zdroje do hloubky sálu. Protilehlá stěna jevišti a zadní oblast bočních stěn bývá nejčastěji zdrojem ozvěny. V tomto případě se užijí širokopásmové zvuk pohlcující obklady, s tím že jejich množství v prostoru je nutné regulovat podle zásad statistické akustiky (*popsaná v kapitole 2.3*).

2.2 Vlnová akustika

Následkem odrazů zvuku od navzájem rovnoběžných stěn dochází ke stojatému vlnění v rozsahu takových kmitočtů, pro které se vzájemná vzdálenost stěn rovná celému násobku ½ vlnové délky. Takto vzniklé stojaté vlnění narušuje difuzitu zvukového pole. Následkem tohoto porušení difuzity je změna barvy, porucha kvality (srozumitelnosti) zvuku.

Při sledování zvuku (v pásmech celé oktávy) lze akustické pole v prostoru považovat za difúzní od kmitočtu f_{min} [Hz]:

$$f_{min} = \frac{400}{\sqrt[3]{V}} \quad [Hz] \tag{13}$$

kde: V … objem daného prostoru [m^3]

Vlnová akustika modeluje zvukové pole pro nízké kmitočty (k porušení difúznosti dochází v oblasti nízkých kmitočtů). Pro tyto účely se využívá vlnová rovnice, jejíž řešení je výpočetně náročné i pro jednoduché pravoúhlé prostory. Řešením rovnice pro triviální prostor (prostor tvaru pravoúhlého šestistěnu) se stěnami, které jsou uvažovány jako tuhé, nepružné, lze získat rovnici pro stanovení těchto kmitočtů $f_{x,y,z}$ [Hz]: [19]

$$f_{x,y,z} = \frac{c_o}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [Hz] \tag{14}$$

kde: n_x,n_y,n_z … jsou celá čísla od nuly do ∞ [-]

l_x,l_y,l_z … rozměry stran pravoúhlého šestistěnu [m]

Takto získané rezonanční kmitočty jsou nežádoucí, dochází k zesilování jen určité frekvence zvuku. Aby k takovým jevům nedocházelo, je vhodné se řídit podle níže uvedených opatřeních nebo jejich kombinací:

- Dostatečná velikost uzavřeného prostoru – hledí se na celkový objem ohraničeného prostoru, kde je minimálním požadavkem 100 m^3. (Důvodem je, že s rostoucím objemem roste hustota vlastních kmitů.)
- Různoběžnost stěn daného prostoru – omezuje vznik stojatého vlnění.
- Rozměry prostoru – u pravoúhlého prostoru je dobré, když vzájemné poměry stran nejsou navzájem celistvými násobky.

- Ohraničující konstrukce prostoru – zvyšování difúznosti zvukového pole, např. pomocí obložení stěn, členitost reliéfu stěn (akustický reliéf).

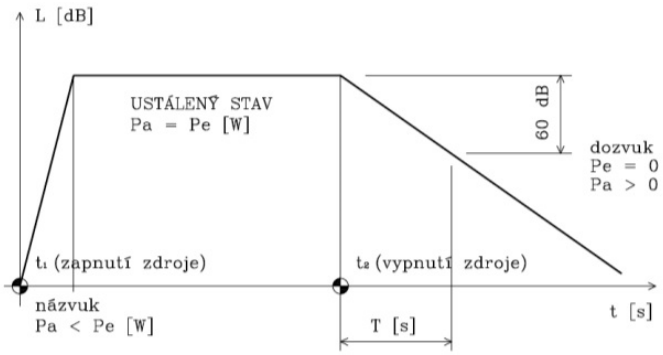
2.2.1 Difuzita zvukového pole

Jak vyplývá z dříve uvedeného textu, tak difuzitou zvukového pole se nazývá prostorově rovnoměrné rozložení intenzity zvukového pole ve všech místech vyšetřovaného uzavřeného pole. Záleží na tvaru, rozměrech ohraničujících konstrukcí, na vzájemných poměrech pohltivostí a plošných rozměrů.

Difuzně nedokonalé prostory jsou např. tvořeny nedostatečně pohltivými a vzájemně rovnoběžnými stěnami, popř. rovinnými nebo zakřivenými tak, že se zvukové vlny soustřeďují na malou plochu. Tomuto jevu se říká fokusace. Obecně lze tyto jevy zeslabit podle doporučení uvedených v předchozí kapitole.

2.3 Statistická akustika

Statistická akustika platí nad kritickým kmitočtem podle rovnice *(13)*, i zde se počítá s představou difúzního zvukového pole v uzavřeném prostoru. Statistická akustika se zabývá stavy, které probíhají po vypnutí zdroje zvuku. Pro lepší názornost je uvedeno schéma *(Obr. 7)*, které zobrazuje průběh hladiny akustického tlaku. Signifikantním prvkem, se kterým se pracuje, je doba dozvuku T [s].



Obr. 7 – Průběh hladiny akustického tlaku [10]

Z předchozího obrázku je patrný průběh hladiny akustického tlaku L [dB]. Po spuštění zdroje zvuku v čase t_1 se bude hladina v poli odražených vln postupně zvyšovat, tato oblast se nazývá názvuk. Po určité době se hladina akustického tlaku ustálí na určité hodnotě L [dB], a tím dojde k rovnováze mezi akustickým výkonem P_e [W] vyzařovaným zdrojem a akustickým výkonem P_a [W] pohlcovaným konstrukcemi

prostoru. Tento stav ($P_a = P_e$) je udržován po celou dobu vysílání zvuku. Během tohoto stavu je možné hodnotu *L* [dB] stanovit podle *rovnice (9)*. Po přerušení vysílání zvuku v čase t_2 se téměř ihned ruší pole přímých vln a bilanční rovnice se změní na tvar:

$$P_e - P_a = \frac{dE}{dt} \quad [W] \tag{15}$$

kde: P_e … akustický výkon vyzařovaný zdrojem [W]

P_a … akustický výkon pohlcovaný konstrukcemi prostoru [W]

$\frac{dE}{dt}$ … člen vyjadřující změnu celkové akustické energie v čase [W]

Zatímco ke zrušení přímých vln dojde téměř ihned, tak hladina akustického tlaku v poli odražených se snižuje postupně. Jednotlivé zvukové vlny po svých odrazech dorazí do určitého místa sledování s určitým zpožděním. Tento jev se nazývá dozvuk, který může trvat různě dlouhou dobu (teoreticky ∞ dlouhou dobu). Doba, za jak dlouho od okamžiku ukončení činnosti zdroje zvuku se hladina akustického tlaku *L* [dB] sníží o 60 dB se nazývá doba dozvuku *T*.

2.3.1 Doba dozvuku

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, tak standardní doba dozvuku *T* [s] je časový úsek, za jak dlouho se sníží hladina akustického tlaku *L* [dB] o 60 dB od vypnutí zdroje zvuku. Tato hodnota odpovídá poklesu celkové akustické energie na $\frac{1}{1\,000\,000}$ počáteční hodnoty. Energie zdroje je pohlcena především materiály v místnosti, u větších prostorů se pak může projevit i vliv útlumu zvuku ve vzduchu.

Pozn. *Hodnotu T [s] lze vyhodnotit na základě menšího rozsahu než 60 dB a extrapolovat ji na dobu poklesu o 60 dB. Příkladem může být T_{20}, kde křivka poklesu dosahuje 5dB a 25 dB pod počáteční hladinou. Obdobně je to v případě, kdy jsou použity hodnoty poklesu od 5 dB do 35 dB pod počáteční hladinou, pak se označí T_{30}. [3]*

2.3.1.1 Výpočet doby dozvuku

Zde budou uvedeny tři používané metody teoretického výpočtu doby dozvuku.

Základní vztah pro výpočet doby dozvuku vychází z *rovnice (15)*, kde se po uvážení, že po vypnutí zdroje zvuku se hodnota vyzařovaného akustického

výkonu P_e = 0 a následných úpravách (postup uveden v [10]) dostane k následujícímu vztahu:

$$T = 6.\ln(10)\frac{4V}{c.A} = \frac{55{,}3\,V}{c.A} \quad [s] \tag{16}$$

kde: V … Objem daného prostoru [m^3]

c … Rychlost šíření zvuku v plynech [m.s^{-1}]

A … Celková zvuková pohltivost [m^2] – výpočet podle *rovnice (8)*

Doba dozvuku tak závisí na objemu daného prostoru V [m^3] a na jeho celkové pohltivosti A [m^2]. Celková pohltivost je zde zastoupena součtem všech ploch ohraničující daný prostor ΣS [m^2] a středním činitelem pohltivosti zvuku α_m [-] (výpočet α_m podle *rovnice (10)*). Dosazením hodnoty rychlosti zvuku ve vzduchu (hodnotou 340 m.s^{-1}) se získá vztah pro výpočet doby dozvuku odvozený W.C.Sabinem:

$$T_S = 0{,}163\frac{V}{A} \quad [s] \tag{17}$$

Doba dozvuku podle Sabina je vhodná pro základní prostory, které nejsou nijak zvlášť vybaveny zvuk pohlcujícím obkladem. Pro výpočet doby dozvuku pro prostory více zatlumené se využije vztah Eyringův, který počítá s tím, že dopadající vlna se oslabí skokově:

$$T_E = 0{,}163\frac{V}{-\sum S.\ln(1-\alpha_m)} \quad [s] \tag{18}$$

V praxi se ukázalo, že ani Eyringův vzorec neposkytuje věrohodné informace v případech, kdy hodnoty činitele zvukové pohltivosti α jsou větší než 0,8. Pro tyto účely je lepší využít vzorec podle Millingtona:

$$T_M = 0{,}164\frac{V}{-\sum_1^n S_i.\ln(1-\alpha_i)} \quad [s] \tag{19}$$

V tomto vzorci se využívá jednotlivých příspěvků činitelů zvukové pohltivosti α_i vůči obsahu ploch materiálů S_i.

V prostorech o objemu větším jak 2000 m^3 se všechny tyto vztahy doplňují o vliv činitele útlumu zvuku ve vzduchu m [m^{-1}], tím že se ke jmenovateli přičte člen $4mV$, který vyjadřuje vliv útlumu zvuku při šíření prostředím. Výsledný vztah pro výpočet např. podle Eyringa se potom uvádí ve tvaru:

$$T_E = 0{,}163 \frac{V}{-\sum S.\ln(1-\alpha_m) + 4mV} \quad [s] \tag{20}$$

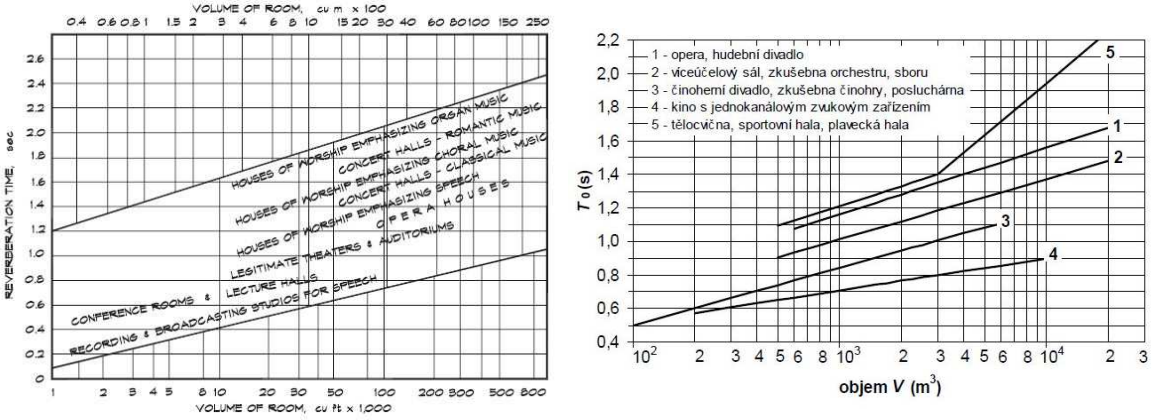
V následující tabulce jsou uvedeny činitele útlumu zvuku ve vzduchu m [m^{-1}], činitel je závislý na teplotě, vlhkosti a kmitočtu. Tabulka udává hodnoty až od oktávového pásma 1000 Hz a to proto, že pro nízká pásma jsou hodnoty tohoto činitele velmi malé a lze je tak zanedbat.

f	Relativní vlhkost [%]										
[Hz]	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1000	0,0041	0,0025	0,0018	0,0013	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013
2000	0,0137	0,0095	0,0067	0,0041	0,0031	0,0027	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0023
4000	0,0297	0,0295	0,0242	0,0161	0,0118	0,0094	0,0079	0,0069	0,0063	0,0058	0,0055

Tab. 1 – Činitel útlumu zvuku m (při atmosférických podmínkách: tlak 101,325 kPa, teplota 20°C) [1]

2.3.1.2 Optimální doba dozvuku

Optimální doba dozvuku se značí T_{opt} [s] a stanovuje se na základě norem [1] a [2] konkrétně pro uvažovaný prostor v závislosti na jeho účelu a objemu V [m^3]. Základní shrnutí zobrazují následující obrázky. Na *Obr. 8a* je schéma ze zahraničního zdroje v porovnání s *Obr. 8b* z české normy. Oba přístupy jsou podobné a detailněji je popisuje *rovnice (21)*. Požadavkem na splnění je, aby optimální doby dozvuku bylo dosaženo v oktávových pásmech (125÷4000 Hz) s povolenými tolerancemi podle *Tab. 2*.



Obr. 8 – Optimální doba dozvuku v závislosti na objemu a účelu využití - a)[11];b)[2]

Rovnice závislosti optimální doby dozvuku $T_{opt.}$ na objemu V dle [2]:

Pozn. Rovnice uvedena pouze pro křivku „2 – víceúčelový sál“ z Obr. 8.

$$T_{opt} = 0{,}3582 \log V - 0{,}061 \ [s] \tag{21}$$

Určení	Meze	Střední kmitočet f (Hz) oktávového pásma									
		31,5	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
Hudba	Horní			1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2		
	Dolní			1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65		
Hudba i řeč	Horní			1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2		
	Dolní			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65		
Řeč	Horní			1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2		
	Dolní			0,65	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65		
Kino jednokanálové	Horní			1,55	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3		
	Dolní			0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6		
Kino vícekanálové	Horní	2	1,5	1,3	1,1	1	1	1	1	1	1
	Dolní	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Tělocvična, sport. hala	Horní				1,2	1,2	1,2	1,2			
	Dolní				0,8	0,8	0,8	0,8			

Tab. 2 – Meze přípustného rozmezí poměru dob dozvuku T/T_{opt} prostorů daného určení [2]

2.3.1.3 Měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku se řídí podle norem [3] a [4]. V těchto normách se nachází veškeré požadavky pro provádění měření. Jsou zde uvedeny např.: podmínky měření, přístrojové vybavení, místa měření, metody měření, způsob interpretace výsledků apod.

Obecně lze měřením získat hodnoty doby dozvuku T [s] daného prostoru, které lze porovnat s hodnotami optimálními T_{opt} [s] a případně navrhnout vhodné akustické úpravy prostoru, které povedou ke splnění podmínek.

V praxi se k tomuto účelu používají 2 metody: metoda přerušovaného šumu a metoda integrované impulsové odezvy.

Metoda přerušovaného šumu

Základem u této metody je vybuzení zvukového pole v posuzovaném prostoru. Po dosažení ustáleného stavu se vypne použitý zdroj zvuku a následně se zaznamená poklesová křivka. Tyto křivky musejí být zaznamenány vícekrát při stejném rozestavení měřících zařízení v prostoru. Vyhodnocení probíhá zprůměrováním hodnot.

Pozn. V 1. kroku měření je nutné nastavit akustický výkon zdroje takový, aby hladina akustického tlaku byla min. 45 dB nad hladinou hluku pozadí. Poté se spustí zdroj, po dobu tak dlouhou, aby se vytvořila ustálená hladina akustického tlaku ve všech uvažovaných frekvenčních pásmech. Tato doba záleží na velikosti měřeného prostoru a jeho pohltivosti a zároveň by neměla být menší než T/2.

Metoda integrované impulsové odezvy

U této metody je měření zvuku založeno na pulsním signálu, který může být vybuzen např. výstřelem z pistole, prasknutím balónku, jiskrovým výbojem. Zpracování zdrojového signálu probíhá pomocí tzv. Shroederovy metody (dle [4] je tato metoda založena na reverzní časové integraci hodnot impulzní odezvy).

Tato metoda má výhodu oproti předchozí, a to zejména v rychlosti měření. Dále také menším ovlivněním hlukem z pozadí a také, že se z této metody dají odvodit další parametry pro popsání prostoru (počáteční doba dozvuku, míra zřetelnosti…).

Pro obě metody se doporučuje počet měření dle účelu podle *Tab. 3.* Podle účelu se také volí kmitočtový rozsah, nejčastěji je to pak 125 Hz až 4000 Hz v oktávových pásmech.

	Orientační	Inženýrské	Přesné
Kombinace zdroj – mikrofon	2	6	12
Místa zdroje	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Místa mikrofonu	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Počet poklesů v každém místě (metoda přerušeného šumu)	1	2	3

Tab. 3 – Minimální počty míst a měření [4]

3 Prvky a materiály zlepšující prostorovou akustiku

Akustické prvky se obecně používají pro zlepšení akustických vlastností především tam, kde nejde pouhým správným prvotním návrhem dispozic zajistit ideální akustické vlastnosti, případně tam, kde jsou již prostory navržené a nesplňují dané parametry.

3.1 Základní princip

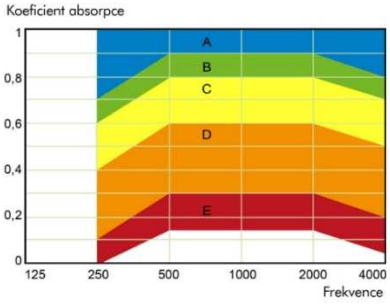
V kapitole *2.3.1.2 Optimální doba dozvuku* byly uvedeny hodnoty pro splnění normových požadavků. Jak již bylo řečeno, tak v případě, že pro splnění těchto hodnot nestačí samotný architektonický návrh, užije se konstrukcí pohlcujících zvuk. Ty jsou nejčastěji v podobě obkladu (existují samozřejmě i další varianty), který se umisťuje na strop nebo se osazuje na stěny daného prostoru. Touto úpravou se dosáhne jednak snížení hladiny akustického tlaku v poli odražených vln, ale také dalších akustických vlastností jako např. doby dozvuku T [s] vlivem zvýšení celkové zvukové pohltivosti prostoru A [m^2] *(viz kapitola 1.4.1, rovnice (8)).*

Akustické prvky jsou nabízeny různých tvarů, velikostí a především různých akustických vlastností. Při výběru a určení jejich kvalit, vzhledem k akustickým úpravám, je základním a ve většině případů nejdůležitějším faktorem činitel zvukové pohltivosti α [-] *(viz kapitola 1.4.1, rovnice (5)).*

Hodnota α nabývá hodnot 0 až 1, kde při úplném odrazu je α = 0 a při úplném pohlcení α = 1. Hodnocení materiálů dle α je názorné z následující *Tab. 4* a *Obr.* 9. Činitel zvukové pohltivosti α je kmitočtově závislý a nejčastěji se udává v oktávových pásmech do 125 Hz do 4000 Hz.

Třída zvukové pohltivosti (podle ČSN EN ISO 11654)	Hodnoty α_w	Třída pohltivosti (podle VDI 3755/2000)
A	0,9; 0,95; 1,00	velmi vysoko pohltivý
B	0,80; 0,85	velmi vysoko pohltivý
C	0,6; 0,65; 0,70; 0,75	vysoko pohltivý
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55	pohltivý
E	0,15; 0,20; 0,25	málo pohltivý
Není klasifikováno	0,05; 0,10	odrazivý

Tab. 4 – Třídy zvukové pohltivosti [25]



Obr. 9 – Třídy zvukové pohltivosti dle normy [5];[26]

Pozn. *α_w … vážený činitel zvukové pohltivosti je výsledkem srovnání mezi hodnotami činitele zvukové pohltivosti α při standardních frekvencích a referenční křivky v souladu s normou [5].*

3.2 Rozdělení dle funkčního principu a konstrukčního uspořádání

1) Porézní materiály
2) Akustické prvky založené na rezonančním principu
    a) Kmitající desky a membrány
    b) Dutinové rezonátory
3) Rozptylové prvky - difuzory

1) Porézní materiály

Při využití těchto materiálů v rámci úpravy a měření prostorů je rozhodující zejména tloušťka materiálu *h* [m] a tloušťka vzduchového polštáře *d* [m]. U těchto materiálů je specifickou vlastností to, že během pohlcování zvukové energie dochází k nevratné přeměně v energii tepelnou.

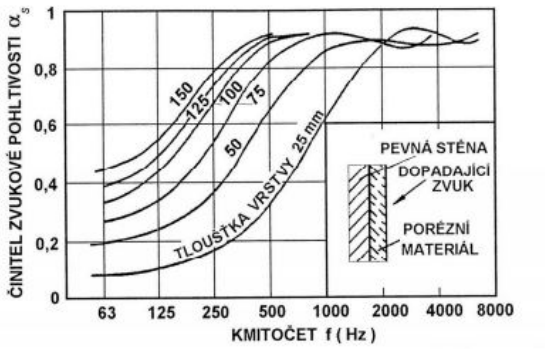
Dobrou účinnost těchto materiálů uchycených přímo na konstrukci je možné uvažovat od kmitočtu:

$$f_m = \frac{1}{10} \cdot \frac{c}{h} = \frac{34{,}3}{h} \quad [Hz] \tag{22}$$

kde: *h* … tloušťka materiálu [m]

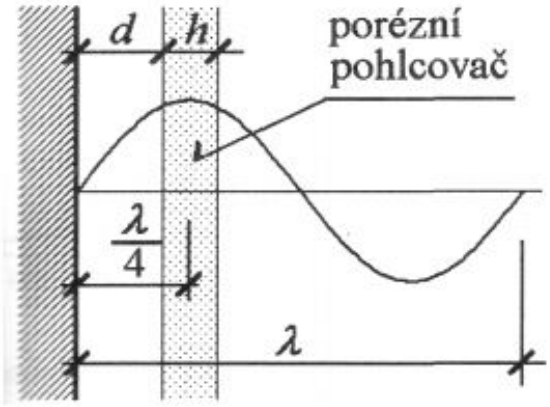
c … rychlost zvuku ve vzduchu [m.s^{-1}] – uvažováno 343 m.s^{-1} při 20°C

Z předešlé rovnice lze snadno vyčíst, že při pohlcování nízkých kmitočtů by bylo potřeba obkladů velkých tlouštěk, stejně tak je to patrné z *Obr. 10*.



Obr. 10 – Průběh činitele pohltivosti α v závislosti na tloušťce materiálu h a kmitočtu [14]

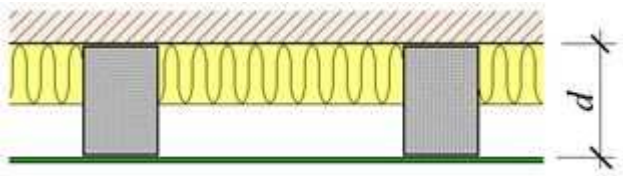
Obecně je tyto materiály nevýhodné přichytit přímo ke konstrukci. Je to z důvodu že u konstrukce je akustická rychlost nulová a přeměna energie na tepelnou je malá. Nejlepší (maximální) hodnoty činitele zvukové pohltivosti α [-] lze dosáhnout odsunutím od konstrukce o ¼ vlnové délky (*Obr. 11*), případně každé další liché násobky $\lambda/4$. V těchto místech je maximální akustická rychlost, stejně tak i přeměna akustické energie na tepelnou. Používají se spíše pro tlumení vyšších kmitočtů, kde vlnová délka λ je malá.



Obr. 11 – Ideální umístění obkladu z porézního materiálu [10]

2a) Akustické prvky založené na rezonančním principu – kmitající desky a membrány

Kmitající panely jsou obvykle tvořeny tuhou, pružně uloženou deskou na vzduchově uzavřeném rámu, a tak tvoří rezonanční soustavu. Názorná sestava je zobrazena na *Obr. 12*. Taková konstrukce pohlcuje zvuk v relativně úzkém pásu (*Obr. 13*) nejčastěji nízkých kmitočtů v blízkosti rezonančního kmitočtu f_r podle rovnice *(23)*. Tímto jsou takové konstrukce vhodným doplňkem k obkladům z porézních materiálů, které naopak efektivně tlumí u vyšších kmitočtů.



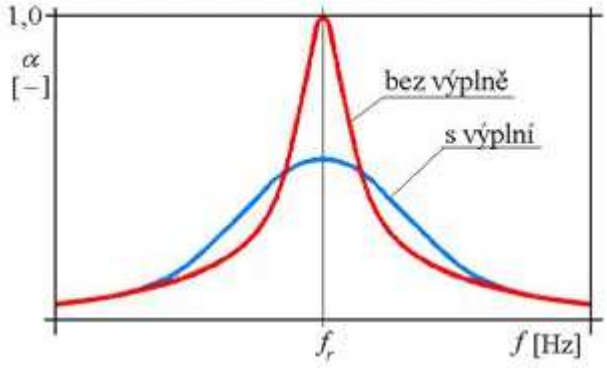
Obr. 12 – Schéma konstrukce kmitající membrány [27]

Z architektonického hlediska je zajímavou vlastností kmitajících membrán hladký a rovný povrch. Pohltivého účinku se docílí pomocí mechanických ztrát třením v pružném

uložení desky a odporem vzduchového polštáře proti stlačení. Jak již bylo řečeno, tak nejlepších výsledků se dosahuje v okolí rezonančního kmitočtu f_r (*rovnice (23)*). Částečného zlepšení se může dosáhnout v kombinaci s porézním pohlcovačem vloženém do vzduchové mezery mezi membránu a pevný povrch. Tím se docílí větší šířky kmitočtového pásma pohlcování, ale zároveň dojde ke snížení nejvyšší hodnoty v místě rezonančního kmitočtu (*Obr. 13*).

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m'.d}} \quad [Hz] \tag{23}$$

kde: m' … plošná hmotnost membrány [kg.m^{-2}]
d … tloušťka vzduchové mezery [m]



Obr. 13 – Vliv porézního pohlcovače v konstrukci s kmitající membránou [27]

***2b)* Akustické prvky založené na rezonančním principu – dutinové rezonátory**

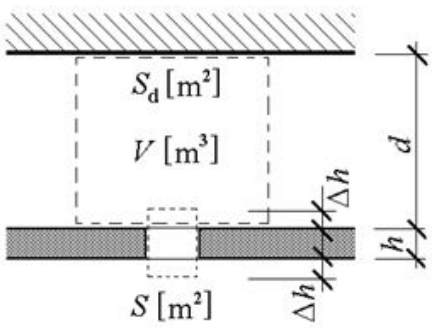
U dutinových panelů by šla najít jistá paralela s kmitajícími panely, opět jsou to prvky založené na principu rezonance. Samozřejmě jsou zde nějaké rozdíly:

1) jeden z nich je způsob uchycení desky, kdy v tomto případě se uchycují desky k nosnému roštu pevně
2) dalším rozdílem je samotný princip pohlcování, kdy u tohoto případu kmitá vzduchový válec, oproti kmitající membráně v předchozím případě (vzduchový válec má parametry $h' = h + 2\Delta h$ (*Obr. 14*).

Rezonanční kmitočet f_r pro tento případ se poté vypočte podle následujícího vztahu:

$$f_r = \frac{c_o}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{Vh'}} \approx 54\sqrt{\frac{S}{Vh'}} \quad [Hz] \tag{24}$$

Pozn. Výsledek podle rovnice (24) se limitně blíží k určité hodnotě, která závisí na hodnotě h´, která je ovlivněna korekcí $2\Delta h$ (určení korekce v literatuře [10]).



Obr. 14 – Kmitánaí vzduchového sloupce u dutinových rezonátorů [28]

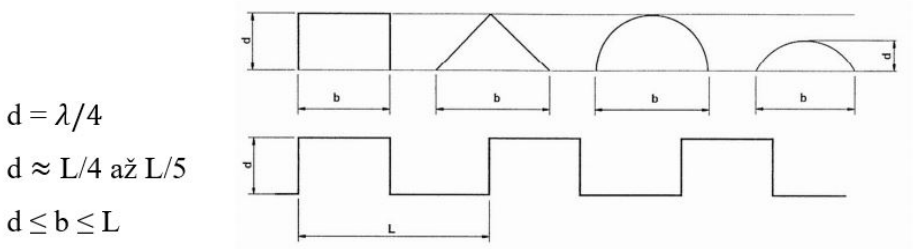
Kmitočtový průběh činitele zvukové pohltivosti α je silně závislý na tlumení rezonátoru. V tomto případě jsou tím myšleny vlastnosti vloženého porézního materiálu. Vlivem umístění se mohou přizpůsobit 2 parametry, buď je snaha o maximální hodnotu α, nebo větší šířku pásma účinnosti. Vysvětlení principu je analogií k *Obr. 13*.

3) Rozptylové prvky – difuzory

Odlišnou skupinou akusticky aktivních prvků jsou tzv. difuzory. Tyto prvky jsou konstruovány tak, že dopadající energii netlumí, jak tomu bylo v předešlých případech, ale naopak tuto dopadající energii rozptýlí všemi směry v prostoru. Tím se vytvoří difuzní pole (*viz kapitola 2.2*) a omezí se vliv rezonančních kmitočtů v daném prostoru.

Vhodným návrhem a následnou distribucí odraženého zvuku (z hlediska jak časového, tak i prostorového) lze výrazně vylepšit celkový dojem posluchače a zlepšit tím akustickou kvalitu daného prostoru.

Mezi důležité faktory, které jsou dobré u difuzoru hlídat, patří jeho dílčí rozměry vzhledem k dopadajícím zvukovým vlnám. Obecně dochází k rozptylu ve chvíli, kdy prostorová nerovnost (výškové členění reliéfu) určitého prvku rozměrově odpovídá, popř. je větší než délka zvukové vlny. Principiální poměry viz *Obr. 15*. V praxi se potom užívá výrobků buď s vhodným prostřídáním prvků nebo s pravidelným uspořádáním.



Obr. 15 – Difuzory – varianty struktur rozptylující zvuk [14]

4 Vybraný multifunkční sál

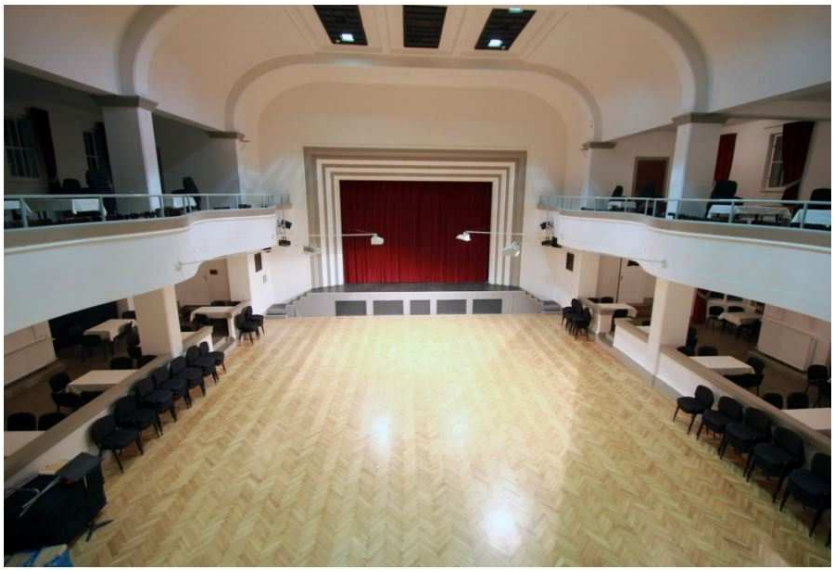
Jako navrhovaný prostor byl vybrán objekt kulturního zařízení Domovina v Praze Holešovicích. Jedná se o historický objekt, který byl realizován v letech 1919 až 1921. Budova je situována do vnitrobloku obytných domů. V roce 2002 objekt zasáhly velké povodně a později tak musel projít stavební rekonstrukcí [31].

Obr. 16 – Vybraný multifunkční sál – pohled do vnitrobloku [foto autora]

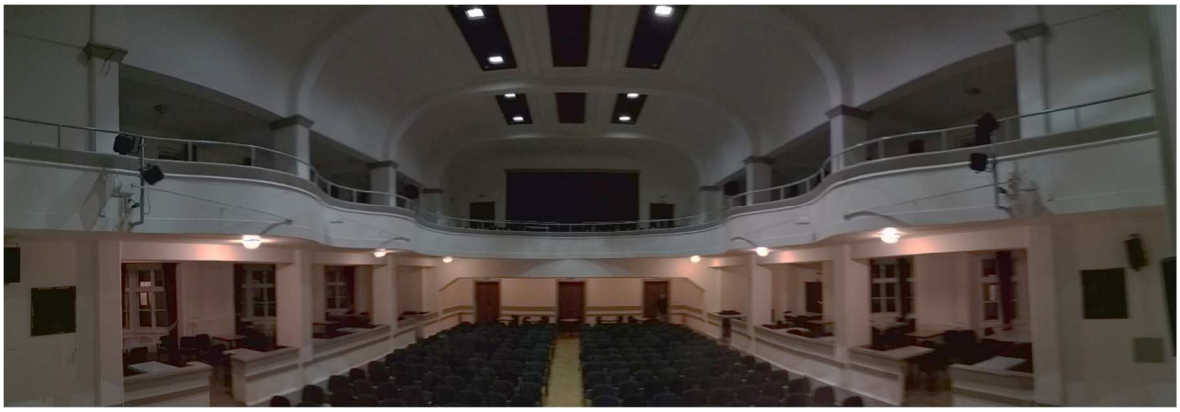
4.1 Popis vybraného prostoru

Vzhledem k tomu, že objekt je situovaný do vnitrobloku bytových domů, je přístup do něj umožněn přes jeden z nich, z ulice Na Maninách. Prochází se skrze chodbu, která ústí přímo do foyer objektu. Odtud je již přístup do jednotlivých prostor včetně vybraného hlavního sálu objektu. Mimo tento hlavní sál se v objektu nachází ještě jeden menší sál, hygienické zázemí, bar, salonky, šatny. [31]

Samotný prostor hlavního multifunkčního sálu je plošně i výškově členěn. V jednom podlaží se nachází hlavní plocha sálu (hlediště), jeviště a přísálí. V podlaží druhém pak prostory horní galerie. Půdorysně se sál rozkládá na ploše přibližně 250 m^2. K této ploše se samozřejmě dá přičíst jeviště (120 m^2), dolní přísálí (130 m^2), horní galerie (210 m^2). Celkově sál zaujímá objem přibližně 3050 m^3 (dle výpočtu uvedeného v *Příloha 2| Výpočet objemu daného multifunkčního sálu*).



Obr. 17 – Vybraný multifunkční sál – pohled z horní galerie [31]



Obr. 18 – Vybraný multifunkční sál – pohled z podia [foto autora z měření]

4.2 Stávající akustický stav

V současné době není v hlavním sále použito žádných speciálních akustických opatření vedoucích ke zlepšení akustických vlastností. Při běžném rozhovoru dochází v prostoru k poruše srozumitelnosti řeči, k částečné ozvěně. V současné době je v prostoru instalována základní reprosoustava pro lepší prezentaci hudby a řeči. Pro účely zlepšení prostorové akustiky bylo provedeno měření doby dozvuku, které je popsáno v následující kapitole.

4.3 Měření v objektu

Veškeré kroky měření byly provedeny v souladu s pokyny, které uvádějí příslušné normy [3] a [4].

Měření doby dozvuku ve vybraném multifunkčním sále proběhlo v pondělí 20. listopadu 2017 v odpoledních hodinách, kdy se po vzájemné dohodě s paní ředitelkou firmy, co objekt spravuje, našel volný termín pro uskutečnění měření.

Samotného měření se zúčastnili student Jan Novotný a vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Nováček, Ph.D. V době přípravy k měření byla v sále ještě paní ředitelka Ing. Anna Prchalová, která už se později samotného měření nezúčastnila.

Vybuzení zvuku bylo provedeno metodou prasknutí nafukovacího balónku. Tato metoda byla vyhodnocena jako dostatečná pro účely měření. Zvuk vzniklý prasknutím balonku plně postačuje pro změření doby dozvuku v daném prostoru. V průběhu měření byli zúčastnění chráněni sluchátky.

Použité vybavení k provedení měření:

Měřící sestava Norsonic

- Zvukový analyzátor Norsonic Nor140 (*Obr. 19*)
- Stativ k analyzátoru
- Akustický kalibrátor Norsonic Nor1251
- Mikrofonní předzesilovač Norsonic Nor1209
- Měřící mikrofon Norsonic Nor1225

Ostatní vybavení

Fotoaparát, svinovací metr, 12ks nafukovacích balónků + špendlík, chrániče sluchu – hluchátka, meteostanice

Obr. 19 - Zvukový analyzátor Norsonic Nor140 [foto autora z měření]

Postup měření

1) Po vstupu do objektu bylo provedeno vizuální zhodnocení prostoru. Mezitím, co z prostoru odcházeli poslední lidé z předešlé akce v sálu, došlo k přípravě samotného měření.

Pozn. Metoda pro měření byla zvolena integrovaná impulsová odezva se zdrojem zvuku pomocí prasknutí nafukovacího balónku.

2) Následně byla stanovena jednotlivá umístění pro zdroj zvuku a místa pro příjem zvuku. Veškeré pozice byly změřeny a zaneseny do půdorysného schématu sálu. *(Obr. 22 a Obr. 23)*

Pozn. Volba pozice splňuje požadavky příslušné normy [4] pro inženýrskou metodu měření. Dle této metody je vyžadováno minimálně 6 kombinací zdroj-mikrofon. Během měření byly určeny celkově 2 místa zdroje zvuku a 6 poloh mikrofonu, tzn. celkově 12 kombinací zdroj-mikrofon. Mimo jiné byly splněny i požadavky na vzdálenosti od odrážejících povrchů, podlahy a na vzájemné vzdálenosti zdroj-mikrofon.

3) Po určení jednotlivých poloh pro měření byl sestaven stativ a na něj uchycen mikrofon ve výšce 1,3 m nad podlahou (*Obr. 20*).

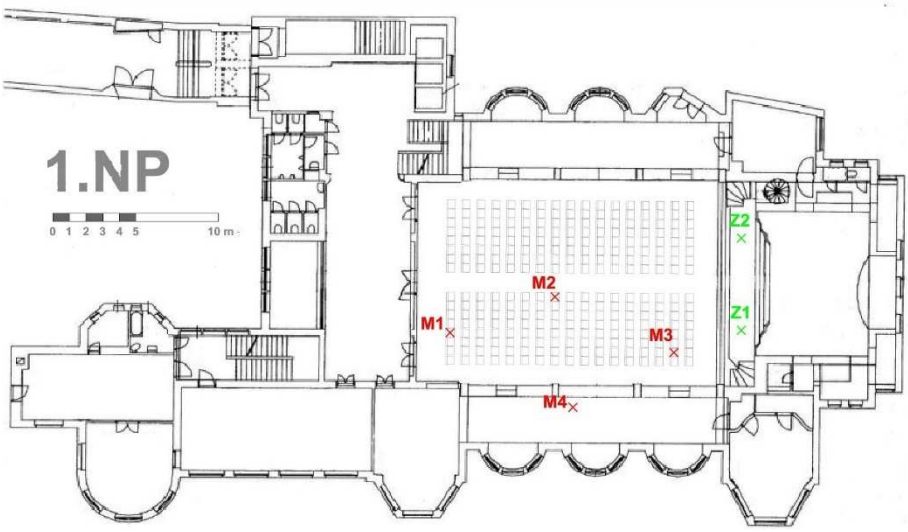
Pozn. Zvolená výška - průměrná výška sedícího diváka/posluchače

4) Jednotlivá měření proběhly celkem ve 12 ti opakováních, postupně byl umístěn mikrofon na 6 pozicích a ke každé z těchto poloh byl ze dvou míst vyslán zvuk pomocí prasknutí balónku. Prasknutí balónku bylo provedeno ve výšce přibližně 1,5 m nad podlahou jeviště (*Obr. 21*).

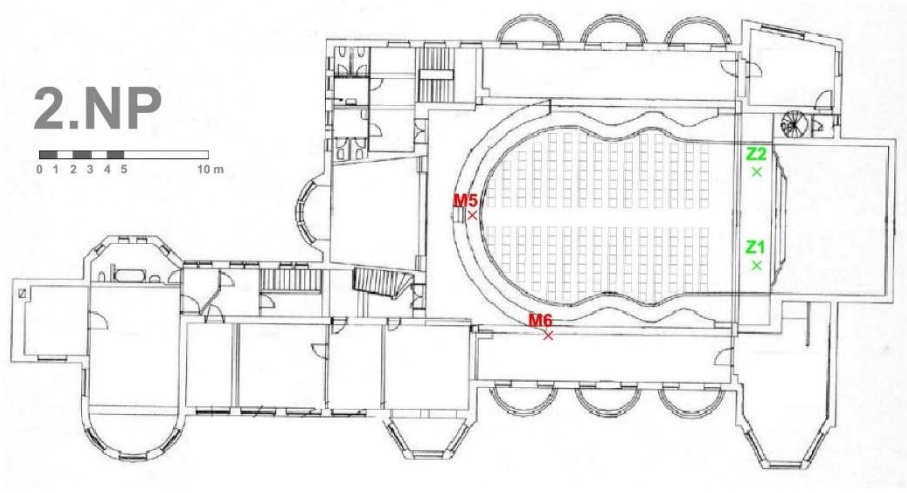
5) Jednotlivé výsledné hodnoty doby dozvuku z každé pozice byly odečteny z displeje analyzátoru a zapsány do tabulky (*Tab. 5* a *Tab. 6*).

Obr. 20 – Foto z měření I [J. Nováček]

Obr. 21 – Foto z měření II [J. Nováček]



Obr. 22 – Půdorysné schéma sálu 1.NP – rozmístění zdroj-mikrofon [upraveno z [31]]



Obr. 23 – Půdorysné schéma sálu 2.NP – rozmístění zdroj-mikrofon [upraveno z [31]]

4.3.1 Výsledky měření

Podmínky během měření:

- teplota: 19,6°C
- vlhkost vzduchu: 65 %
- tlak vzduchu: 994 hPa

Změřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s] získané měřením na místě jsou uvedené v následujících tabulkách: *Tab. 5* a *Tab. 6*.

V *Tab. 7.* byl proveden aritmetický průměr všech měření, jednotlivě pro každé oktávové pásmo.

Pozn. Pozice měření a zdroje zobrazeny ve schématu na Obr. 22 a Obr. 23. Sledované hodnoty v rozsahu 125 ÷ 4000 Hz jsou zvýrazněny žlutou barvou.

Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M1	Z1	2,93	3,11	2,31	1,85	1,44	1,38	1,16	-
	Z2	3,21	3,03	2,26	1,78	1,38	1,35	1,19	-
M2	Z1	3,06	2,86	2,25	1,81	1,38	1,39	1,21	-
	Z2	5,26	2,96	2,25	1,80	1,40	1,35	1,20	-
M3	Z1	3,05	3,05	2,40	1,76	1,40	1,30	1,12	-
	Z2	2,87	3,03	2,34	1,79	1,43	1,28	1,16	-
M4	Z1	2,84	2,73	2,16	1,76	1,45	1,35	1,22	-
	Z2	3,24	3,24	2,32	1,71	1,39	1,30	1,18	-

Tab. 5 – Naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s] – prostory hlediště

Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M5	Z1	4,08	2,90	2,14	1,83	1,36	1,36	1,20	-
	Z2	3,57	2,67	2,28	1,69	1,41	1,38	1,25	-
M6	Z1	-	3,28	2,52	1,90	1,38	1,33	1,22	-
	Z2	3,23	3,31	2,18	1,78	1,45	1,37	1,22	-

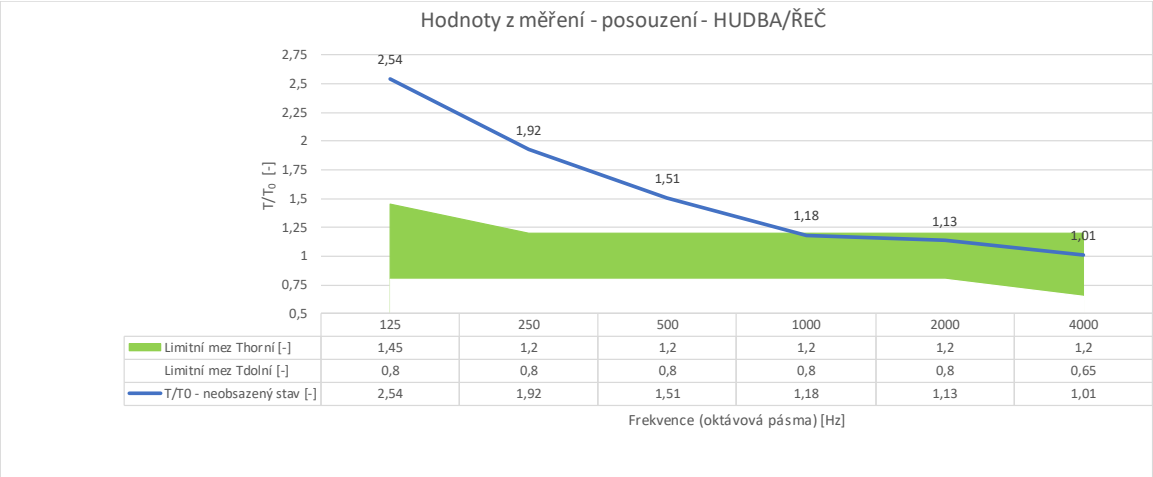
Tab. 6 – Naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s] – horní ochoz

Aritmetický průměr všech měření	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	3,39	3,01	2,28	1,79	1,41	1,35	1,19	-

Tab. 7 – Aritmetický průměr měření obou podlaží

Podle *rovnice (21)* uvedené v kapitole *2.3.1.2* se vypočte hodnota optimální doby dozvuku T_{opt}. Následně se určí horní a dolní mez pro tuto hodnotu podle *Tab. 2*.

Pozn. Dosazovaný objem V [m^3] daného prostoru je uvažovaný jako 3045,2 m^3 dle výpočtu viz Tab. 17 v Příloha 2.



Graf 1 – Zobrazení naměřených hodnot

4.3.2 Hodnocení stávajícího stavu na základě měření

Vyhodnocení stávajícího stavu bude primárně založeno na měření přímo ze sálu (uvedených v *kapitole 4.3* a *4.3.1*) a potřebných dopočtů. V dalších částech práce bude provedeno porovnání s výsledky získaných z počítačového modelu sálu a ručním výpočtem sloužícího především pro hrubou kontrolu dílčích výpočtů.

Příslušná norma ČSN 73 0527 [2] pro hodnocení stávajícího stavu uvádí, že pro samotné určení splnění podmínek doby dozvuku, ve vybraném kulturním zařízení, je zapotřebí porovnání s hodnotami doby dozvuku v obsazeném stavu. Jelikož získané hodnoty z měření na místě byly získány v neobsazeném stavu (resp. na místě byli přítomné 2 osoby, které prováděli měření), je třeba tyto hodnoty dopočítat právě z hodnot naměřených.

		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Pozn.
		125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	
$T_{neobsazený\ stav\ (měření)}$	[s]	3,01	2,28	1,79	1,41	1,35	1,19	1)
$A_{celková\ (neobsazená)}$	[m^2]	164,68	217,31	277,56	353,08	369,05	415,66	2)
$A_{1\ divák}$	[m^2]	0,15	0,30	0,44	0,45	0,46	0,46	3)
$A_{272\ diváků}$	[m^2]	40,80	81,60	119,68	122,40	125,12	125,12	4)
$A_{celková\ (obsazená)}$	[m^2]	205,48	298,91	397,24	475,48	494,17	540,78	5)
$T_{obsazený\ stav\ (výpočet)}$	[s]	2,42	1,66	1,25	1,04	1,00	0,92	6)
T_0	[s]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	7)

Tab. 8 – Výpočet obsazeného stavu (100%) – původní stav

Pozn. k Tab. 8:

[1)] Průměr z naměřených hodnot doby dozvuku *T* (dle *Tab. 7*)

[2)] Celková pohltivost prostoru – neobsazený stav (spočtená dle *rovnice (17)*)

[3] Pohltivost 1 diváka (určená dle [14])

[4] Kapacita míst k sezení – 100 % obsazenost (hlavní hlediště sálu bez přilehlých prostor)

[5] Celková pohltivost prostoru – obsazený stav (spočtená dle *rovnice (17)*)

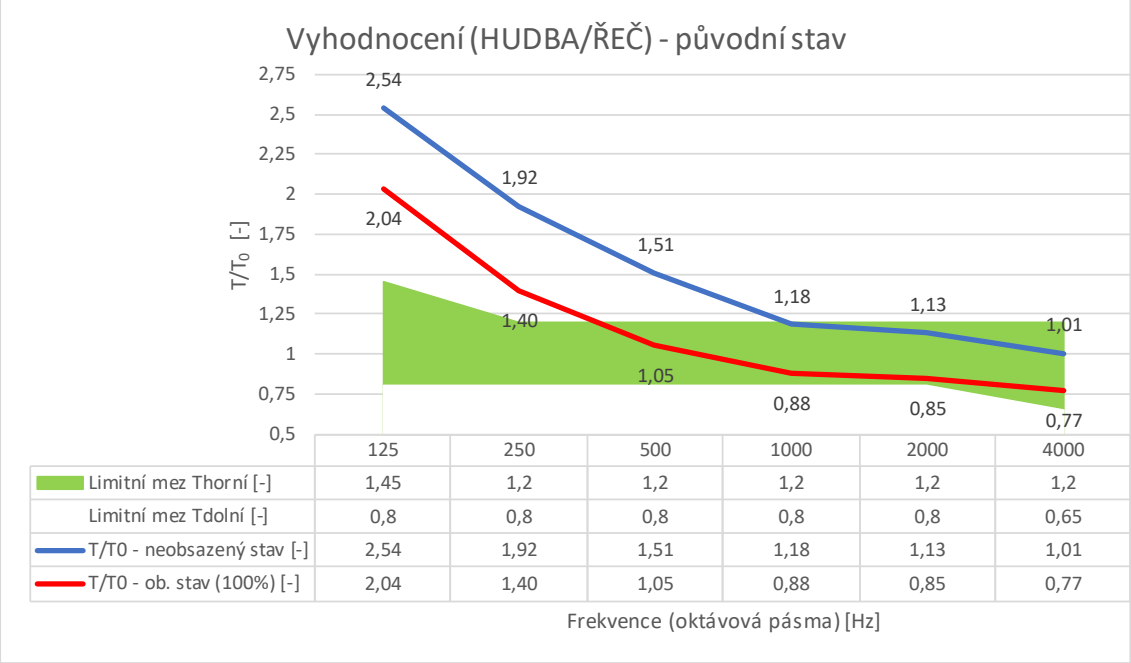
[6] Dopočtená doba dozvuku T – obsazený stav 100 %

[7] Požadavek normy [2] na optimální dobu dozvuku T_o

Po dopočtu doby dozvuku T v obsazeném stavu může dojít k samotnému vyhodnocení (podle varianty využití sálu „hudba/řeč“), které je zobrazeno v následující tabulce a grafu.

Posouzení (HUDBA-ŘEČ)		**Frekvence (oktávová pásma) [Hz]**					
		125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
T/T_0 - neobsazený stav	[-]	2,54	1,92	1,51	1,18	1,13	1,01
T/T_0 - ob. stav (100%)	[-]	2,04	1,40	1,05	0,88	0,85	0,77
Limitní mez $T_{horní}$	[-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez $T_{dolní}$	[-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65

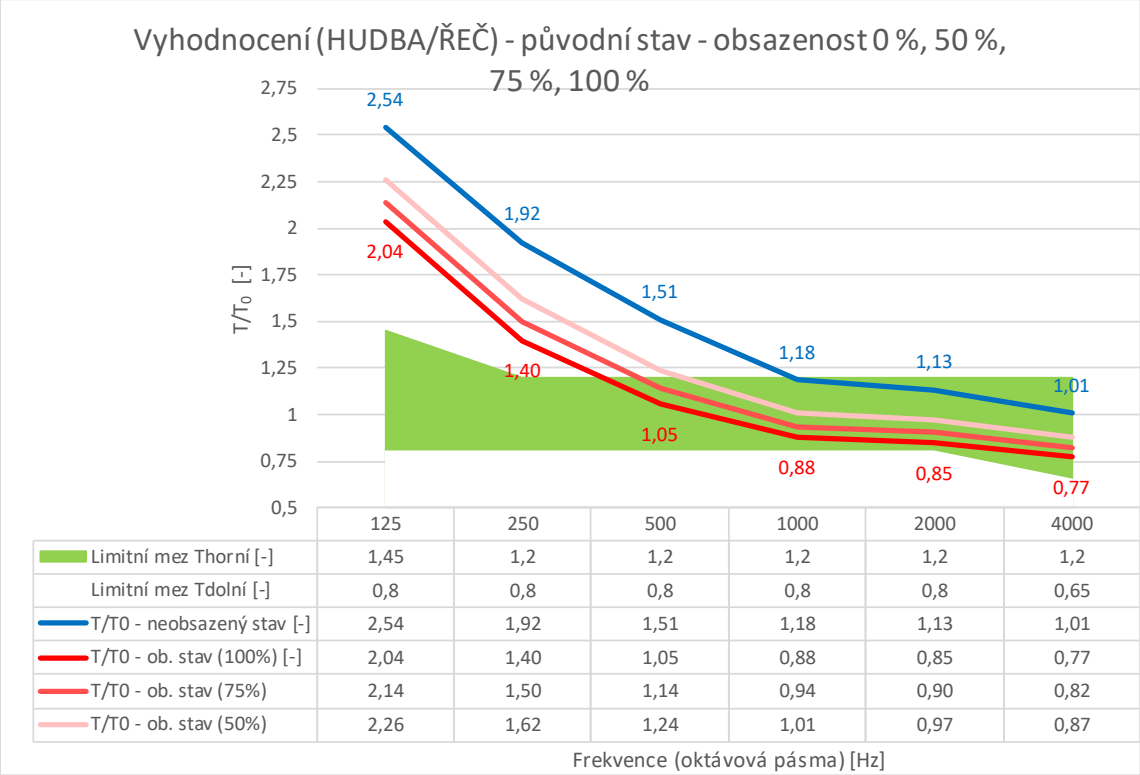
Tab. 9 – Vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 100 %)



Graf 2 – Vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 100 %)

Z předešlého grafu jsou názorně patrné určité skutečnosti, například že doba dozvuku pro nízké a střední kmitočty nesplňuje doporučené hodnoty normy. Další zajímavostí může být vliv obsazenosti hlavního prostoru sálu na celkovou dobu dozvuku.

Pro tyto účely byly spočteny celkem 3 varianty obsazenosti: 100 %, 75 %, 50 %. Výpočet je obdobný jako pro plnou obsazenost sálu, postup výpočtu pro jednotlivé varianty je uveden v *Příloha 2*. Na následujícím grafu jsou zobrazeny všechny varianty pohromadě.



	125	250	500	1000	2000	4000
Limitní mez Thorní [-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez Tdolní [-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65
T/T0 - neobsazený stav [-]	2,54	1,92	1,51	1,18	1,13	1,01
T/T0 - ob. stav (100%) [-]	2,04	1,40	1,05	0,88	0,85	0,77
T/T0 - ob. stav (75%)	2,14	1,50	1,14	0,94	0,90	0,82
T/T0 - ob. stav (50%)	2,26	1,62	1,24	1,01	0,97	0,87

Frekvence (oktávová pásma) [Hz]

Graf 3 – Hromadné vyhodnocení doby dozvuku – původní stav

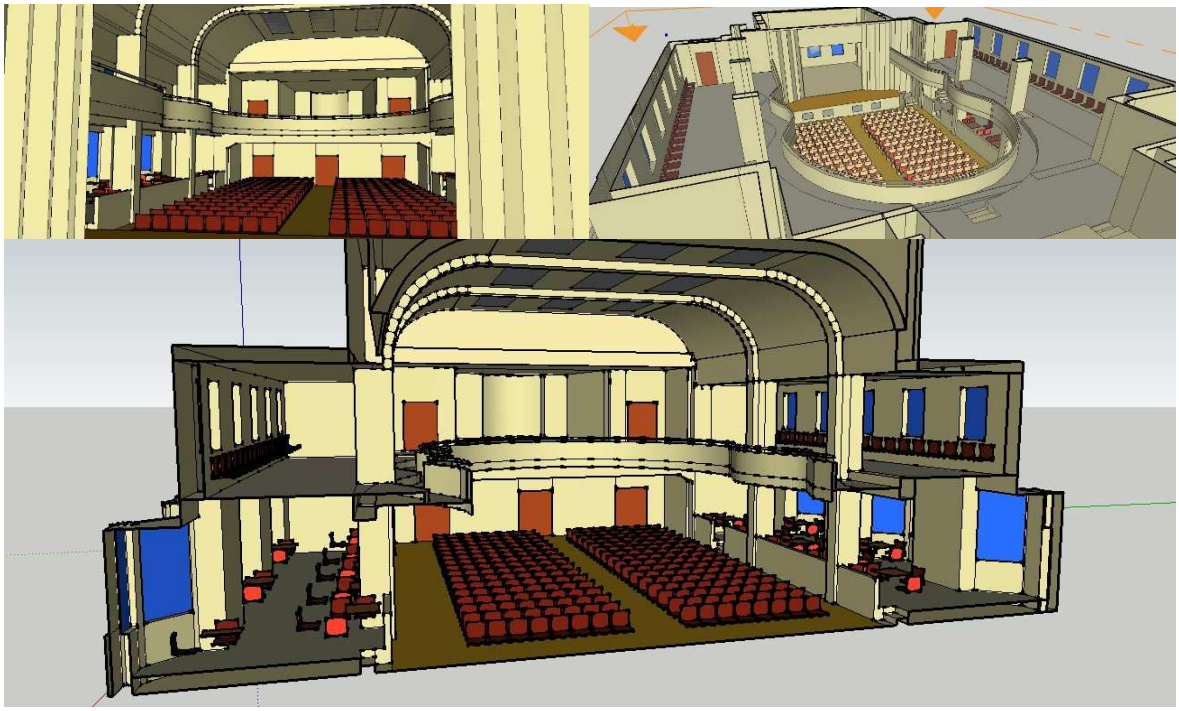
4.4 Počítačová simulace

Pro prostor vybraného multifunkčního sálu byl vytvořen počítačový model. Jedním z hlavních důvodů vytvoření modelu je potřeba simulování akustického chování prostoru za různých situací. Pro správné nastavení (chování modelu) se model postupně musí optimalizovat pomocí hodnot z reálného měření.

4.4.1 Příprava modelu

Prostory sálu byly prvotně vymodelovány v programu SketchUp a následně exportovány přes instalovaný plugin do programu ODEON 14.00 Combined Room Acoustics Software.

Pozn. Na následujících obrázcích bude ukázka z tvorby modelu v obou programech, více náhledů je zobrazených v Příloha 4 | Ukázka tvorby a práce s modelem.



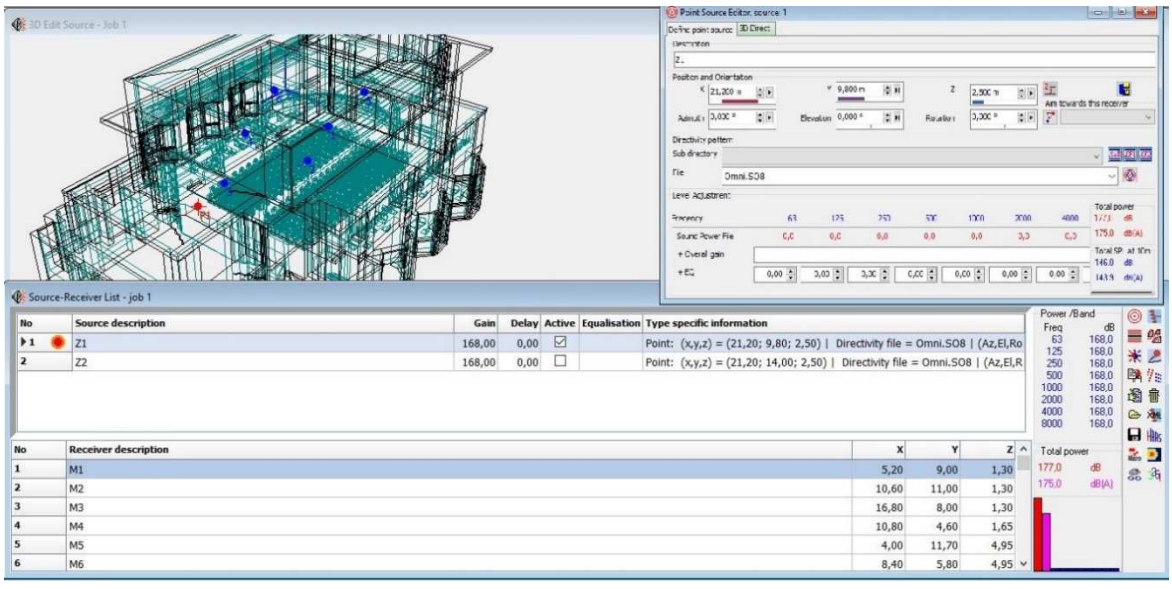
Obr. 24 – Ukázka z tvorby modelu v programu SketchUp

Obr. 25 – Ukázka z tvorby modelu v programu Odeon

Po vytvoření modelu a následném exportu do programu, bylo zapotřebí ho správně konfigurovat. Důležité bylo zajistit, co možná nejpodobnější chování modelu s reálným prostorem tak, aby simulace měření proběhla co nejpřesněji s reálným měřením popsaným v *kapitole 4.3* a *4.3.1*.

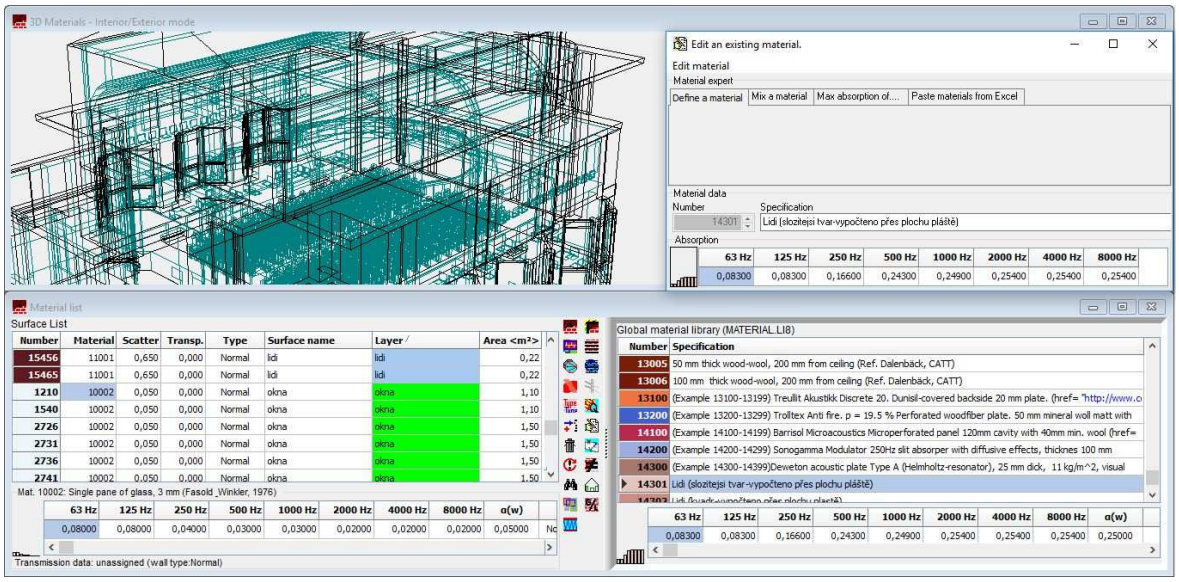
Po importu do programu byl model před dalšími kroky nastavení otestovaný na těsnost při šíření zvuku. Samotný test zachycuje *Obr. 32* v *Příloha 4*.

Následně již byly postupně přiřazovány konkrétní parametry. Nejprve se modelu přiřadily jednotlivé zdroje zvuku (Z1 a Z2) s měřícími pozicemi (M1 až M6) shodně tak, jak tomu bylo při měření (*Obr. 26* níže a *Obr. 33* v *Příloha 4* zobrazující situaci ve 3D).



Obr. 26 – Jednotlivá nastavení zdroj (Z) - mikrofon (M)_ukázka z programu

Dalším krokem následně bylo vytvoření knihovny materiálů s přiřazením k jednotlivým povrchům. Zde se z velké části využila stávající knihovna, kde se vybraly vhodné materiály. Přiřazení materiálů je zobrazeno na následujícím *Obr. 27*, který zachycuje práci v programu. Použité (popř. nově vytvořené) materiály jsou zaznamenány v *Tab. 20* v *Příloha 4*.



Obr. 27 – Přiřazení materiálu z knihovny – ukázka z programu

Pozn. Při tvorbě knihovny a přiřazení materiálu bylo ještě zapotřebí ohlídat zejména dva další parametry:

1) Scattering coefficient (SC) -> „koeficient rozptylu“ – změnit ze základního nastavení hodnoty 0,05, zejména pro povrchy týkající se oblasti publika, na doporučenou hodnotu 0,6÷0,7

2) Type (TY) -> „typ stěny/povrchu“ – změnit ze základního nastavení hodnoty normal, zejména u povrchů týkající se zaoblených hran stropu a balkonu na hodnotu fractional

Oba tyto parametry mají velký vliv na způsob výpočtu a následnou přesnost interpretovaných výsledků.

V této fázi je již možný spustit rychlý odhad doby dozvuku (ukázka na *Obr. 34*), který dá počáteční hodnotu pro přesnější nastavení samotného výpočtu. V nastavení se primárně určuje přesnost výpočetní metody /ekvivalent k *Tab. 3* v kapitole *2.3.1.3*/ (ukázka na *Obr. 36*). Dále právě v tomto nastavení se uplatní hodnota doby dozvuku z rychlého odhadu. V neposlední řadě se právě zde zadají podmínky při měření: teplota a vlhkost vzduchu, které mají vliv na příspěvek vlivem útlumu zvuku ve vzduchu (podrobněji v *kapitole 2.3.1.1*).

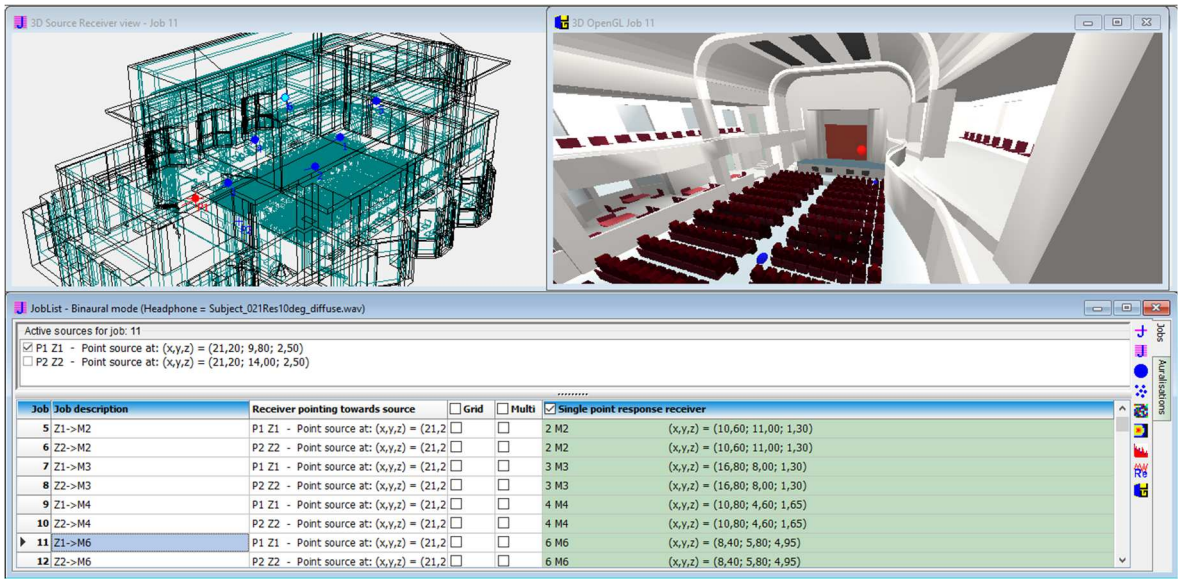
4.4.2 Výstupy z modelu

Ve chvíli, kdy jsou nastaveny všechny podstatné parametry modelu nebrání nic tomu spustit výpočet.

Program nabízí vesměs 2 metody výpočtu pro dobu dozvuku. Jedná se o již zmíněnou metodu Quick estimate a Global estimate. Obě metody vyhodnotí dobu dozvuku hromadně, v tomto případě konkrétně buď pro zdroj Z1 nebo zdroj Z2.

Pozn. Princip obou funkcí je popsán v Příloha 3 a názorné výstupy pak v Příloha 4 na Obr. 34 a Obr. 35.

Existuje zde ještě jedna varianta, kdy se sestaví plán úkolů (jednotlivých kombinací - zdroj/mikrofon) v programu nazývaný jako „*Job list*“ a spustí se výpočet pro jednotlivé zadané kombinace (*Obr. 28*). V tomto případě se jednalo o 12 kombinací zdroj/mikrofon (Z1, Z2 a M1 až M6). Tímto způsobem se získají hodnoty pro každou konkrétní kombinaci zvlášť a zpětně se můžou hodnoty zprůměrovat. Ač se může zdát tato varianta složitější kvůli zpětnému získávání průměrné hodnoty, tak přináší výhodu výpočtu dalších zkoumaných parametrů kvality zvuku (uvedených později v textu) vždy pro konkrétní kombinaci zdroj/mikrofon.



Job	Job description	Receiver pointing towards source	Grid	Multi	Single point response receiver	
5	Z1->M2	P1 Z1 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	2 M2	(x,y,z) = (10,60; 11,00; 1,30)
6	Z2->M2	P2 Z2 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	2 M2	(x,y,z) = (10,60; 11,00; 1,30)
7	Z1->M3	P1 Z1 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	3 M3	(x,y,z) = (16,80; 8,00; 1,30)
8	Z2->M3	P2 Z2 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	3 M3	(x,y,z) = (16,80; 8,00; 1,30)
9	Z1->M4	P1 Z1 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	4 M4	(x,y,z) = (10,80; 4,60; 1,65)
10	Z2->M4	P2 Z2 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	4 M4	(x,y,z) = (10,80; 4,60; 1,65)
11	Z1->M6	P1 Z1 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	6 M6	(x,y,z) = (8,40; 5,80; 4,95)
12	Z2->M6	P2 Z2 - Point source at: (x,y,z) = (21,2	☐	☐	6 M6	(x,y,z) = (8,40; 5,80; 4,95)

Obr. 28 – Přiřazení modelových kombinací – ukázka z programu

4.4.3 Hodnocení stávajícího stavu na základě modelování

V této části dojde k vyhodnocení výsledků založených na vytvořeném modelu a porovnání s reálným měřením.

Jednotlivé dílčí výsledky jsou uvedeny v *Příloha 5* (*Tab. 21* a *Tab. 22*). Zde jsou pak hodnoceny průměrné hodnoty jednotlivých stavů, které jsou zobrazeny v příslušných grafech.

Odeon - původní (NEOBSAZENÝ) stav								
Aritmetický průměr všech měření	**Frekvence (oktávová pásma) [Hz]**							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
	2,37	2,26	1,98	1,70	1,51	1,41	1,33	0,89

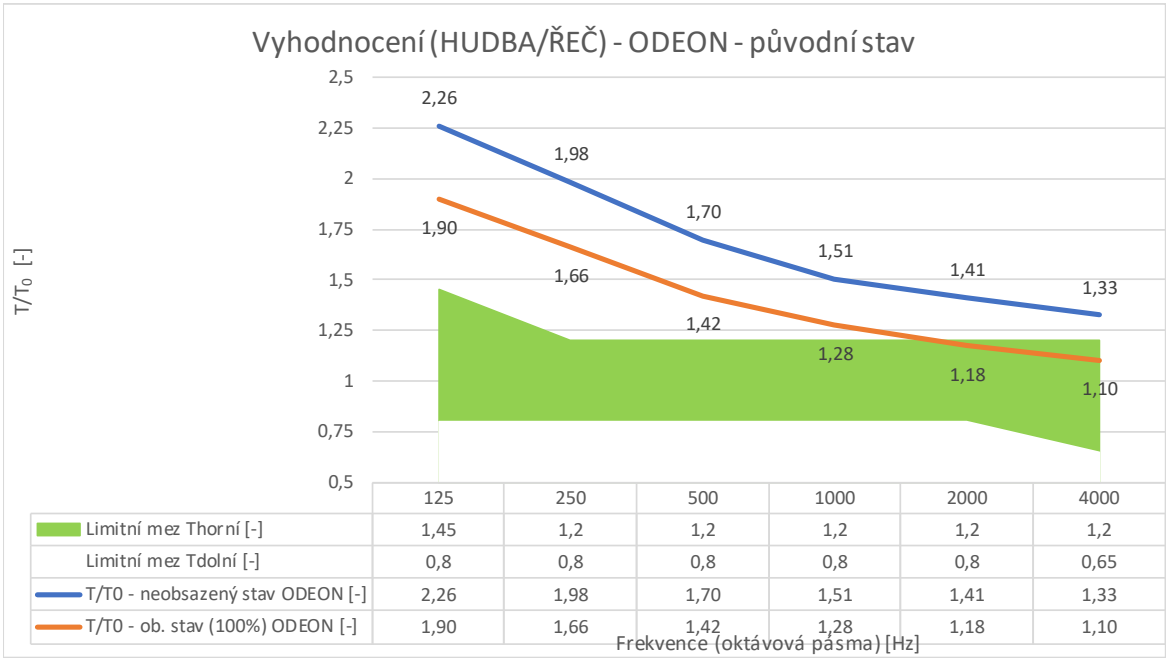
Tab. 10 – Výňatek výsledků z Tab. 21 z přílohy

Odeon - původní (OBSAZENÝ) stav								
Aritmetický průměr všech měření	**Frekvence (oktávová pásma) [Hz]**							
	63	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**
	2,07	1,90	1,66	1,42	1,28	1,18	1,10	0,78

Tab. 11 – Výňatek výsledků z Tab. 22 z přílohy

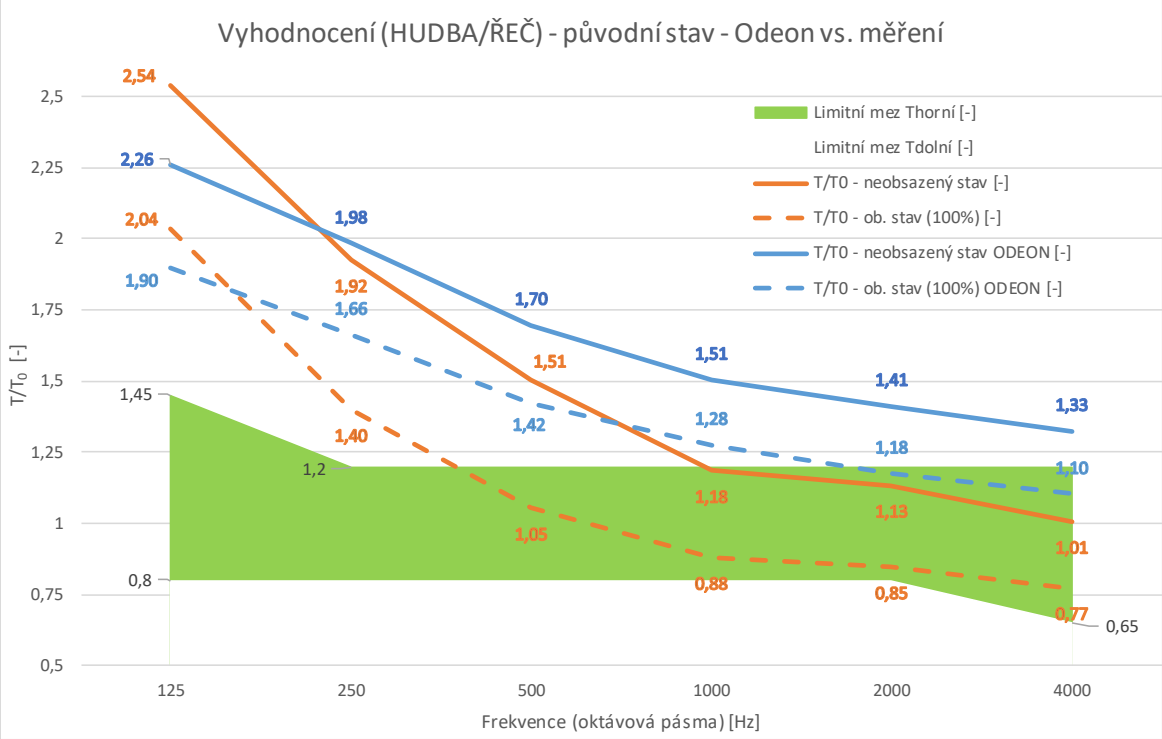
Posouzení (HUDBA-ŘEČ)		**Frekvence (oktávová pásma) [Hz]**					
		125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
T_0	[s]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
T/T_0 - neobsazený stav ODEON	[-]	2,26	1,98	1,70	1,51	1,41	1,33
T/T_0 - ob. stav (100%) ODEON	[-]	1,90	1,66	1,42	1,28	1,18	1,10
Limitní mez $T_{horní}$	[-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez $T_{dolní}$	[-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65

Tab. 12 - Vyhodnocení doby dozvuku – ODEON – původní stav



Graf 4 – Vyhodnocení doby dozvuku – ODEON – původní stav

Na následujícím grafu jsou shrnuty výsledky jak z měření na místě, tak z modelu z Odeonu.



Graf 5 – Porovnání obou přístupů – měření a modelování prostoru

Z grafu je patrná odchylka výsledků modelování vůči měření přímo na místě. I přes snahu optimalizovat model tak, aby se co nejvíce blížil realitě, určitá nepřesnost zůstává. Odchylka mezi oběma stavy se pohybuje v průměru kolem 15% (na určitých frekvencích dosahuje hodnot nižších naopak na některých o trochu vyšší).

Samotná odchylka od hodnot získaných z reálného měření je z velké části způsobena nepřesným přiřazením materiálů k jednotlivým povrchům. Tento jev je u rekonstrukcí běžný, protože neexistuje způsob získání přesných hodnot použitých materiálů stavby.

Pro další účely návrhu jednotlivých akustických úprav budou za výchozí považovány hodnoty získané modelováním z Odeonu.

4.4.4 Hodnocení stávajícího stavu – další sledované parametry

V této kapitole bude provedeno hodnocení prostoru na základě dalších parametrů, kromě doposud sledované doby dozvuku. Konkrétně se jedná o parametry: D_{50}, C_{50}, C_{80}, *STI*, *BR*, *HFR*. Jednotlivé parametry jsou detailněji rozebrány v *kapitole 4.6.1*, která obsahuje význam jednotlivých veličin a jejich doporučené hodnoty.

Pro všechny kombinace zdroj-mikrofon byly z počítačové simulace sepsány, popř. dopočteny jednotlivé parametry.

Pro názornost je zobrazena jen vybraná kombinace (M1/Z1 a M1/Z2 pro oba stavy: obsazený i neobsazený). Hromadná tabulka se všemi kombinacemi je uvedena v *Tab. 25* v příloze.

M1		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,27	0,30	0,35	0,38	0,40	0,41	0,38	0,41	0,46	0,49	0,51	0,52
	Z2	0,32	0,35	0,40	0,44	0,46	0,47	0,38	0,42	0,48	0,52	0,55	0,56
C_{50} [dB]	Z1	-4,2	-3,6	-2,8	-2,1	-1,7	-1,7	-2,1	-1,5	-0,8	-0,2	0,3	0,4
	Z2	-3,3	-2,7	-1,8	-1,1	-0,7	-0,5	-2,1	-1,4	-0,4	0,3	0,8	1,1
C_{80} [dB]	Z1	-1,7	-0,9	0,1	1,0	1,3	1,4	0,4	1,2	2,1	2,9	3,3	3,5
	Z2	-1,2	-0,5	0,4	1,2	1,6	1,9	0,0	0,8	1,9	2,6	3,2	3,5
STI [-]	Z1	0,50						0,57					
	Z2	0,53						0,57					
BR [-]	Z1	1,38						1,34					
	Z2	1,33						1,29					
HFR [-]	Z1	1,16						1,17					
	Z2	1,15						1,18					

Tab. 13 - Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry [výňatek z *Tab. 25*]

Samotné vyhodnocení jednotlivých parametrů je provedeno hromadně, spolu s výsledky získaných z akustických úprav prostoru v *kapitole 4.6.3* .

4.5 Kontrolní ruční výpočet

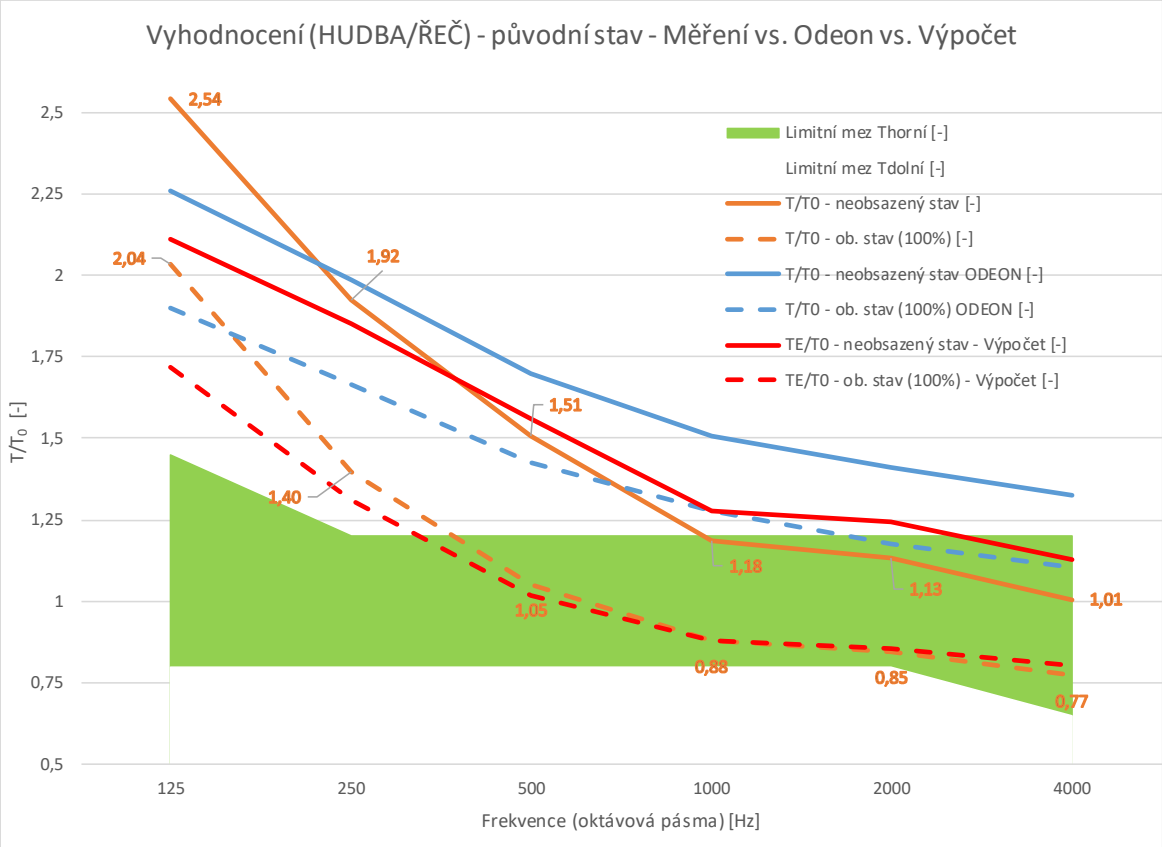
Pro kontrolu správného modelování a kontrolu postupu v celé práci je mimo provedené měření na místě udělán také základní kontrolní výpočet. Výpočet obsahuje jednotlivé stavy, které kopírují postupně stavy v průběhu modelování.

Veškeré výstupy ručních výpočtů jsou provedeny ve formě tabulek uvedených jednotlivě v *Příloha 6* (*Tab. 27*, *Tab. 28* a *Tab. 29*). Níže bude provedeno vyhodnocení pomocí hromadného grafu.

4.5.1 Porovnání původního stavu s ostatními metodami

Na následujícím grafu je shrnutí všech tří přístupů původního stavu bez úprav (měření na místě, modelování v Odeonu, kontrolní ruční výpočet).

Pozn. Graf má spíše ilustrační charakter zejména pro zobrazení jednotlivých odchylek od skutečného měření, jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v Tab. 24, případně podrobnější hodnoty jsou uvedeny v jednotlivých tabulkách příslušného stavu.



Graf 6 – Ilustrativní porovnání přístupů – Měření vs. Odeon vs. Kontrolní výpočet

4.6 Návrh akustických úprav

V této části bude popsán postup ke zlepšení akustického chování prostoru. Nejprve bude k dispozici krátké doplnění teoretických informací týkající se následného hodnocení. Samotný návrh bude proveden pomocí vytvořeného, a na základě měření optimalizovaného, modelu v softwaru Odeon.

4.6.1 Doplnění sledovaných parametrů

Kromě dříve popsaných parametrů bude daný prostor hodnocen podle dalších, níže uvedených kritérií, sledujících celkové akustické chování prostoru (odvozených z impulsové odezvy). Jednotlivé parametry uvádí také normy [1] a [7].

Optimální doba dozvuku je sice významným kritériem posuzující akustickou kvalitu sálů, ne však jediným. Pro následnou úpravu prostoru byly vybrány parametry získané pomocí počítačové simulace na vytvořeném modelu. Každý z nich je důležitý pro určitý subjektivní atribut kvality poslechu zvuku v uzavřeném prostoru.

V současné době v prostorové akustice neexistuje klasifikace akustického chování na základě celkového jednočíselného zhodnocení, proto je vhodné usilovat o dosažení optimálních hodnot u všech objektivních veličin jednotlivě.

1) Zřetelnost D_{50} /Definition/

Je definována jako poměr zvukové energie, která dorazí do místa příjmu do určitého času *T* vůči celkové energii. Konkrétně hodnota D_{50} je definována poměrem energií časových úseků 50 ms.

$$D_T = \frac{\int_0^T h^2(t)dt}{\int_0^\infty h^2(t)dt} = \frac{E_T}{E_\infty} => \; D_{50} = \frac{\int_0^{50\,ms} p^2(t)dt}{\int_{0\,ms}^\infty p^2(t)dt} = \frac{E_{50}}{E_\infty}\,[-] \qquad (25)$$

kde: $h^2(t)$ … normalizovaná impulsová odezva prostoru

$p^2(t)$ … konkrétní impulsová odezva prostoru

E_i … jednotlivé zvukové energie přicházející do místa příjmu do času T

Hodnoty zřetelnosti D jsou svou hodnotou ekvivalentem míry zřetelnosti *C*. Postupně budou popsány 2 parametry míry zřetelnosti: 2a) Míra zřetelnosti C_{50} [dB]

2b) Míra jasnosti C_{80} [dB]

2a) Míra zřetelnosti „C_{50}“ /Clarity/

Tento parametr udává kritérium akustické srozumitelnosti pro mluvené slovo. Je definována podle následující rovnice:

$$C_{50} = 10log\frac{\int_0^{50\ ms} p^2(t)dt}{\int_{50\ ms}^{\infty} p^2(t)dt} = 10log\frac{E_{50}}{E_\infty - E_{50}}\ [\text{dB}] \tag{26}$$

Optimální hodnoty: Každá kladná hodnota nad 0 dB poukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova zdroje zvuku. Naopak hodnoty pod -5 dB označují více odraznou místnost, než by pro přednes mluveného slova byla vhodná.

2b) Míra jasnosti „C_{80}“ /Clarity/

Tento parametr udává kritérium akustické srozumitelnosti pro hudbu, zároveň se považuje za nejvhodnější ukazatel poslechového vnímání „jasnosti“ pro časové rozlišení tónů. Je definována podle následující rovnice:

$$C_{80} = 10log\frac{\int_0^{80\ ms} p^2(t)dt}{\int_{80\ ms}^{\infty} p^2(t)dt} = 10log\frac{E_{80}}{E_\infty - E_{80}}\ [\text{dB}] \tag{27}$$

Optimální hodnoty: Silně záleží na hudebním žánru, obecně pro hudbu lze považovat hodnoty 1 ± 2 dB za optimální hodnoty. Konkrétnější určení optimálních hodnot C_{80} pro jednotlivé hudební žánry je uveden v *Tab. 16*, ale v žádném případě by hodnota neměla přesáhnout hranici +8 dB.

3) Index přenosu mluveného projevu „*STI*“ /Speech transmission index/

Jedná se o parametr, který sleduje srozumitelnost řeči v jednotlivých zkoumaných místech prostoru. Obecně bere v úvahu i šum pozadí, se kterým je při počítačové simulaci potřeba počítat a v modelu ho vhodně nastavit.

Optimální hodnoty: Subjektivní rozsah *STI* je uveden v následující tabulce.

Subjektivní hodnocení		Hodnota STI
Špatný	E	0,00 - 0,30
Slabý	D	0,30 - 0,45
Dostatečný	C	0,45 - 0,60
Dobrý	B	0,60 - 0,75
Výborný	A	0,75 - 1,00

Obr. 29 – Tabulka optimálních hodnot parametru STI (přeloženo z [21])

Pro podporu doznívání zvuku v sálu z hlediska jeho hloubky a výšky slouží následující 2 parametry: 4a) Basový poměr „*BR*“ [-] /Bass Ratio/

4b) Vysokofrekvenční poměr „*HFR*“ [-] /High Frequency Ratio/

4a) Basový poměr „*BR*“ /Bass Ratio/

Je míra podpory hlubokých tónů doznívání sálu. Určí se podle následující rovnice z poměru dob dozvuku v příslušných oktávových pásmech:

$$BR = \frac{T_{125}+T_{250}}{T_{500}+T_{1000}} \text{ [-]} \tag{28}$$

kde: např. T_{125} … doba dozvuku v oktávovém pásmu 125 Hz

Optimální hodnoty: Je doporučeno, aby hodnoty *BR* byly blízké 1, ale zároveň aby nikdy pod tuto hodnotu neklesly.

4b) Vysokofrekvenční poměr „HFR“ /High Frequency Ratio/

HFR je obdobou parametru *BR* pro tóny ve vyšších frekvencích. Určí se podle následující rovnice:

$$HFR = \frac{T_{500}+T_{1000}}{T_{2000}+T_{4000}} \text{ [-]} \tag{29}$$

Optimální hodnoty: Jsou obdobné jako u parametru *BR*, tedy je doporučeno, aby hodnoty *HFR* byly blízké 1, ale zároveň aby nikdy pod tuto hodnotu neklesly.

4.6.2 Postup návrhu úprav

Výchozím stavem, na který se navrhovaly akustické úpravy, je model z Odeonu (konkrétně obsazený stav). Zhodnocení stavu před úpravou je uvedeno v *kapitolách 4.4.3* a *4.4.4*.

Jednotlivé navrhované úpravy se řídí dle norem [1] a [2].

Postupně byly uplatňovány obecné poznatky z navrhování prostorové akustiky, které byly postupně vloženy do počítačové simulace. V jednotlivých krocích byly sledovány dílčí parametry: primárně to byla doba dozvuku *T*, následně také další parametry podle *kapitoly 4.6.1*.

Podle výstupů jednotlivých úprav bylo rozhodnuto o vlivu na celkový výsledek a tím také celkové zlepšení akustických vlastností v prostoru.

V následující podkapitole budou postupně pospány jednotlivé úpravy s vlivem na daný prostor.

4.6.2.1 Popis jednotlivých úprav

Ačkoliv na modelu bylo odzkoušeno vícero jednotlivých úprav, v rámci této práce jsou představeny ty, které byly uplatněny do finálního návrhu. Celkem se jedná o 6 úprav, které jsou zobrazeny na *Obr. 30* a *Obr. 31*.

Pozn. Jednotlivé úpravy jsou stručně popsány v Příloha 7. V rámci popisu každé úpravy jsou zobrazeny:

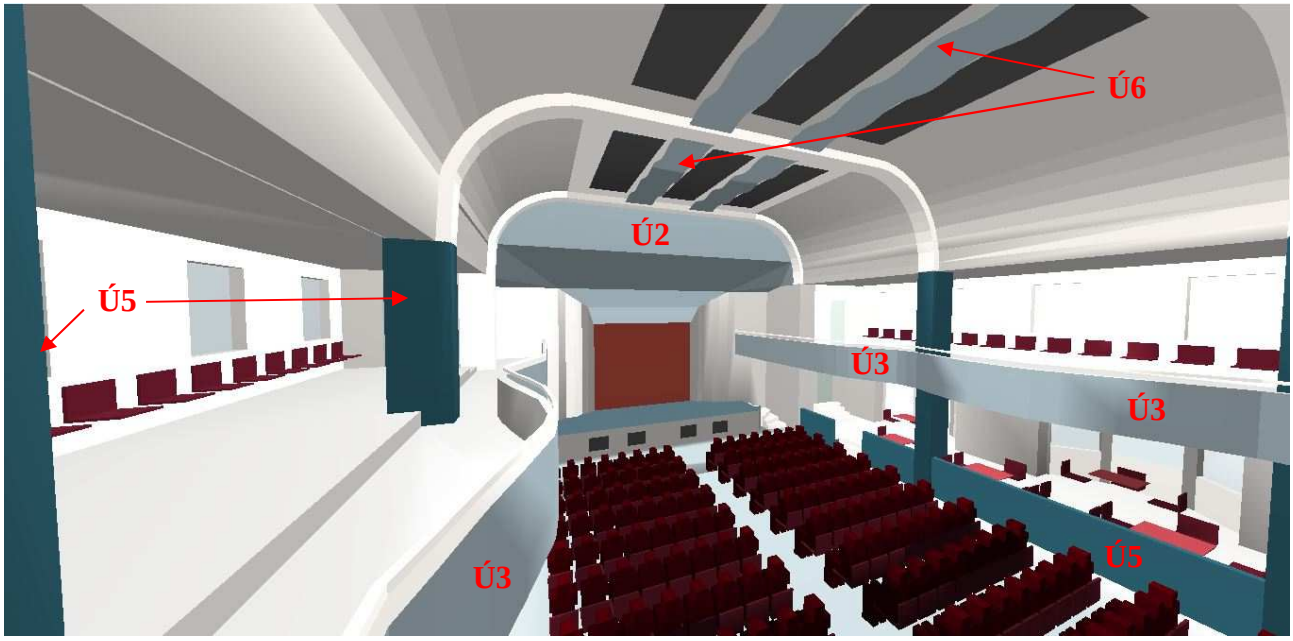
- *Situace v modelu*
- *Použitý materiál*
- *Průběh činitele zvukové pohltivosti α použitého materiálu*

Vliv vždy jedné konkrétní úpravy na jednotlivé parametry v porovnání s původním stavem je uveden v následující *kapitole 4.6.2.2*. (*ukázka pro kombinaci Z1/M1 a Z2/M6*)

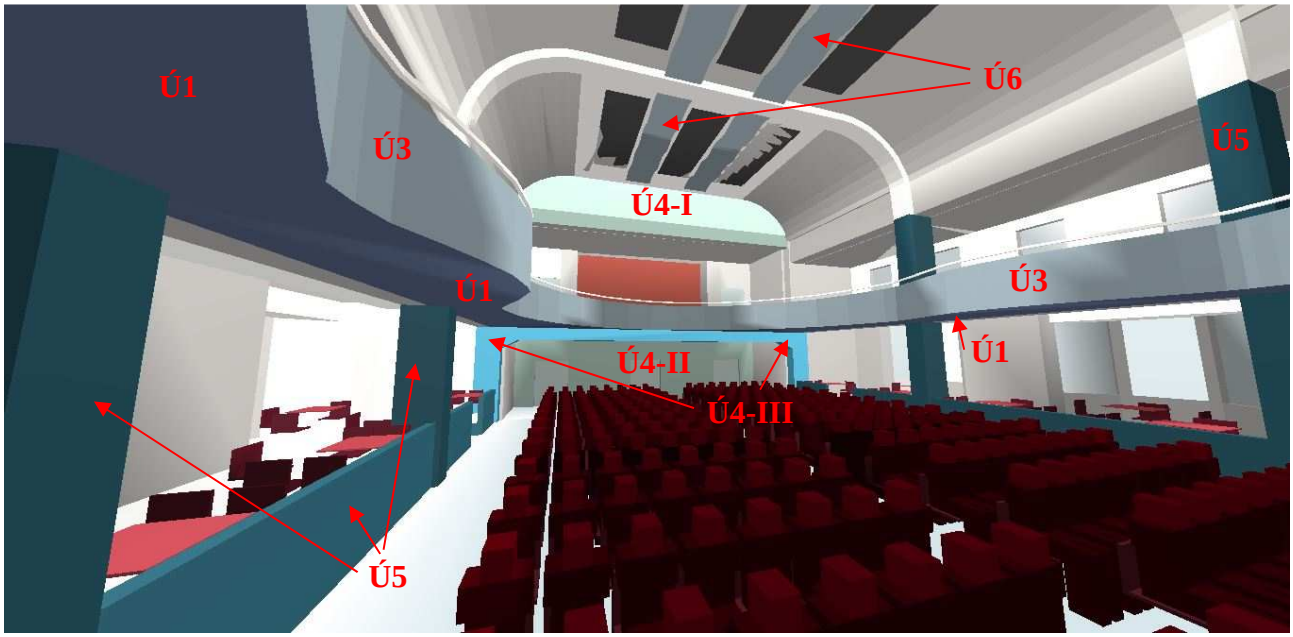
Celkový vliv všech úprav je zobrazen v *kapitole 4.6.3*.

Jak již bylo uvedeno v *kapitole 4.3.2*, tak hlavním problémem je doba dozvuku *T* především na nízkých a středních kmitočtech. Dalším problémem je špatná kvalita zvuku v zadních oblastech sálu (slyšitelnost, jas zvuku).

Vybrané úpravy jsou navrhovány jak z funkčního hlediska, tak i z hlediska architektonického. Je snahou příliš neměnit současný architektonický stav. V případě návrhu nových konstrukcí je snahou dosáhnout jednotného celkového dojmu.



Obr. 30 – Odeon – hromadné zobrazení úprav_pohled1



Obr. 31 – Odeon – hromadné zobrazení úprav_pohled2

Pozn. k Obr. 30 a Obr. 31:

(Úi…označení úpravy – podrobnější popis viz Příloha 7 – zde uveden „pracovní název úpravy“)

Ú1 – „Obložení spodního povrchu balkónu pohltivým materiálem“

Ú2 – „Změna tvaru a obložení povrchu nad pódiem odrazivým materiálem“

Ú3 – „Obložení čelního povrchu balkónu odrazivým materiálem“

Ú4 – „Obložení vybraných povrchů zadní stěny pohltivým materiálem“

Ú5 – „Obložení sloupů a dělící stěny pohltivým materiálem“

Ú6 – „Zavěšení stropní vlnité konstrukce z odrazivého materiálu“

4.6.2.2 Vyhodnocení jednotlivých úprav

V této kapitole dojde k vyhodnocení vybraných úprav jednotlivě vzhledem k dopadu na jednotlivé parametry. Vyhodnocení celkového dopadu všech navrhovaných úprav na vybraný prostor je uveden v *kapitole 4.6.3.*

Vyhodnocení proběhne u všech použitých úprav na vybraných bodech měření. *(U každé úpravy vždy kombinace Z1/M1 a Z2/M6.)* Zobrazeno bude formou grafů, jednotlivě vždy každý parametr a k němu vliv jednotlivých úprav.

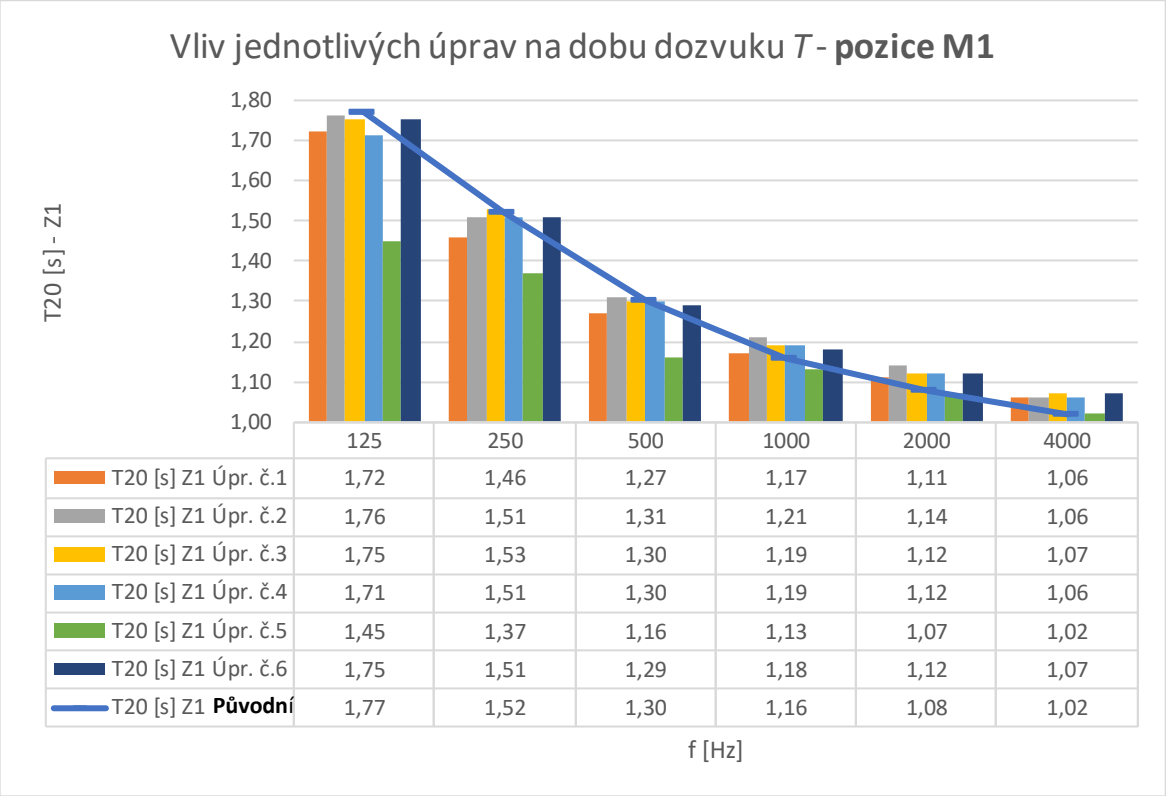
Pozn. Hromadná tabulka s výslednými hodnotami všech kombinací je v Příloha 5.

Seznam zobrazených hodnocení:

1) Vliv jednotlivých úprav na dobu dozvuku *T*	a) pozice M1 *(Graf 7)*
	b) pozice M6 *(Graf 8)*
2) Vliv jednotlivých úprav na zřetelnost D_{50}	a) pozice M1 *(Graf 9)*
	b) pozice M6 *(Graf 10)*
3) Vliv jednotlivých úprav na míru zřetelnosti C_{50}	a) pozice M1 *(Graf 11)*
	b) pozice M6 *(Graf 12)*
4) Vliv jednotlivých úprav na míru jasnosti C_{80}	a) pozice M1 *(Graf 13)*
	b) pozice M6 *(Graf 14)*
5) Vliv jednotlivých úprav na parametr *STI*	*(Graf 15)*
6) Vliv jednotlivých úprav na parametr *BR*	*(Graf 16)*
7) Vliv jednotlivých úprav na parametr *HFR*	*(Graf 17)*

Pozn. Vyhodnocení dílčích vlivů (zobrazených v následujících grafech) je možné podle doporučených hodnot uvedených v kapitole 4.6.1.

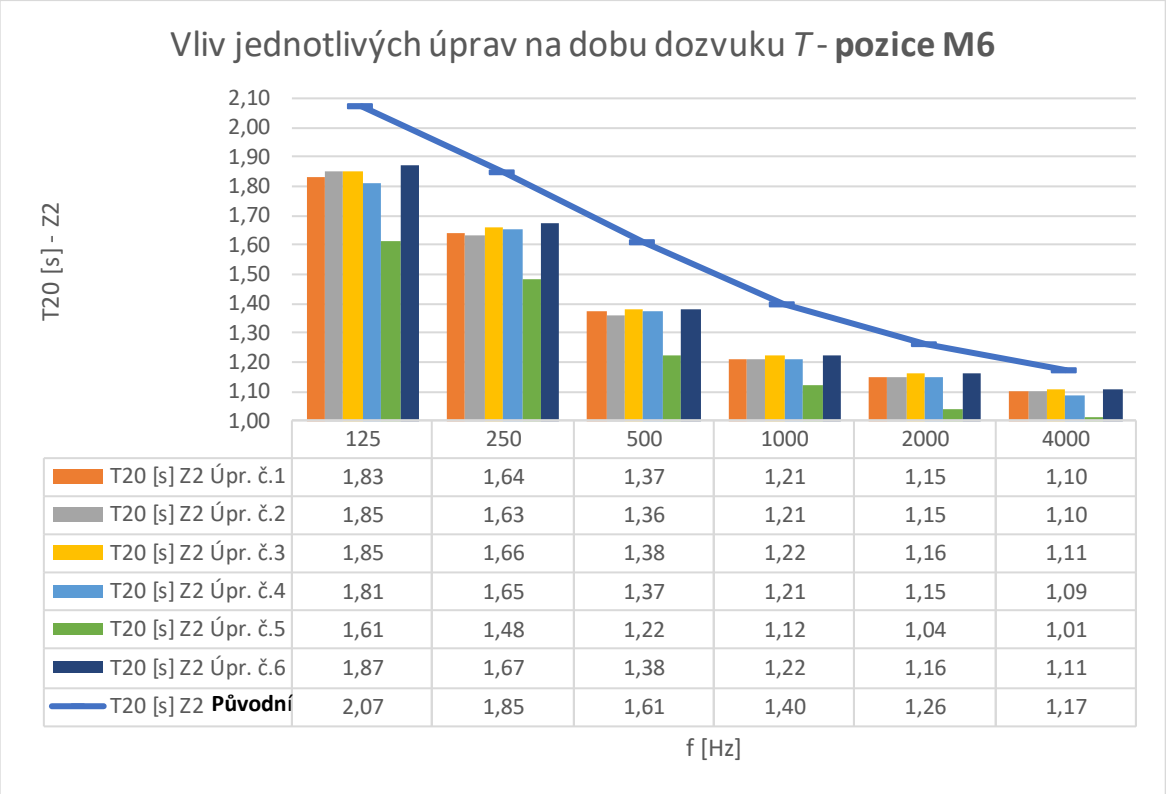
1a) Vliv jednotlivých úprav na dobu dozvuku *T* – pozice M1



	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s] Z1 Úpr. č.1	1,72	1,46	1,27	1,17	1,11	1,06
T20 [s] Z1 Úpr. č.2	1,76	1,51	1,31	1,21	1,14	1,06
T20 [s] Z1 Úpr. č.3	1,75	1,53	1,30	1,19	1,12	1,07
T20 [s] Z1 Úpr. č.4	1,71	1,51	1,30	1,19	1,12	1,06
T20 [s] Z1 Úpr. č.5	1,45	1,37	1,16	1,13	1,07	1,02
T20 [s] Z1 Úpr. č.6	1,75	1,51	1,29	1,18	1,12	1,07
T20 [s] Z1 **Původní**	1,77	1,52	1,30	1,16	1,08	1,02

Graf 7 – Vliv jednotlivých úprav na dobu dozvuku *T* – pozice M1

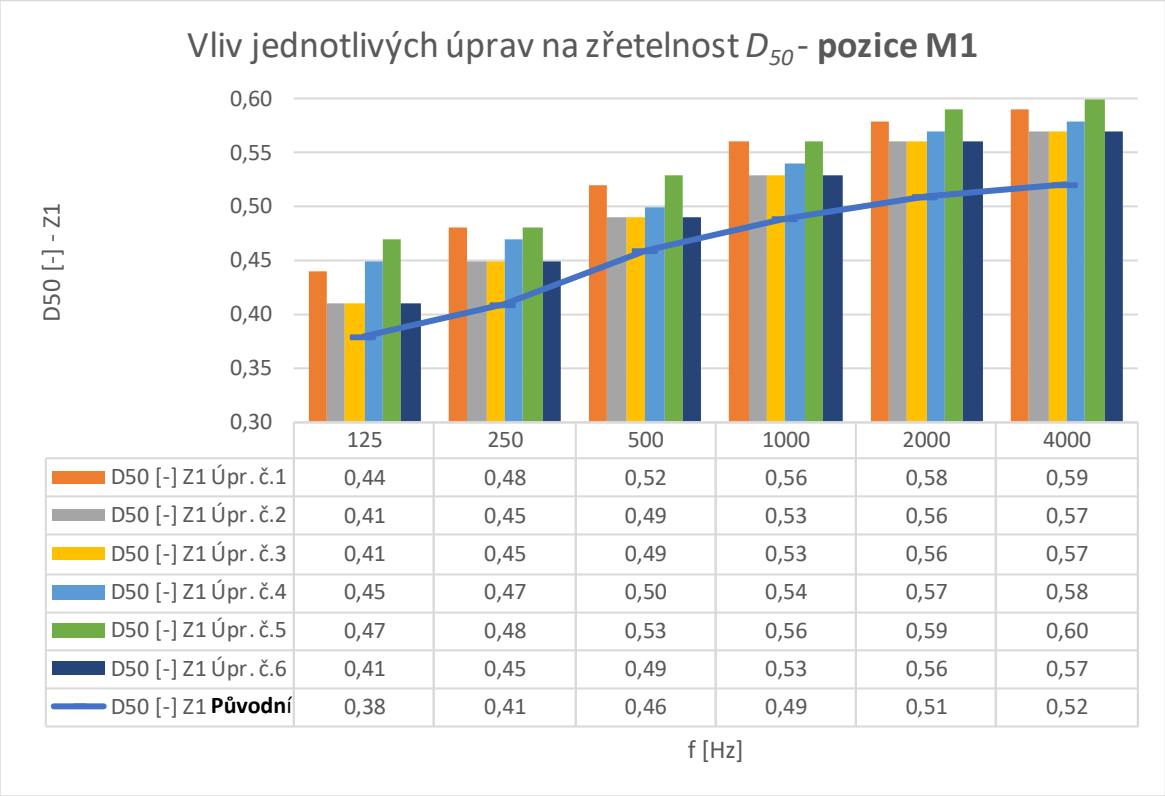
1b) Vliv jednotlivých úprav na dobu dozvuku *T* – pozice M6



	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s] Z2 Úpr. č.1	1,83	1,64	1,37	1,21	1,15	1,10
T20 [s] Z2 Úpr. č.2	1,85	1,63	1,36	1,21	1,15	1,10
T20 [s] Z2 Úpr. č.3	1,85	1,66	1,38	1,22	1,16	1,11
T20 [s] Z2 Úpr. č.4	1,81	1,65	1,37	1,21	1,15	1,09
T20 [s] Z2 Úpr. č.5	1,61	1,48	1,22	1,12	1,04	1,01
T20 [s] Z2 Úpr. č.6	1,87	1,67	1,38	1,22	1,16	1,11
T20 [s] Z2 **Původní**	2,07	1,85	1,61	1,40	1,26	1,17

Graf 8 – Vliv jednotlivých úprav na dobu dozvuku *T* – pozice M6

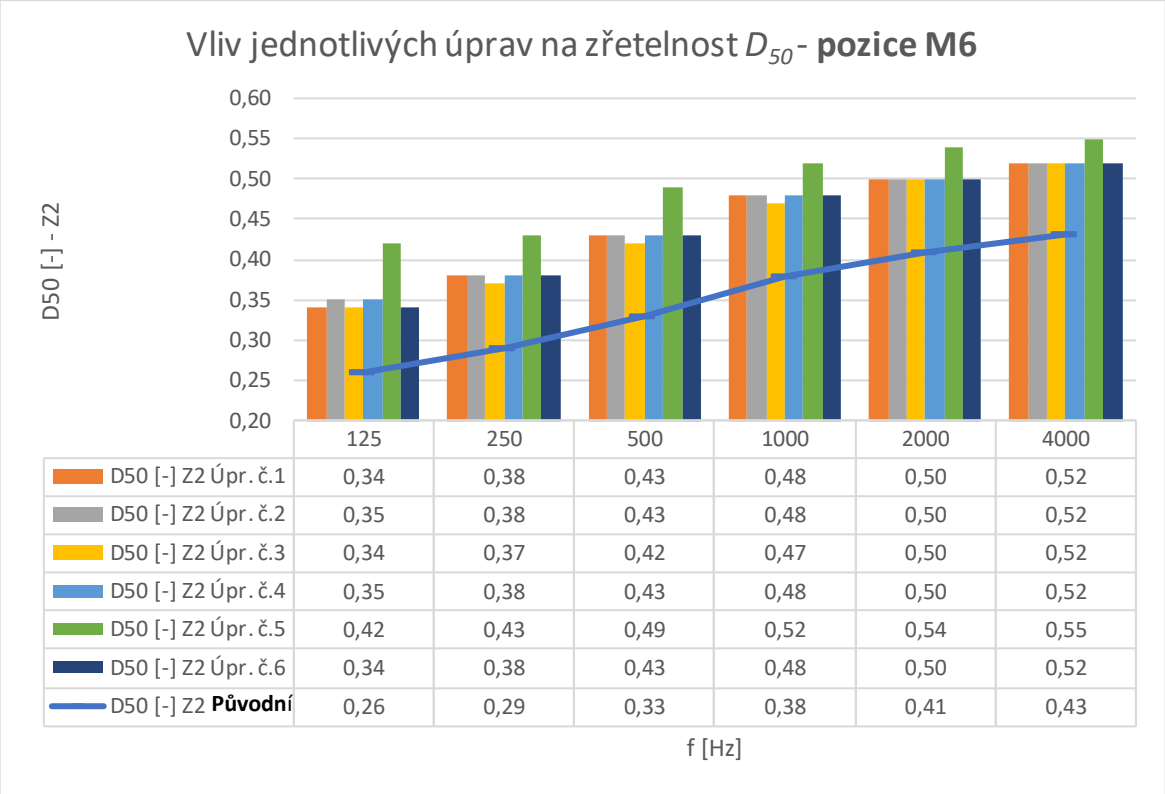
2a) Vliv jednotlivých úprav na zřetelnost D_{50} – pozice M1



	125	250	500	1000	2000	4000
D50 [-] Z1 Úpr. č.1	0,44	0,48	0,52	0,56	0,58	0,59
D50 [-] Z1 Úpr. č.2	0,41	0,45	0,49	0,53	0,56	0,57
D50 [-] Z1 Úpr. č.3	0,41	0,45	0,49	0,53	0,56	0,57
D50 [-] Z1 Úpr. č.4	0,45	0,47	0,50	0,54	0,57	0,58
D50 [-] Z1 Úpr. č.5	0,47	0,48	0,53	0,56	0,59	0,60
D50 [-] Z1 Úpr. č.6	0,41	0,45	0,49	0,53	0,56	0,57
D50 [-] Z1 **Původní**	0,38	0,41	0,46	0,49	0,51	0,52

Graf 9 – Vliv jednotlivých úprav na zřetelnost D_{50} – pozice M1

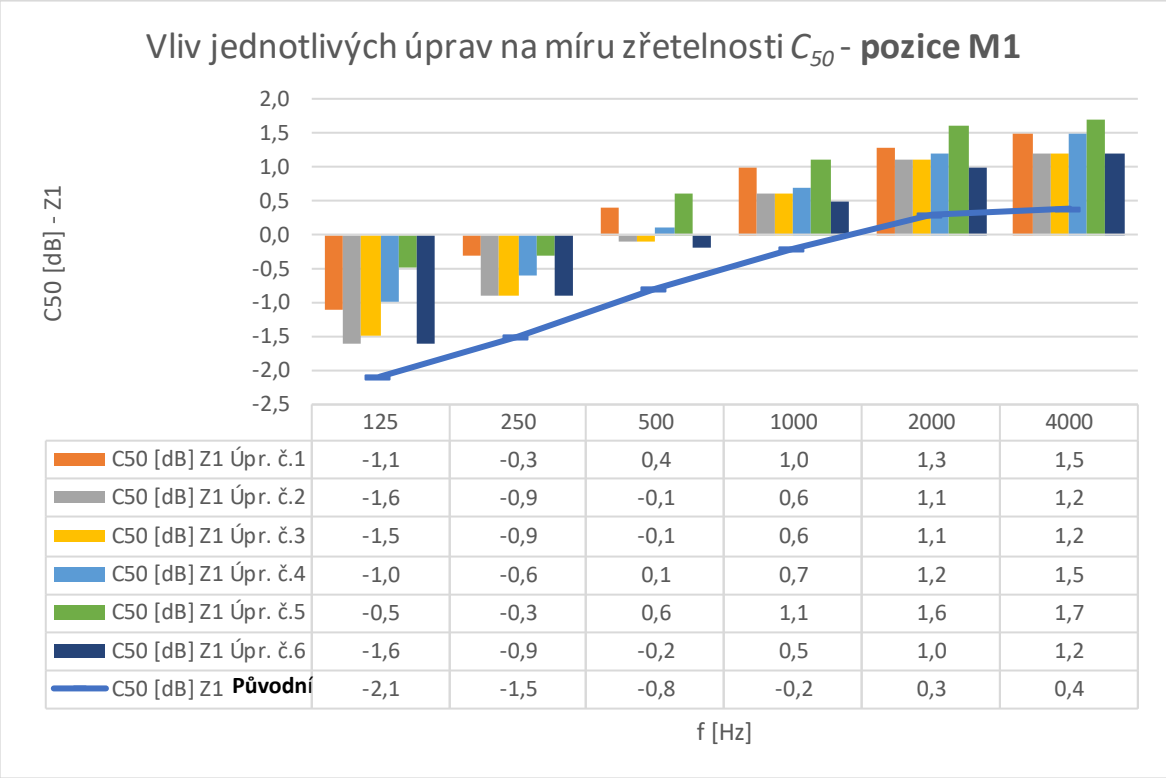
2b) Vliv jednotlivých úprav na zřetelnost D_{50} – pozice M6



	125	250	500	1000	2000	4000
D50 [-] Z2 Úpr. č.1	0,34	0,38	0,43	0,48	0,50	0,52
D50 [-] Z2 Úpr. č.2	0,35	0,38	0,43	0,48	0,50	0,52
D50 [-] Z2 Úpr. č.3	0,34	0,37	0,42	0,47	0,50	0,52
D50 [-] Z2 Úpr. č.4	0,35	0,38	0,43	0,48	0,50	0,52
D50 [-] Z2 Úpr. č.5	0,42	0,43	0,49	0,52	0,54	0,55
D50 [-] Z2 Úpr. č.6	0,34	0,38	0,43	0,48	0,50	0,52
D50 [-] Z2 **Původní**	0,26	0,29	0,33	0,38	0,41	0,43

Graf 10 – Vliv jednotlivých úprav na zřetelnost D_{50} – pozice M6

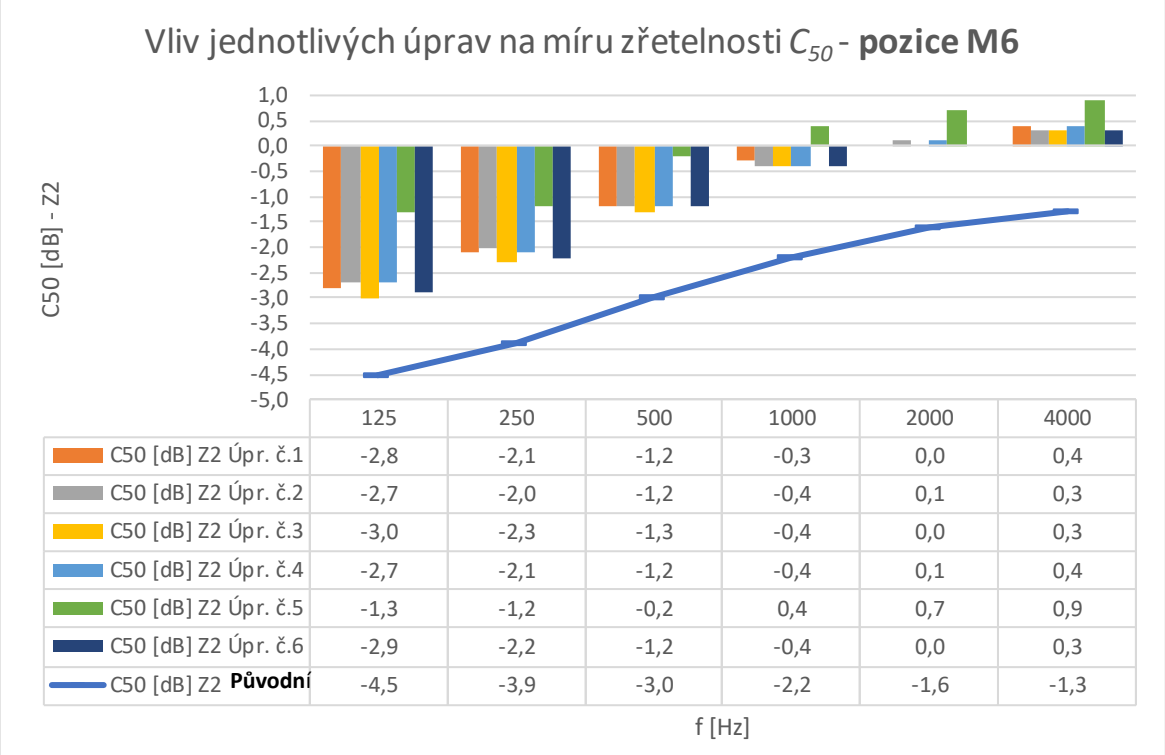
3a) Vliv jednotlivých úprav na míru zřetelnosti C_{50} – pozice M1



	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB] Z1 Úpr. č.1	-1,1	-0,3	0,4	1,0	1,3	1,5
C50 [dB] Z1 Úpr. č.2	-1,6	-0,9	-0,1	0,6	1,1	1,2
C50 [dB] Z1 Úpr. č.3	-1,5	-0,9	-0,1	0,6	1,1	1,2
C50 [dB] Z1 Úpr. č.4	-1,0	-0,6	0,1	0,7	1,2	1,5
C50 [dB] Z1 Úpr. č.5	-0,5	-0,3	0,6	1,1	1,6	1,7
C50 [dB] Z1 Úpr. č.6	-1,6	-0,9	-0,2	0,5	1,0	1,2
C50 [dB] Z1 **Původní**	-2,1	-1,5	-0,8	-0,2	0,3	0,4

Graf 11 – Vliv jednotlivých úprav na míru zřetelnosti C_{50} – pozice M1

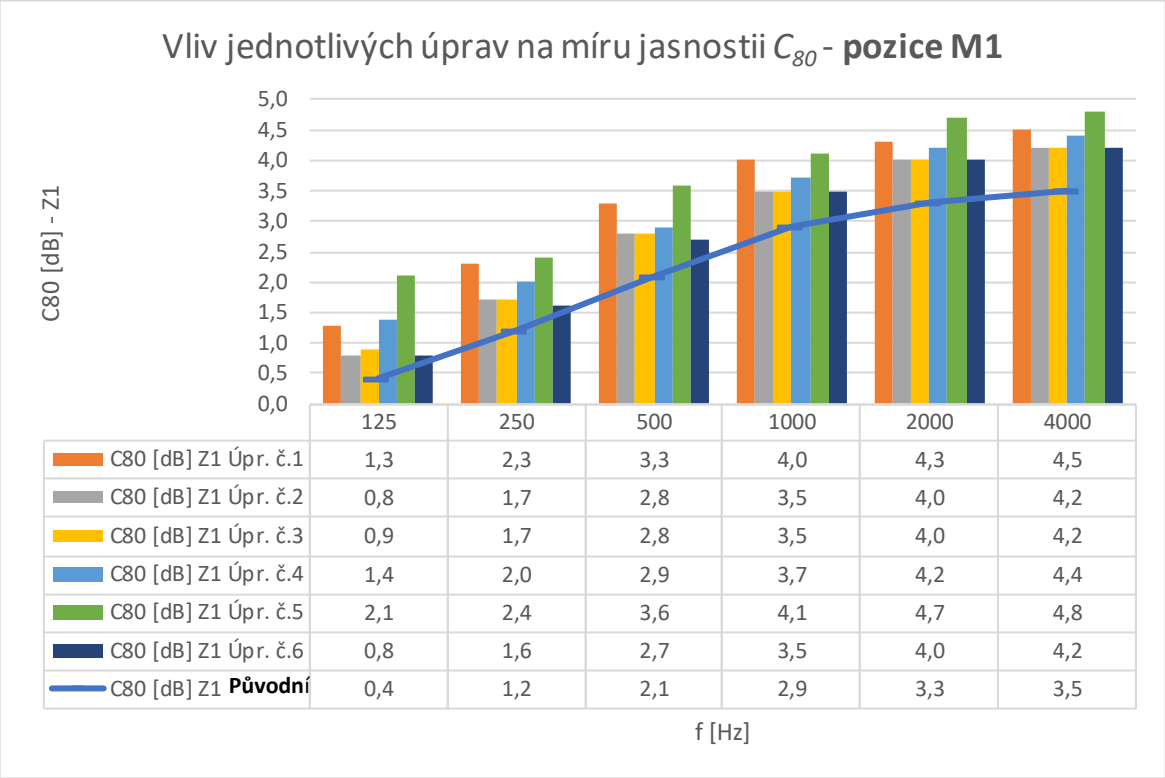
3b) Vliv jednotlivých úprav na míru zřetelnosti C_{50} – pozice M6



	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB] Z2 Úpr. č.1	-2,8	-2,1	-1,2	-0,3	0,0	0,4
C50 [dB] Z2 Úpr. č.2	-2,7	-2,0	-1,2	-0,4	0,1	0,3
C50 [dB] Z2 Úpr. č.3	-3,0	-2,3	-1,3	-0,4	0,0	0,3
C50 [dB] Z2 Úpr. č.4	-2,7	-2,1	-1,2	-0,4	0,1	0,4
C50 [dB] Z2 Úpr. č.5	-1,3	-1,2	-0,2	0,4	0,7	0,9
C50 [dB] Z2 Úpr. č.6	-2,9	-2,2	-1,2	-0,4	0,0	0,3
C50 [dB] Z2 **Původní**	-4,5	-3,9	-3,0	-2,2	-1,6	-1,3

Graf 12 – Vliv jednotlivých úprav na míru zřetelnosti C_{50} – pozice M6

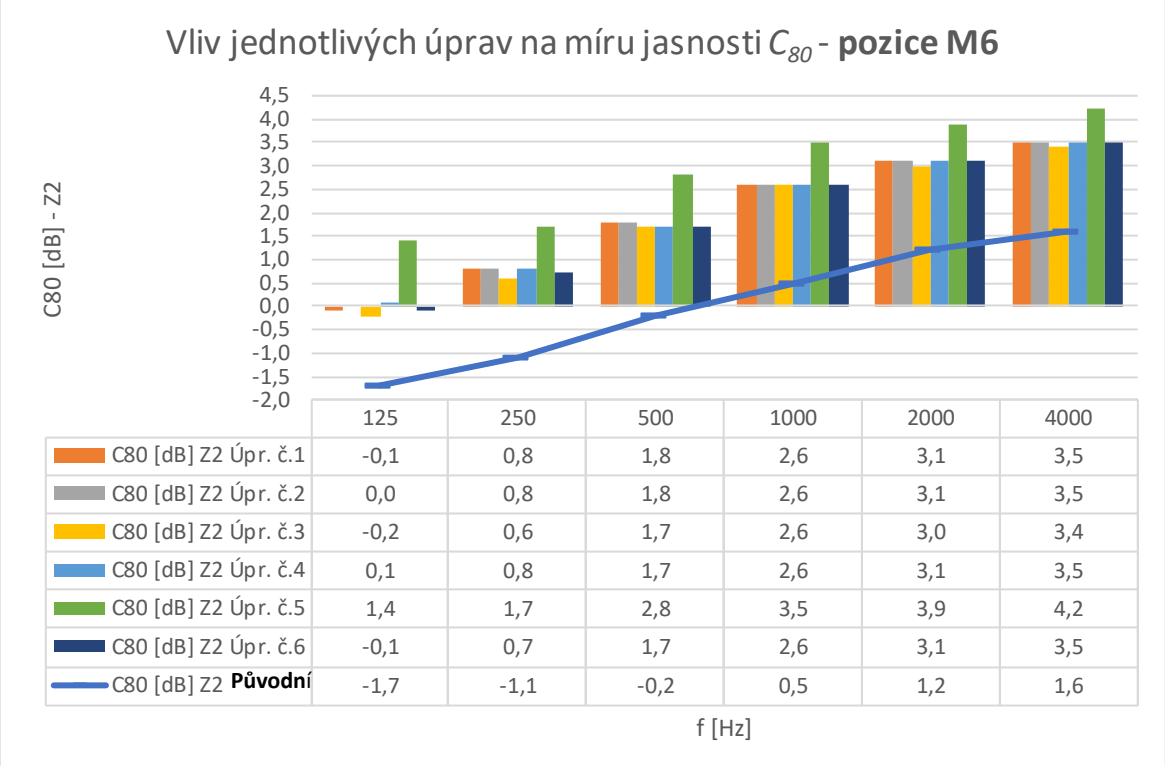
4a) Vliv jednotlivých úprav na míru jasnosti C_{80} – pozice M1



	125	250	500	1000	2000	4000
C80 [dB] Z1 Úpr. č.1	1,3	2,3	3,3	4,0	4,3	4,5
C80 [dB] Z1 Úpr. č.2	0,8	1,7	2,8	3,5	4,0	4,2
C80 [dB] Z1 Úpr. č.3	0,9	1,7	2,8	3,5	4,0	4,2
C80 [dB] Z1 Úpr. č.4	1,4	2,0	2,9	3,7	4,2	4,4
C80 [dB] Z1 Úpr. č.5	2,1	2,4	3,6	4,1	4,7	4,8
C80 [dB] Z1 Úpr. č.6	0,8	1,6	2,7	3,5	4,0	4,2
C80 [dB] Z1 **Původní**	0,4	1,2	2,1	2,9	3,3	3,5

Graf 13 – Vliv jednotlivých úprav na míru jasnosti C_{80} – pozice M1

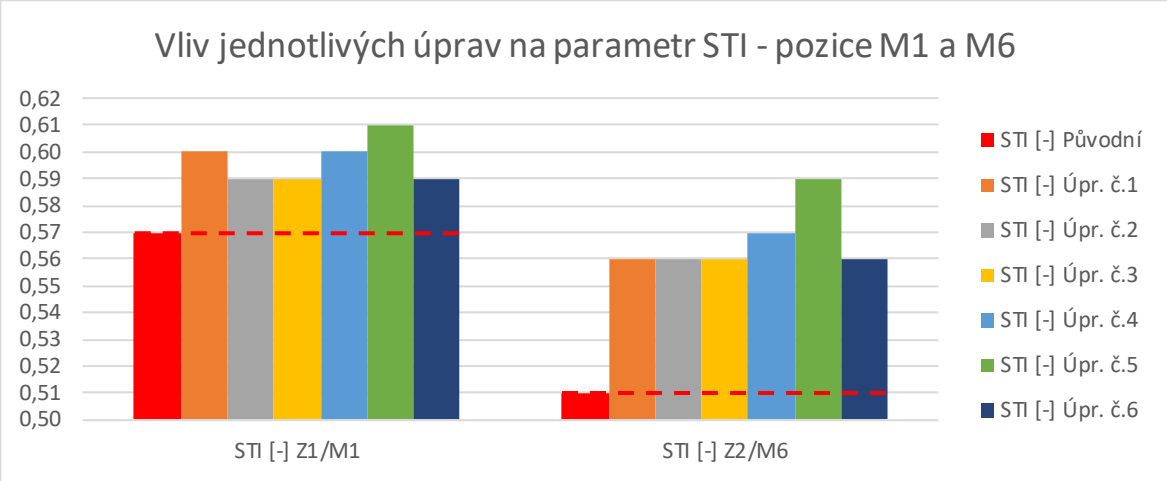
4b) Vliv jednotlivých úprav na míru jasnosti C_{80} – pozice M6



	125	250	500	1000	2000	4000
C80 [dB] Z2 Úpr. č.1	-0,1	0,8	1,8	2,6	3,1	3,5
C80 [dB] Z2 Úpr. č.2	0,0	0,8	1,8	2,6	3,1	3,5
C80 [dB] Z2 Úpr. č.3	-0,2	0,6	1,7	2,6	3,0	3,4
C80 [dB] Z2 Úpr. č.4	0,1	0,8	1,7	2,6	3,1	3,5
C80 [dB] Z2 Úpr. č.5	1,4	1,7	2,8	3,5	3,9	4,2
C80 [dB] Z2 Úpr. č.6	-0,1	0,7	1,7	2,6	3,1	3,5
C80 [dB] Z2 **Původní**	-1,7	-1,1	-0,2	0,5	1,2	1,6

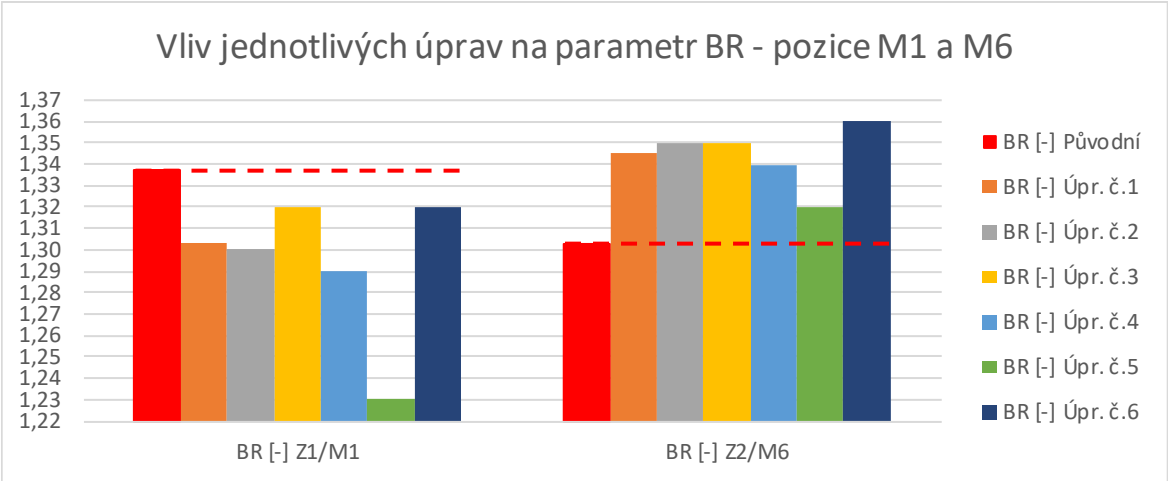
Graf 14 – Vliv jednotlivých úprav na míru jasnosti C_{80} – pozice M6

5) Vliv jednotlivých úprav na parametr *STI*



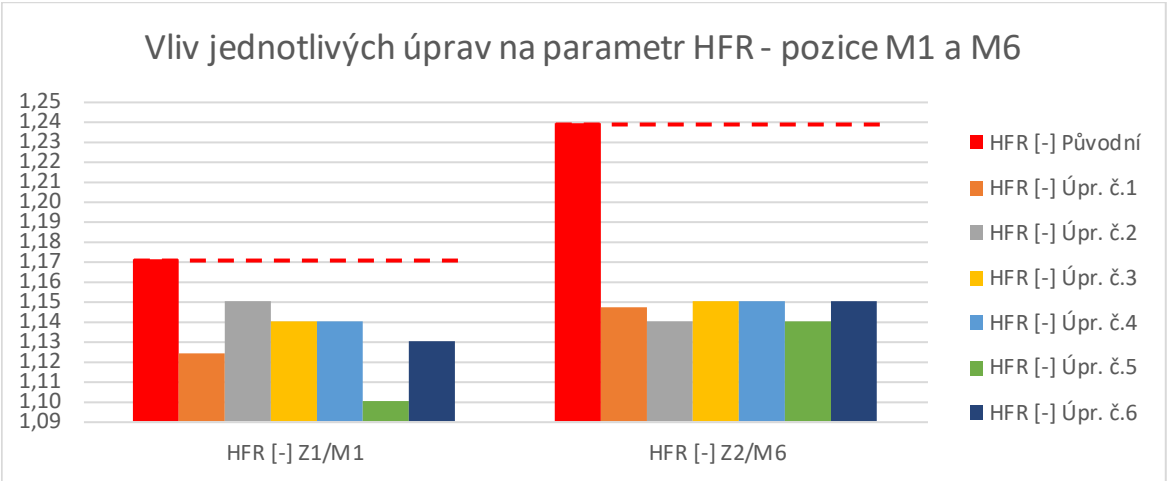
Graf 15 – Vliv jednotlivých úprav na parametr STI

6) Vliv jednotlivých úprav na parametr *BR*



Graf 16 – Vliv jednotlivých úprav na parametr BR

7) Vliv jednotlivých úprav na parametr *HFR*



Graf 17 – Vliv jednotlivých úprav na parametr HFR

4.6.3 Vyhodnocení celkového návrhu akustických úprav

V této kapitole dojde k vyhodnocení celkového vlivu veškerých navržených úprav v daném prostoru multifunkčního sálu. *(Původní stav vs. stav po úpravě)*

Seznam zobrazených hodnocení:

1) Vyhodnocení celkové doby dozvuku *T*.

Pozn. K hodnocení je využito průměrných hodnot dle Tab. 23.

2) Vyhodnocení ostatních sledovaných parametrů D_{50}, C_{50}, C_{80}, *STI, BR, HFR*

a) D_{50}, C_{50}, C_{80} *dojde k hodnocení pouze u vybraných pozic – kombinace Z1/M1 a Z2/M6,*

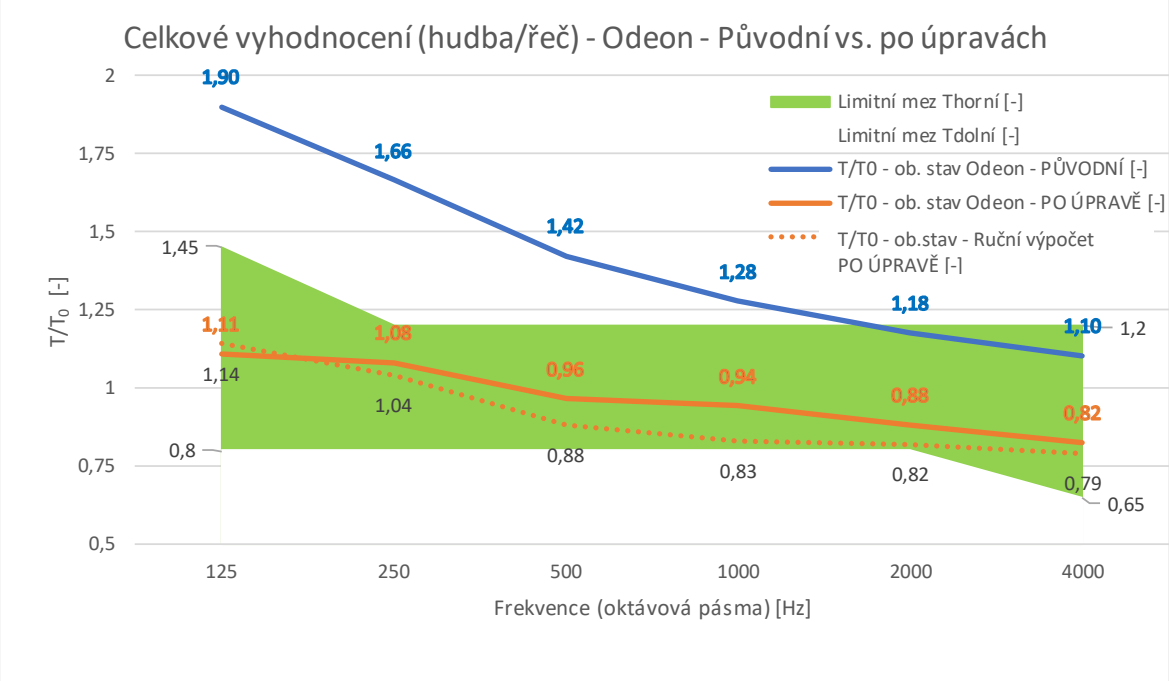
b) STI, BR, HFR dojde k hodnocení všech kombinací zdroj/mikrofon

Pozn. Veškeré hodnoty sloužící k vyhodnocení jsou přiloženy v Příloha 5.

1) Vyhodnocení celkové doby dozvuku *T*

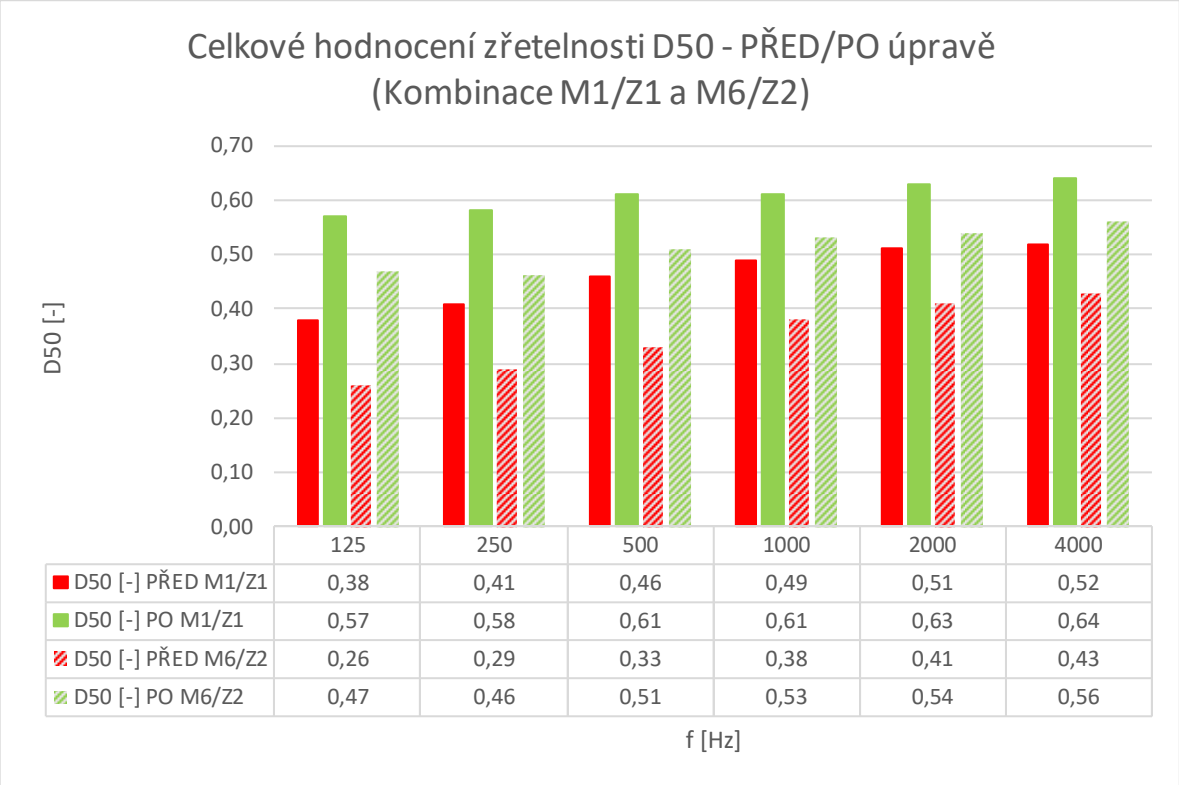
Posouzení (HUDBA-ŘEČ)		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
T_0	[s]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
T/T_0 - ob. stav Odeon - PŮVODNÍ	[-]	1,90	1,66	1,42	1,28	1,18	1,10
T/T_0 - ob. stav Odeon - PO ÚPRAVĚ	[-]	1,11	1,08	0,96	0,94	0,88	0,82
T/T_0 - ob. stav R.V. - PO ÚPRAVĚ	[-]	1,14	1,04	0,88	0,83	0,82	0,79
Limitní mez $T_{horní}$	[-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez $T_{dolní}$	[-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65

Tab. 14 - Vyhodnocení doby dozvuku – ODEON – Původní stav vs. Po úpravách



Graf 18 – Celkové vyhodnocení (hudba/řeč) Odeon – Původní vs. Po úpravách

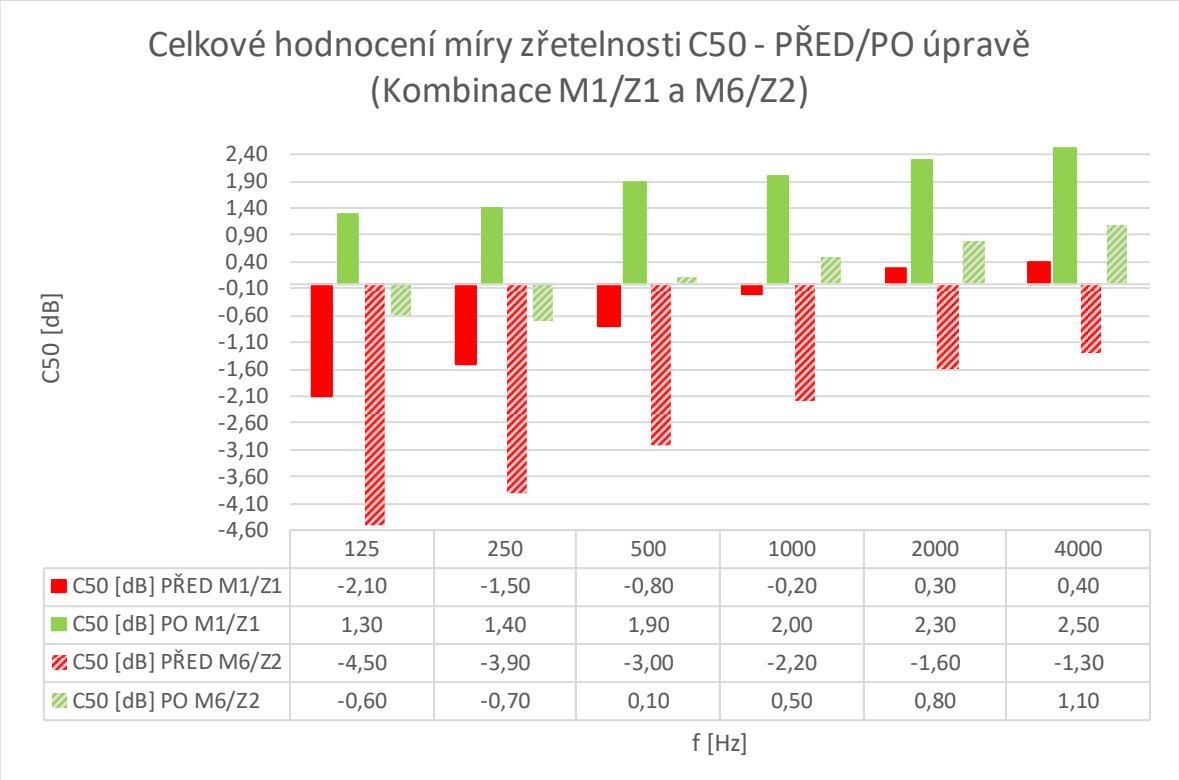
2a1) Vyhodnocení zřetelnosti D_{50}



	125	250	500	1000	2000	4000
D50 [-] PŘED M1/Z1	0,38	0,41	0,46	0,49	0,51	0,52
D50 [-] PO M1/Z1	0,57	0,58	0,61	0,61	0,63	0,64
D50 [-] PŘED M6/Z2	0,26	0,29	0,33	0,38	0,41	0,43
D50 [-] PO M6/Z2	0,47	0,46	0,51	0,53	0,54	0,56

Graf 19 - Celkové hodnocení zřetelnosti D_{50}

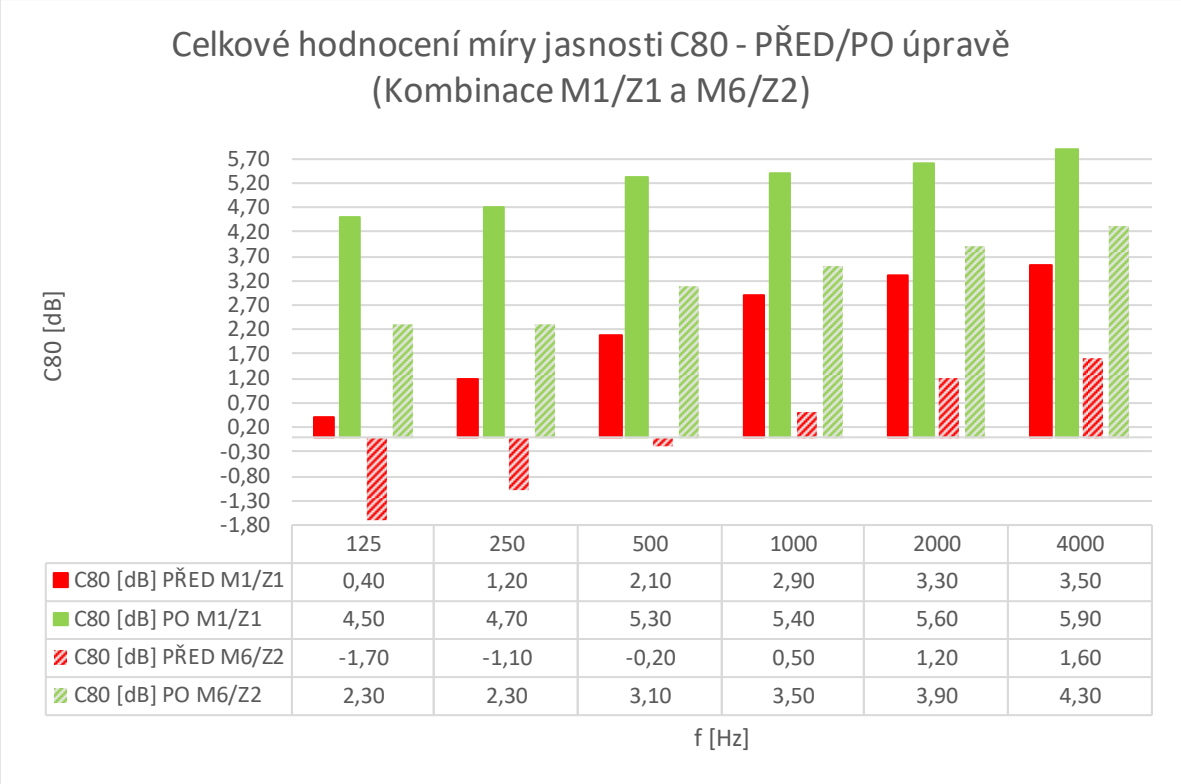
2a2) Vyhodnocení míry zřetelnosti C_{50}



	125	250	500	1000	2000	4000
C50 [dB] PŘED M1/Z1	-2,10	-1,50	-0,80	-0,20	0,30	0,40
C50 [dB] PO M1/Z1	1,30	1,40	1,90	2,00	2,30	2,50
C50 [dB] PŘED M6/Z2	-4,50	-3,90	-3,00	-2,20	-1,60	-1,30
C50 [dB] PO M6/Z2	-0,60	-0,70	0,10	0,50	0,80	1,10

Graf 20 – Celkové hodnocení míry zřetelnosti C_{50}

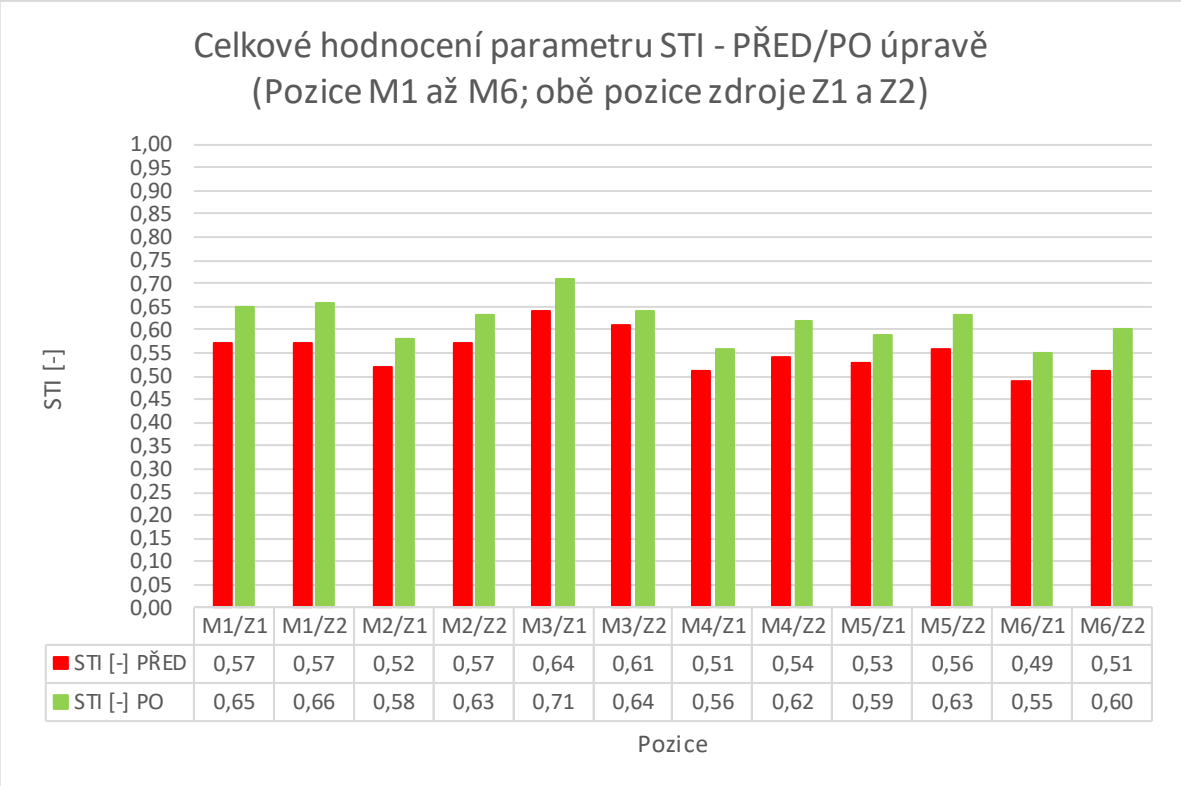
2a3) Vyhodnocení míry jasnosti C_{80}



	125	250	500	1000	2000	4000
C80 [dB] PŘED M1/Z1	0,40	1,20	2,10	2,90	3,30	3,50
C80 [dB] PO M1/Z1	4,50	4,70	5,30	5,40	5,60	5,90
C80 [dB] PŘED M6/Z2	-1,70	-1,10	-0,20	0,50	1,20	1,60
C80 [dB] PO M6/Z2	2,30	2,30	3,10	3,50	3,90	4,30

Graf 21 – Celkové hodnocení míry jasnosti C_{80}

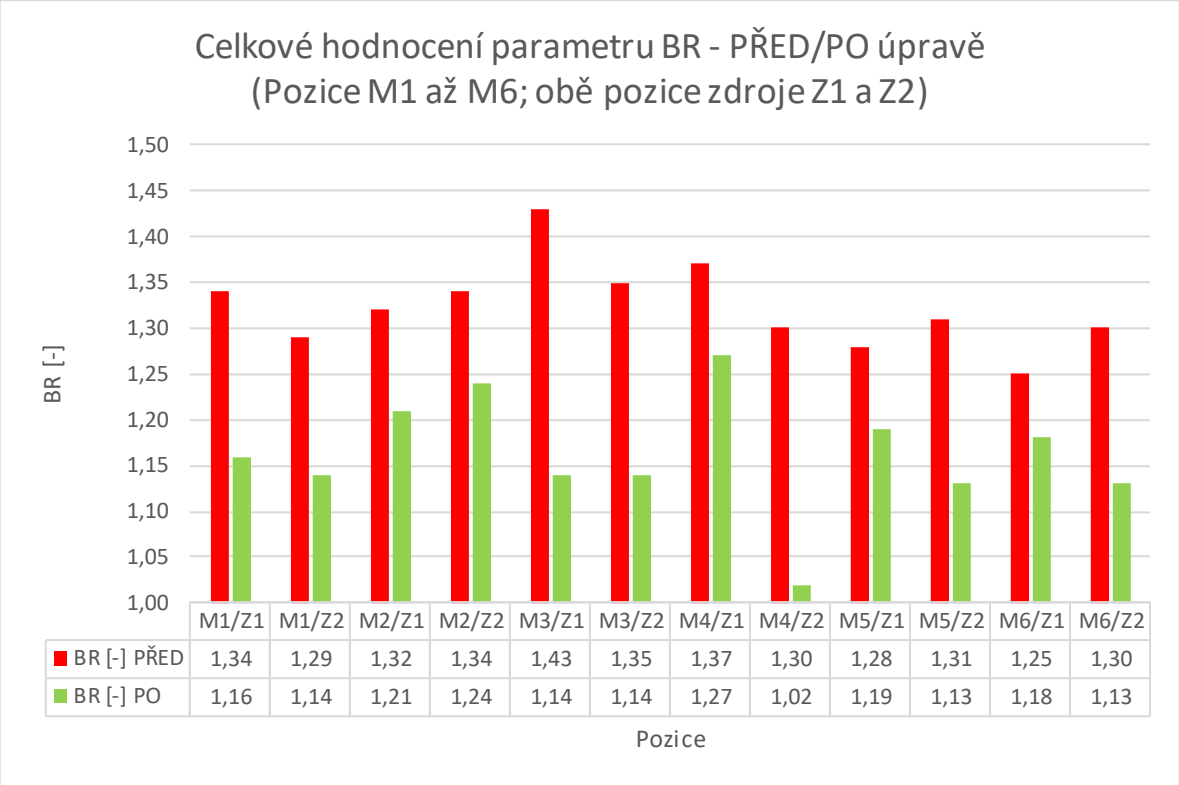
2b1) Vyhodnocení parametru *STI*



	M1/Z1	M1/Z2	M2/Z1	M2/Z2	M3/Z1	M3/Z2	M4/Z1	M4/Z2	M5/Z1	M5/Z2	M6/Z1	M6/Z2
STI [-] PŘED	0,57	0,57	0,52	0,57	0,64	0,61	0,51	0,54	0,53	0,56	0,49	0,51
STI [-] PO	0,65	0,66	0,58	0,63	0,71	0,64	0,56	0,62	0,59	0,63	0,55	0,60

Graf 22 – Celkové hodnocení parametru *STI*

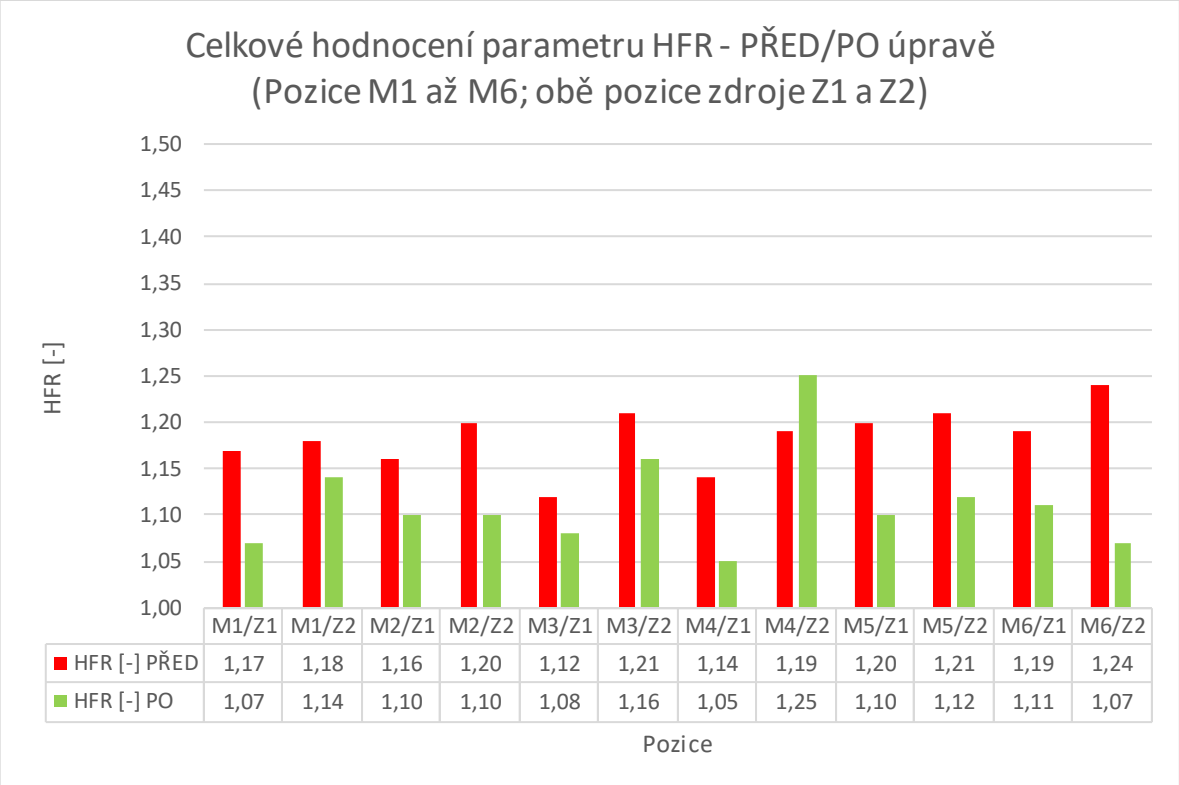
3b$_2$) Vyhodnocení parametru *BR*



	M1/Z1	M1/Z2	M2/Z1	M2/Z2	M3/Z1	M3/Z2	M4/Z1	M4/Z2	M5/Z1	M5/Z2	M6/Z1	M6/Z2
BR [-] PŘED	1,34	1,29	1,32	1,34	1,43	1,35	1,37	1,30	1,28	1,31	1,25	1,30
BR [-] PO	1,16	1,14	1,21	1,24	1,14	1,14	1,27	1,02	1,19	1,13	1,18	1,13

Graf 23 – Celkové hodnocení parametru *BR*

3b$_3$) Vyhodnocení parametru *HFR*



	M1/Z1	M1/Z2	M2/Z1	M2/Z2	M3/Z1	M3/Z2	M4/Z1	M4/Z2	M5/Z1	M5/Z2	M6/Z1	M6/Z2
HFR [-] PŘED	1,17	1,18	1,16	1,20	1,12	1,21	1,14	1,19	1,20	1,21	1,19	1,24
HFR [-] PO	1,07	1,14	1,10	1,10	1,08	1,16	1,05	1,25	1,10	1,12	1,11	1,07

Graf 24 – Celkové hodnocení parametru *HFR*

4.6.4 Akustické úpravy – závěr

Z jednotlivých výše uvedených vyhodnocení je patrné, že po všech navržených úpravách vykazuje daný prostor celkové zlepšení akustického chování.

Na základě vyhodnocení hlavního sledovaného parametru doby dozvuku *T* je možné prohlásit, že daný prostor splňuje po úpravách požadavky příslušné normy. Povedlo se tak vyřešit problém, že prostor v určitém rozsahu frekvencí nesplňoval normou doporučený rozsah, a to především na nižších a středních kmitočtech.

Z ostatních vyhodnocení týkajících se dalších sledovaných parametrů (D_{50}, C_{50}, C_{80}, *STI*, *BR*, *HFR*) je patrné zlepšení, u některých skokové, u dalších alespoň částečné. Všechny tyto parametry jsou důležité pro určitý subjektivní atribut kvality poslechu zvuku v uzavřeném prostoru.

V současné době v prostorové akustice bohužel neexistuje klasifikace akustického chování na základě celkového jednočíselného zhodnocení, proto je vhodné usilovat o dosažení optimálních hodnot *(uvedených v kapitole 4.6.1)* u všech objektivních veličin jednotlivě.

Pozn. Z tohoto důvodu nelze napsat jasné zhodnocení těchto parametrů, jako ukázku lze alespoň uvést několik příkladů vyplývajících z dříve uvedených grafů:

1) *Zlepšení parametru STI (index přenosu mluveného projevu) téměř na všech posuzovaných pozicích z hodnocení „dostatečný“ na „dobrý“*
2) *Zlepšení míry zřetelnosti C_{50} (kritérium srozumitelnosti pro mluvené slovo) a to ve smyslu skokového zvýšení hodnot, které znamenají lepší srozumitelnost řeči.*
3) *Zlepšení parametrů BR a HFR (podpora doznívání sálu hlubokých tónů a tónů ve vyšších frekvencích) a to ve smyslu přiblížení hodnotě 1, která zaručuje lepší podporu doznívání sálu.*

Jednotlivé optimální hodnoty pro parametry jsou uvedeny v kapitole 4.6.1 a pomocí nich a vyhodnocení zobrazených v jednotlivých grafech je možné si jednotlivé parametry zhodnotit.

Závěr

Cílem této diplomové práce byla prostorová akustika multifunkčních sálů. Úkolem bylo představit čtenáři teoretický základ k této problematice a následně ho interpretovat na konkrétním příkladu reálného objektu. V případě této práce se jednalo o úpravy vybraného multifunkčního sálu vedoucí ke zlepšení akustického chování prostoru.

V teoretické části práce jsou shrnuty teoretické základy akustiky z obecného hlediska, na které plynule navazuje část zaměřena detailněji na akustiku prostorovou. Důvod, proč práce obsahuje základní teoretické poznatky byl především takový, aby se nezaujatý čtenář lépe orientoval v řešené problematice a potřebné informace byly poskytnuty uceleně v rámci práce. V této části byly také shrnuty základní pravidla a doporučení při navrhování obdobných prostorů z pohledu prostorové akustiky, případně při navrhování takových úprav u rekonstrukcí, které mají za cíl zlepšení akustických vlastností. Za tímto účelem se v práci objevuje základní rozdělení prvků a materiálů, které se k tomuto účelu nejčastěji používají, jsou popsány jejich vlastnosti a popsán základní princip, na kterém fungují.

V další části práce již bylo seznámení s konkrétním prostorem, na kterém byly teoretické znalosti interpretovány. V úvodu je vybraný multifunkční sál popsán a zhodnocen jeho stávající akustický stav. Popisuji zde také, jak se podobné prostory podrobují akustickému měření, které je ve své podstatě pevným základem k návrhu opatření vedoucích ke zlepšení akustických vlastností. U vybraného sálu takové akustické měření prostoru bylo provedeno a po jeho následném vyhodnocení bylo zjištěno nesplnění základního doporučení na dobu dozvuku. To vedlo k vytvoření modelu sálu v počítačovém softwaru. Takový model je ideální k simulování akustického chování, a to zejména proto, že se víceméně ihned získají hodnoty parametrů popisující akustické vlastnosti. Konkrétně i v této práci byla tvorba a práce s modelem představena a následně pomocí něj hodnoceny vlivy jednotlivých navrhovaných úprav. Ovšem práce s modelem má i svá úskalí, které se v této práci také projevily. U rekonstruovaných objektů je totiž poměrně těžké určit použité materiály (a jejich vlastnosti), a tím pádem také model správně nastavit. Proto je také doporučováno provést měření, podle kterého se dá model vhodně optimalizovat a přiblížit co nejvíce k realitě. Ve chvíli, kdy model prošel optimalizací, mohlo dojít na simulování jednotlivých navrhovaných úprav a vyhodnocení vlivu na jednotlivé parametry. Samotné úpravy byly navrženy tak, aby co nejméně narušily stávající architektonické zpracování prostoru. Po vyhodnocení jednotlivých vlivů úprav na zlepšení

vlastností prostorů mohly být vybrány a zapracovány ty, které jednotlivě, popř. v kombinaci s jinou úpravou měly pozitivní vliv na zlepšení. Tímto se práce blížila k závěru, v posledním kroku již byly vybrané úpravy vloženy opět do vytvořeného modelu, v tomto případě všechny pohromadě, a byla provedena poslední simulace. Na jejím základě bylo provedeno vyhodnocení všech parametrů. Ovšem v současné době v prostorové akustice bohužel neexistuje klasifikace akustického chování na základě jednočíselného zhodnocení, proto se doporučuje usilovat o dosažení optimálních hodnot u většiny objektivních veličin. Co se týká hodnocení doby dozvuku, tam je norma konkrétnější a udává optimální dobu dozvuku včetně možného rozsahu podle daného způsobu využití prostoru. U vybraného sálu bylo navrženými úpravami docíleno normou doporučené hodnoty doby dozvuku.

Použitá literatura

Technické normy

[1] ČSN 73 0525: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. ÚNMZ Praha, 02/1998, 20s.

[2] ČSN 73 0527: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely, prostory ve školách, prostory pro veřejné účely.* ÚNMZ Praha, 03/2005, 16s.

[3] ČSN EN ISO 3382-1: *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči.* ÚNMZ Praha, 12/2009, 27s.

[4] ČSN EN ISO 3382-2: *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech.* ÚNMZ Praha, 02/2009, (20+2)s. Zohledněna změna Z1 z r. 09/2009

[5] ČSN EN ISO 11654: *Akustika – Absorbéry zvuku používané v budovách - Hodnocení zvukové pohltivosti.* ÚNMZ Praha, 12/1998, 16 s.

[6] ČSN EN 12354-6: *Stavební akustika - Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků - Část 6: Zvuková pohltivost v uzavřených prostorech.* ÚNMZ Praha, 06/2004, 24 s.

[7] ČSN EN 60268-16 ED.2: *Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči.* ÚNMZ Praha, 04/2012, 88 s.

Legislativní dokumenty

[8] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.: *O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací,* Sbírka zákonů č. 272/2011, 08/2011. ISSN 1211-1244. Zohledněna změna 217/2016 Sb.

Tištěná monografická publikace

[9] BOŠOVÁ, Daniela; PROKOPOVÁ, L.: *Stavební fyzika I – Osvětlení, oslunění, akustika budov*. 1.vydání. Praha: ČVUT, 2017. 182 s. ISBN 978-80-01-06130-5.

[10] KAŇKA, Jan; NOVÁČEK, J.: *Stavební fyzika 3 – Akustika pozemních staveb.* 1. vydání. Praha: ČVUT, 2015. 130 s. ISBN 978-80-01-05674-5.

[11] LONG, Marshall: *Architectural Acoustics.* 2.vydání. San Diego, US: Elsevier Science Publishing Co Inc, 2014. 984 s. ISBN 13: 978-0-12-455551-8

[12] KAŇKA, Jan: *Akustika stavebních objektů.* 1. vydání. Brno: ERA Group spol. s r.o., 2009. 156 s. ISBN 978-80-7366-140-3

[13] KAŇKA, Jan: *Stavební fyzika 1 – Akustika budov.* 1. vydání. Praha: ČVUT, 2007. 120 s. ISBN 978-80-01-03664-8

[14] VAVERKA, Jiří; KOZEL, V.; LADYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J.: *Stavební fyzika 1 – Urbanistická, stavební a prostorová akustika.* 1. vydání. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6

[15] KUTTRUFF, Heinrich: *Room acoustics.* 5. vydání. London: CRC Press, 2014. 392 s. ISBN 9781482266450

[16] KOLMER, Felix; KYNCL, J.: *Prostorová akustika.* 1. vydání. Praha: SNTL-ALFA, 1980. 244 s. ISBN

[17] KRŇÁK, Milan: *Akustické obklady.* 1. vydání. Praha: Výzkumný ústav zvukové, obrazové a reprodukční techniky, 1971. 254 s. ISBN

[18] HRÁDEK, Tomáš; TUČEK J.: *Katalog akustických prvků.* 1. vydání. Praha: Nakladatelství Akademie múzických umění v Praze, 2011. 152 s. ISBN 978-80-7331-316-6

Elektronická monografie

[19] SCHIMMEL, Jiří; https://slideslive.com/ [online] 2015 [cit. 2017-11-14]. *Přednáška: Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření.* <https://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni>

[20] DOMKÁŘ, Vít; http://k129.cz/ [online] 2015 [cit. 2017-12-28]. *Přednáška: Vybrané kapitoly pro architekty a designéry.* < http://k129.cz/wp-content/uploads/2016/09/5.AKUSTIKA.pdf>

[21] http://www.odeon.dk/ [online]. 2017 [cit. 2017-11-13]. *ODEON User´s Manual.* Dostupné z WWW:< http://odeon.dk/download/Version14/ODEON_Manual.pdf>

[22] http://stavba.tzb-info.cz / [online]. 2017 [cit. 2017-11-13]. *Obrázek:* Slyšitelný rozsah kmitočtů a intenzit mechanického kmitání. Dostupné z WWW:< http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/214-fyziologicke-vymezeni-zvuku>

[23] http://stavba.tzb-info.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-11-14]. *Obrázek:* Šíření zvuku – volné zvukové pole. Dostupné z WWW:< http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/222-sireni-zvuku-ve-volnem-prostoru-volne-zvukove-pole>

[24] http://stavba.tzb-info.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-11-14]. *Obrázek:* Distribuce akustického výkonu; Pole přímých a odražených vln . Dostupné z WWW:< http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/227-sireni-zvuku-v-uzavrenem-prostoru-difuzni-zvukove-pole>

[25] http://www.prirodnistavba.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-11-29]. *Tabulka:* Třídy zvukové pohltivosti. Dostupné z WWW:< http://www.prirodnistavba.cz/popup/zvukova-pohltivost-59e.html>

[26] http://www.paroc.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-11-29]. *Obrázek:* Třídy zvukové pohltivosti. Dostupné z WWW:< http://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/klasifikace-zvuku>

[27] http://stavba.tzb-info.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-12-01]. *Obrázek:* Schéma konstrukce kmitající membrány. Dostupné z WWW:< http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/230-kmitajici-membrany-a-desky>

[28] http://stavba.tzb-info.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-12-01]. *Obrázek:* Kmitání vzduchového sloupce u dutinových rezonátorů. Dostupné z WWW:< http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/231-dutinove-rezonatory>

[29] https://www.zvukova-izolace.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-12-03]. *Obrázek:* Závěsné, zvuk pohlcující materiály. Dostupné z WWW:< https://www.zvukova-izolace.cz/uprava-akustiky/>

[30] http://www.greif.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-12-04]. *Základy akustiky - příručka*. Dostupné z WWW:< http://www.greif.cz/download/its075-zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf>

[31] http://www.kzdomovina.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-12-05]. *Informace o kulturním zařízení Domovina*. Dostupné z WWW:< http://www.kzdomovina.cz/kzdomovina.html>

[32] http://stavba.tzb-info.cz/ [online]. 2017 [cit. 2017-12-21]. *Tabulka: Ukázka vybraných hodnot činitele pohltivosti zvuku α.* Dostupné z WWW:< http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/228-konstrukce-na-pohlcovani-zvuku>

[33] https://www.gyptone.com [online]. 2017 [cit. 2017-12-27]. *Obrázek: Použitý materiál k úpravě č.1.* Dostupné z WWW:< https://www.gyptone.com/products/gyptone-big-quattro-47/>

[34] http://www.akustickematerialy.cz [online]. 2017 [cit. 2017-12-28]. *Obrázek: Použitý materiál k úpravě č.5.* Dostupné z WWW:< http://www.akustickematerialy.cz/kategorie-produktu/desky_a_obklady/avs_desky/>

Seznamy

Seznam použitých symbolů

A	Celková zvuková pohltivost	[m^2]
A_i	Zvuková pohltivost konstrukce	[m^2]
c	Rychlost šíření zvuku v plynech	[$m.s^{-1}$]
C_{50}	„Clarity 50“ – Míra zřetelnosti	[dB]
C_{80}	„Clarity 80“ – Míra jasnosti	[dB]
d	Tloušťka vzduchového polštáře	[m]
D_{50}	„Definition 50“ - Zřetelnost	[dB]
$\frac{dE}{dt}$	Člen vyjadřující změnu celkové akustické energie v čase	[W]
f_{min}	Hraniční kmitočet difúzního pole	[Hz]
f_r	Rezonanční kmitočet	[Hz]
$f_{x,y,z}$	Hraniční kmitočty	[Hz]
h	Tloušťka zvuk pohlcujícího materiálu	[m]
h´	Výška výpočetního vzduchového válce	[m]
I	Akustická intenzita	[$W.m^{-2}$]
$l_{x,y,z}$	Rozměry stěn pravoúhlého šestistěnu	[m]
L	Hladina akustického tlaku	[dB]
L_w	Hladina akustického výkonu	[dB]
m	Činitel útlumu vzduchu	[m^{-1}]
m´	Plošná hmotnost membrány	[$kg.m^{-2}$]
M_i	Jednotlivé pozice mikrofonu při měření	[-]
$n_{x,y,z}$	Celá čísla od 0 do ∞	[-]
P	Akustický výkon	[W]
P_a	Akustický výkon pohlcovaný ohraničujícími konstrukcemi	[W]
P_e	Akustický výkon vyzařovaný zdrojem	[W]
P_l	Ztrátová (přeměněná) část zvuku o akustickém výkonu	[W]
P_r	Odražená část zvuku o akustickém výkonu	[W]
P_t	Část zvuku o akustickém výkonu, která projde konstrukcí	[W]
P_0	Dopadající část zvuku o akustickém výkonu	[W]
P_{ref}	Akustický výkon – referenční hodnota	[W]

r	Vzdálenost od bodového zdroje	[m]
r_k	Dozvuková vzdálenost	[m]
S	Plocha otvoru dutinového rezonátoru	[m^2]
S_i	Dopadová plocha konstrukce	[m^2]
t_1	Čas zapnutí zdroje	[s]
t_2	Čas vypnutí zdroje	[s]
t_e	Teplota vzduchu	[°C]
T	Standardní doba dozvuku	[s]
T_E	Doba dozuku podle Eyringa	[s]
T_M	Doba dozvuku podle Millingtona	[s]
$T_{opt.}$	Optimální doba dozvuku	[s]
T_S	Doba dozvuku podle Sabina	[s]
V	Objem výpočetního vzduch. válce dutinového rezonátoru	[m^3]
Q	Činitel směrovosti	[-]
Z_i	Jednotlivé pozice zdroje při měření	[-]
2Δh	Korekce výšky výpočetního vzduchového válce	[m]

Řecké symboly

α	Činitel zvukové pohltivosti	[-]
α_m	Střední činitel zvukové pohltivosti	[-]
α_w	Vážený činitel zvukové pohltivosti	[-]
η	Ztrátový činitel	[-]
λ	Vlnová délka	[m]
ρ	Činitel odrazu	[-]
τ	Činitel prostupu (průzvučnosti)	[-]

Seznam zkratek

STI … /Speech Transmission Index/ - Index přenosu mluveného projevu

BR … /Bass Ratio/ - Basový poměr

HFR … /High Frequency Ration/ - Vysokofrekvenční poměr

Seznam obrázků

Obr. 1 – Slyšitelný rozsah kmitočtů a intenzit mechanického kmitání [22] ..... - 11 -
Obr. 2 – Činitel směrovosti [10] ..... - 12 -
Obr. 3 – Šíření zvuku – volné zvukové pole [23] ..... - 12 -
Obr. 4 – Distribuce akustického výkonu při dopadu na překážku [24] ..... - 13 -
Obr. 5 – Řez místností se zdrojem zvuku ve středu prostoru [24] ..... - 14 -
Obr. 6 – Dovolený rozdíl drah mezi přímým a odraženým zvukem [10] ..... - 17 -
Obr. 7 – Průběh hladiny akustického tlaku [10] ..... - 19 -
Obr. 8 – Optimální doba dozvuku v závislosti na objemu a)[11];b)[2] ..... - 23 -
Obr. 9 – Třídy zvukové pohltivosti dle normy [5];[26] ..... - 26 -
Obr. 10 – Průběh činitele pohltivosti α v závislosti na tloušťce materiálu h [14] ..... - 27 -
Obr. 11 – Ideální umístění obkladu z porézního materiálu [10] ..... - 28 -
Obr. 12 – Schéma konstrukce kmitající membrány [27] ..... - 28 -
Obr. 13 – Vliv porézního pohlcovače v konstrukci s kmitající membránou [27] ..... - 29 -
Obr. 14 – Kmitánaí vzduchového sloupce u dutinových rezonátorů [28] ..... - 30 -
Obr. 15 – Difuzory – varianty struktur rozptylující zvuk [14] ..... - 30 -
Obr. 16 – Vybraný multifunkční sál – pohled do vnitrobloku [foto autora] ..... - 31 -
Obr. 17 – Vybraný multifunkční sál – pohled z horní galerie [31] ..... - 32 -
Obr. 18 – Vybraný multifunkční sál – pohled z podia [foto autora z měření] ..... - 32 -
Obr. 19 - Zvukový analyzátor Norsonic Nor140 [foto autora z měření] ..... - 33 -
Obr. 20 – Foto z měření I [J. Nováček] ..... - 34 -
Obr. 21 – Foto z měření II [J. Nováček] ..... - 35 -
Obr. 22 – Půdorysné schéma sálu 1.NP – rozmístění zdroj-mikrofon [upraveno z [31]]- 35 -
Obr. 23 – Půdorysné schéma sálu 2.NP – rozmístění zdroj-mikrofon [upraveno z [31]]- 35 -
Obr. 24 – Ukázka z tvorby modelu v programu SketchUp ..... - 40 -
Obr. 25 – Ukázka z tvorby modelu v programu Odeon ..... - 41 -
Obr. 26 – Jednotlivá nastavení zdroj (Z) - mikrofon (M)_ukázka z programu ..... - 41 -
Obr. 27 – Přiřazení materiálu z knihovny – ukázka z programu ..... - 42 -
Obr. 28 – Přiřazení modelových kombinací – ukázka z programu ..... - 43 -
Obr. 29 – Tabulka optimálních hodnot parametru STI (přeloženo z [21]) ..... - 49 -

Obr. 30 – Odeon – hromadné zobrazení úprav_pohled1 ..... - 52 -
Obr. 31 – Odeon – hromadné zobrazení úprav_pohled2 ..... - 52 -
Obr. 32 – Test těsnosti modelu při šíření zvuku ..... - 87 -
Obr. 33 - Jednotlivé polohy zdroje (Z) a mikrofonu (M) – zobrazení 3D ..... - 87 -
Obr. 34 – Ukázka výstupu z funkce Quick Estimate ..... - 89 -
Obr. 35 – Ukázka výstupů z funkce Global Estimate ..... - 89 -
Obr. 36 – Nastavení prostoru-Room setup ..... - 90 -
Obr. 37 – Úprava č.1 – SketchUp, Odeon, použitý materiál [33] ..... - 103 -
Obr. 38 – Úprava č.2 – SketchUp (před/po), Odeon (detail) , použitý materiál [20] - 104 -
Obr. 39 – Úprava č.3 – SketchUp, Odeon, použitý materiál [20] ..... - 105 -
Obr. 40 - Úprava č.4 – SketchUp , Odeon, použitý materiál [18] ..... - 106 -
Obr. 41 - Úprava č.5 – SketchUp , Odeon, použitý materiál [34] ..... - 108 -
Obr. 42 - Úprava č.6 – SketchUp , Odeon, detail vlny, použitý materiál [20] ..... - 109 -

Seznam tabulek

Tab. 1 – Činitel útlumu zvuku *m* [1] ..... - 22 -
Tab. 2 – Meze přípustného rozmezí poměru dob dozvuku T/T_{opt} prostorů daného určení [2] ... - 23 -
Tab. 3 – Minimální počty míst a měření [4] ..... - 25 -
Tab. 4 – Třídy zvukové pohltivosti [25] ..... - 26 -
Tab. 5 – Naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s] – prostory hlediště ..... - 36 -
Tab. 6 – Naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s] – horní ochoz ..... - 36 -
Tab. 7 – Aritmetický průměr měření obou podlaží ..... - 36 -
Tab. 8 – Výpočet obsazeného stavu (100%) – původní stav ..... - 37 -
Tab. 9 – Vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 100 %) ..... - 38 -
Tab. 10 – Výňatek výsledků z Tab. 21 z přílohy ..... - 44 -
Tab. 11 – Výňatek výsledků z Tab. 22 z přílohy ..... - 44 -
Tab. 12 - Vyhodnocení doby dozvuku – ODEON – původní stav ..... - 44 -
Tab. 13 - Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry [výňatek z *Tab. 25*] ..... - 46 -
Tab. 14 - Vyhodnocení doby dozvuku – ODEON – Původní stav vs. Po úpravách ..... - 59 -
Tab. 15 - Tabulka vybraných hodnot činitelů pohltivosti zvuku α [32] ..... - 79 -
Tab. 16 – Rozsahy přípustných hodnot C_{80} ..... - 79 -
Tab. 17 – Výpočet objemu daného multifunkčního sálu ..... - 81 -
Tab. 18 - Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 75 %) ..... - 81 -
Tab. 19 - Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 50 %) ..... - 82 -
Tab. 20 – Parametry použitých materiálů ..... - 88 -
Tab. 21 – Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – neobsazený stav – pův.... - 92 -
Tab. 22 - Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – obsazený stav – původní . - 93 -
Tab. 23 - Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – obsazený stav – Po upr.... - 94 -
Tab. 24 - Vyhodnocení – původní stav – Odeon vs. Měření ..... - 94 -
Tab. 25 - Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry ..... - 96 -
Tab. 26 - Vyhodnocení – stav po úpravách – Doplňující parametry ..... - 97 -
Tab. 27 – Kontrolní ruční výpočet – původní stav- neobsazený ..... - 99 -
Tab. 28 - Kontrolní ruční výpočet – původní stav - obsazený ..... - 100 -
Tab. 29 - Kontrolní ruční výpočet – stav po úpravách – obsazený ..... - 101 -

Seznam rovnic

(1) Rychlost šíření zvuku c ..... - 10 -
(2) Hladina akustického výkonu L_w ..... - 11 -
(3) Hladina akustického tlaku L v poli přímých vln ..... - 12 -
(4) Činitel odrazu ρ ..... - 13 -
(5) Činitel pohltivosti α ..... - 13 -
(6) Činitel průzvučnosti τ ..... - 13 -
(7) Ztrátový činitel η ..... - 13 -
(8) Celková zvuková pohltivost A ..... - 14 -
(9) Hladina akustického tlaku L v poli odražených vln ..... - 15 -
(10) Střední činitel pohltivosti α_m ..... - 15 -
(11) Hladina akustického tlaku L (Berankův vztah) ..... - 15 -
(12) Dozvuková vzdálenost r_k ..... - 15 -
(13) Minimální kmitočet f_r pro difúzní akustické pole ..... - 18 -
(14) Vlnová rovnice ke stanovení kmitočtu $f_{x, y, z}$ ..... - 18 -
(15) Bilanční rovnice k definici doby dozvuku T ..... - 20 -
(16) Doba dozvuku T – obecně ..... - 21 -
(17) Doba dozvuku T_S – podle Sabina ..... - 21 -
(18) Doba dozvuku T_E – podle Eyringa ..... - 21 -
(19) Doba dozvuku T_M – podle Millingtona ..... - 21 -
(20) Doba dozvuku T_i – obecně s vlivem útlumu zvuku ve vzduchu ..... - 22 -
(21) Rovnice pro optimální dobu dozvuku T_{opt} ..... - 23 -
(22) Minimální kmitočet f_m pro dobrou účinnost porézních materiálů ..... - 27 -
(23) Rezonanční kmitočet f_r – pro kmitající desky ..... - 29 -
(24) Rezonanční kmitočet f_r – pro dutinové rezonátory ..... - 29 -
(25) Zřetelnost D_{50} [Definition] ..... - 48 -
(26) Míra zřetelnosti C_{50} [Clarity 50] ..... - 49 -
(27) Míra jasnosti C_{80} [Clarity 80] ..... - 49 -
(28) Basový poměr *BR* [Bass Ratio] ..... - 50 -
(29) Vysokofrekvenční poměr *HFR* [High Frequency Ratio] ..... - 50 -

Seznam použitého softwaru

Microsoft Office 2016	- Tvorba textové části
ODEON Room Acoustics Software	- Simulační výpočet
SketchUp software	- Tvorba 3D modelu
Autodesk AutoCAD 2016	- Tvorba výkresové dokumentace/schémat

Seznam příloh

Příloha 1 | Doplňující tabulky – obecně

- Tabulka vybraných hodnot činitelů pohltivosti zvuku α <*Tab. 15*>
- Rozsahy přípustných hodnot C_{80} <*Tab. 16*>

Příloha 2 | Výpočty doby dozvuku - původní stav – hodnoty z měření

- Výpočet objemu daného multifunkčního sálu <*Tab. 17*>
- Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 75 %) <*Tab. 18*>
- Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 50 %) <*Tab. 19*>

Příloha 3 | ODEON Combined Room Acoustics Software

- Popis programu ODEON - obecně
- Popis výpočetní metody doby dozvuku „Quick estimate“
- Popis výpočetní metody doby dozvuku „Global estimate“

Příloha 4 | Ukázka tvorby a práce s modelem

- Test těsnosti modelu při šíření zvuku <*Obr. 32*>
- Jednotlivé polohy zdroje (Z) a mikrofonu (M) – zobrazení 3D <*Obr. 33*>
- Knihovna materiálů – parametry použitých materiálů <*Tab. 20*>
- Ukázka výstupu z funkce Quick estimate (konkrétně pro obsazený původní stav) <*Obr. 34*>
- Ukázka výstupu z funkce Global estimate (konkrétně pro obsazený původní stav) <*Obr. 35*>
- Nastavení prostoru-Room setup <*Obr. 36*>

Příloha 5 | Výsledky dostupné z vytvořeného modelu z Odeonu **(Původní stav)** **(Stav po úpravách)**

- Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Neobsazený stav <*Tab. 21*>
- Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Obsazený stav <*Tab. 22*>
- Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Obsazený stav <*Tab. 23*>
- Vyhodnocení – původní stav – Odeon vs. Měření <*Tab. 24*>
- Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry <*Tab. 25*>
- Vyhodnocení – stav po úpravách – Doplňující parametry <*Tab. 26*>

Příloha 6 | Kontrolní ruční výpočet

- Kontrolní výpočet – původní stav – neobsazený <*Tab. 27*>
- Kontrolní výpočet – původní stav – obsazený <*Tab. 28*>
- Kontrolní ruční výpočet – stav po úpravách – obsazený <*Tab. 29*>

Příloha 7 | Stručný popis jednotlivých akustických úprav

- Jednotlivě popsány úpravy 1 až 6

Příloha 8 | Elektronická verze diplomové práce na přiloženém CD

Příloha 1

Doplňující tabulky – obecně

Seznam přílohy 1

- Tabulka vybraných hodnot činitelů pohltivosti zvuku α <*Tab. 15*>
- Rozsahy přípustných hodnot C_{80} <*Tab. 16*>

Tabulka vybraných hodnot činitelů pohltivosti zvuku α

konstrukce (tloušťka [mm] / odsazení [mm])	kmitočet/[Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Beton hutný	0,010	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Beton vylehčený	0,20	0,22	0,23	0,25	0,21	0,26
Beton s olejovým nátěrem	0,01	0,014	0,016	0,017	0,018	0,02
Čalouněné křeslo zvuková pohltivost v m^2 najeden kus	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30
Čalouněné křeslo obsazené zvuková pohltivost v m^2 najeden kus	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40
Dřevěné křeslo zvuková pohltivost v m^2 najeden kus	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Dřevěné křeslo obsazené zvuková pohltivost v m^2 najeden kus	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35
Dřevotřísková deska (20/50 až 150)	0,30	0,25	0,10	0,08	0,05	0,04
Dřevotřísková deska (odsazení = 0 mm)	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10
Dřevovláknitá měkká deska (15/0)	0,10	0,15	0,55	0,52	0,50	0,45
Deska z pěnového polystyrénu (18 až 32/0)	0,02	0,02	0,03	0,08	0,14	0,29
Koberec bouclé (5/0)	0,08	0,10	0,10	0,21	0,43	0,78
Koberec kokosový (6/0)	0,17	0,06	0,11	0,19	0,37	0,80
Koberec plyšový (10/0)	0,13	0,11	0,15	0,30	0,63	0,90
Linoleum (-/0)	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Okenní otvor zasklený	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04
Omítka malovaná hlinkou (-/0)	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Omítka s olejovým nátěrem (-/0)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Otvor jeviště s dekoracemi	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Publikum v hledišti (plocha obsazená publikem)	0,41	0,48	0,54	0,57	0,56	0,53
Překližka laťová (18/70)	0,27	0,08	0,11	0,09	0,09	0,20
Sádrokartonová deska (9,5/100)	0,11	0,13	0,05	0,02	0,02	0,03
Vlysy dřevěné (-/0)	0,03	0,04	0,06	0,12	0,10	0,17
Vodní hladina	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Zdivo cihelné režné (-/0)	0,024	0,025	0,032	0,042	0,049	0,07

Tab. 15 - Tabulka vybraných hodnot činitelů pohltivosti zvuku α [32]

Rozsahy přípustných hodnot C_{80} pro jednotlivé hudební žánry		
Popis	**Optimální hodnoty**	**Pozn.**
Obecně	1 ± 2 dB	Celkový obecný rozsah
Varhanní hudba	0 ± 2 dB	Varhanní hudba, dechové nástroje - pomalejší tempo
Sborový zpěv	2 ± 2 dB	Smyčcové nástroje - tempo hudby rychlejší
Folková/populární hudba	4 ± 2 dB	Drnkací a trsací nástroje - tempo hudby rychlejší
R&R/moderní hudba	6 ± 2 dB	Nástroje s perkusním (nárazovým) průběhem
LIMITNÍ HRANICE	max. 8dB	NEMĚLA BY BÝT PŘEKROČENA V ŽÁDNÉM MÍSTĚ MĚŘENÍ

Tab. 16 – Rozsahy přípustných hodnot C_{80}

Příloha 2

Výpočty doby dozvuku – původní stav – hodnoty z měření

Seznam přílohy 2

- Výpočet objemu daného multifunkčního sálu <*Tab. 17*>
- Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 75 %) <*Tab. 18*>
- Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 50 %) <*Tab. 19*>

Výpočet objemu daného multifunkčního sálu

Výpočet je proveden podle údajů dostupných z webových stránek [31] multifunkčního sálu.

Rozměry sálu		I	II	III
Plocha [m^2]	Sál	204	36	-
	Přísálí	66	66	-
	Galerie	108	49	49
Výška [m]		I	II	III
	Sál	9,3	3,4	-
	Přísálí	3,4	3,4	-
	Galerie	2,8	2,8	2,8
Objem [m^3]		I	II	III
	Sál	1897,2	122,4	-
	Přísálí	224,4	224,4	-
	Galerie	302,4	137,2	137,2
Celkem	[m^3]	3045,2		

Tab. 17 – Výpočet objemu daného multifunkčního sálu

Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 75 %)

Zde v příloze je uveden jen přehled hodnot, vyhodnocení je zobrazeno v hromadném grafu na *str. - 39 -*.

		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
$T_{neobsazený\ stav\ (měření)}$	[s]	3,01	2,28	1,79	1,41	1,35	1,19
$A_{celková\ (neobsazená)}$	[m^2]	164,68	217,31	277,56	353,08	369,05	415,66
$A_{1\ divák}$	[m^2]	0,15	0,30	0,44	0,45	0,46	0,46
$A_{204\ diváků}$	[m^2]	30,60	61,20	89,76	91,80	93,84	93,84
$A_{celková\ (obsazená)}$	[m^2]	195,28	278,51	367,32	444,88	462,89	509,50
$T_{obsazený\ stav\ (výpočet)}$	[s]	2,54	1,78	1,35	1,12	1,07	0,97
T_0	[s]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Posouzení (HUDBA-ŘEČ)		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
T/T_0 - neobsazený stav	[-]	2,54	1,92	1,51	1,18	1,13	1,01
T/T_0 - ob. stav (75%)	[-]	2,14	1,50	1,14	0,94	0,90	0,82
Limitní mez $T_{horní}$	[-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez $T_{dolní}$	[-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65

Tab. 18 - Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 75 %)

Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 50 %)

Zde v příloze je uveden jen přehled hodnot, vyhodnocení je zobrazeno v hromadném grafu na *str. - 39 -*.

		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
$T_{neobsazený\ stav\ (měření)}$	[s]	3,01	2,28	1,79	1,41	1,35	1,19
$A_{celková\ (neobsazená)}$	[m^2]	164,68	217,31	277,56	353,08	369,05	415,66
$A_{1\ divák}$	[m^2]	0,15	0,30	0,44	0,45	0,46	0,46
$A_{136\ diváků}$	[m^2]	20,40	40,80	59,84	61,20	62,56	62,56
$A_{celková\ (obsazená)}$	[m^2]	185,08	258,11	337,40	414,28	431,61	478,22
$T_{obsazený\ stav\ (výpočet)}$	[s]	2,68	1,92	1,47	1,20	1,15	1,04
T_0	[s]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Posouzení (HUDBA-ŘEČ)		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
T/T_0 - neobsazený stav	[-]	2,54	1,92	1,51	1,18	1,13	1,01
T/T_0 - ob. stav (50%)	[-]	2,26	1,62	1,24	1,01	0,97	0,87
Limitní mez $T_{horní}$	[-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez $T_{dolní}$	[-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65

Tab. 19 - Výpočet a vyhodnocení doby dozvuku – původní stav (obsazenost 50 %)

Příloha 3

ODEON Combined Room Acoustics Software

Seznam přílohy 3

- Popis programu ODEON - obecně
- Popis výpočetní metody doby dozvuku „Quick estimate“
- Popis výpočetní metody doby dozvuku „Global estimate“

Popis programu ODEON - obecně

Vybraný software „ODEON Combined Acoustics Software“ (dále jen ODEON) pro posouzení a návrh akustických úprav je simulačním výpočetním programem, který se obecně používá pro předpověď akustického chování ve velkoobjemových prostorech, mezi které multifunkční sály nepochybně patří.

Samotný program vznikl jako výsledek projektu mezi Technickou univerzitou v Dánsku a vybranou skupinou projekčních a poradenských firem v roce 1984. Ze stejné doby pochází i základní výpočetní metoda, kterou je „Ray tracing method“ (metoda sledování paprsků). Tato metoda byla považována za vhodnou a to proto, že samotné paprsky se mohou považovat za nositele energetické informace, tím pádem je vhodná pro výpočet metodou impulsní odezvy v místnosti. [21]

Postupným vývojem přišli další metody. Jedná se například o kombinaci dvou metod: „Ray tracing method“ a „Image source method“ (metoda zdánlivých zdrojů/obrazových zdrojů). Tato metoda využívá počáteční zrcadlové odrazy akustických paprsků, kdy směr dráhy paprsku je možné určit na základě geometrické konstrukce. Tato metoda disponuje již vyšší přesností výpočtu, daní za přesnost je potom také vyšší časová náročnost. Za další metodu je možné považovat „Particle tracing method“ (metoda sledování částic), u které je specifické uvažování vlivu snížení energie. Ke snížení energie dochází při každém odrazu částice v závislosti na absorpčních vlastnostech odrážejících povrchů.

Popis výpočetní metody doby dozvuku „Quick estimate“ [21]

Jedná se o nejrychlejší metodu získání odhadu doby dozvuku zkoumaného prostoru, zejména i proto je vhodná pro vyhodnocení vlivu jednotlivých materiálů a případných změn na dobu dozvuku. Měla by být považována pouze jako nástroj pro předběžné výsledky.

Tato metoda je specifická tím, že odhaduje střední činitel pohltivosti, který je poté následně použit pro výpočet dle *rovnic (17)* a *(18)*. Tím se dostane odhadovaná doba dozvuku.

Samotný odhad středního činitele pohltivosti probíhá tak, že ze zdroje jsou vyslány částice, u kterých postupně dochází k mnohonásobným odrazům od povrchů v náhodných směrech. Následně se počítá počet odrazů na každý určitý povrch. Při vyhodnocení odrazů se určuje vliv na konečný činitel pohltivosti tak, že povrchy, které jsou zasaženy velmi často mají větší váhu a naopak povrchy, které nejsou zasaženy vůbec se z výpočtu vyřadí.

Výsledná doba dozvuku je také závislá na objemu, který je určen ze sledování drah vysílaných paprsků. V případě, že je daný objem prostoru známý, je možnost zde objem zadat, a tím dojde ke zpřesnění odhadu doby dozvuku.

Pozn. Výstup z této metody je zobrazený na Obr. 34.

Popis výpočetní metody doby dozvuku „Global estimate“

Oproti předchozí metodě vyniká poměrně vysokou přesností výsledků doby dozvuku (samozřejmě v závislosti na přesnosti modelu vůči měření).

Obecně tato metoda odhaduje dobu dozvuku pomocí Shroederovy metody, stručně řečeno se jedná o reverzní časovou integraci. Dochází zde k vyslání částic ze zdroje v náhodných směrech. Následně se zaznamenává pokles energie každé částice v závislosti na čase a také na pohltivosti povrchů prostoru a ve vzduchu. Výsledkem je součet energie z vyslaných částic, ze které se následně získá celková energie daného prostoru. Celý proces výpočtu je zaznamenáván na poklesové křivce energie (*Obr. 35/I*). Ideálním případem je stav, kdy dojde k vyhlazení křivky (*Obr. 35/II*). V takovém případě se pak již zvolí příkaz odvození výsledků. Obecně platí, že čím více vyslaných paprsků, tím přesnější hodnoty se dají získat (*Obr. 35/III* a *Obr. 35/IV*).

V případě na první pohled špatných výsledků je potřeba v nastavení prostoru změnit délku impulzní odezvy (*Obr. 36*).

Pozn. Ilustrativní výstupy z této metody jsou zobrazeny na Obr. 35.

Příloha 4

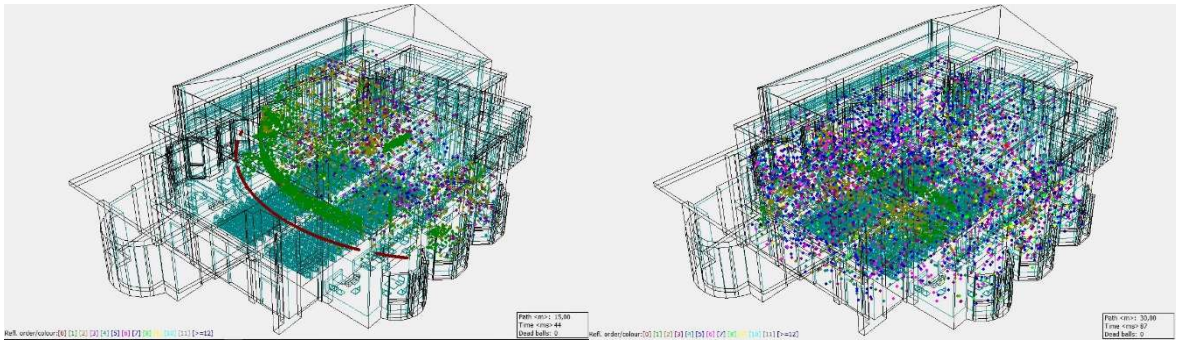
Ukázka tvorby a práce s modelem

Seznam přílohy 4

- Test těsnosti modelu při šíření zvuku <*Obr. 32*>
- Jednotlivé polohy zdroje (Z) a mikrofonu (M) – zobrazení 3D <*Obr. 33*>
- Knihovna materiálů – parametry použitých materiálů <*Tab. 20*>
- Ukázka výstupu z funkce Quick estimate
  (konkrétně pro obsazený původní stav) <*Obr. 34*>
- Ukázka výstupu z funkce Global estimate
  (konkrétně pro obsazený původní stav) <*Obr. 35*>
- Nastavení prostoru-Room setup <*Obr. 36*>

Test těsnosti modelu při šíření zvuku

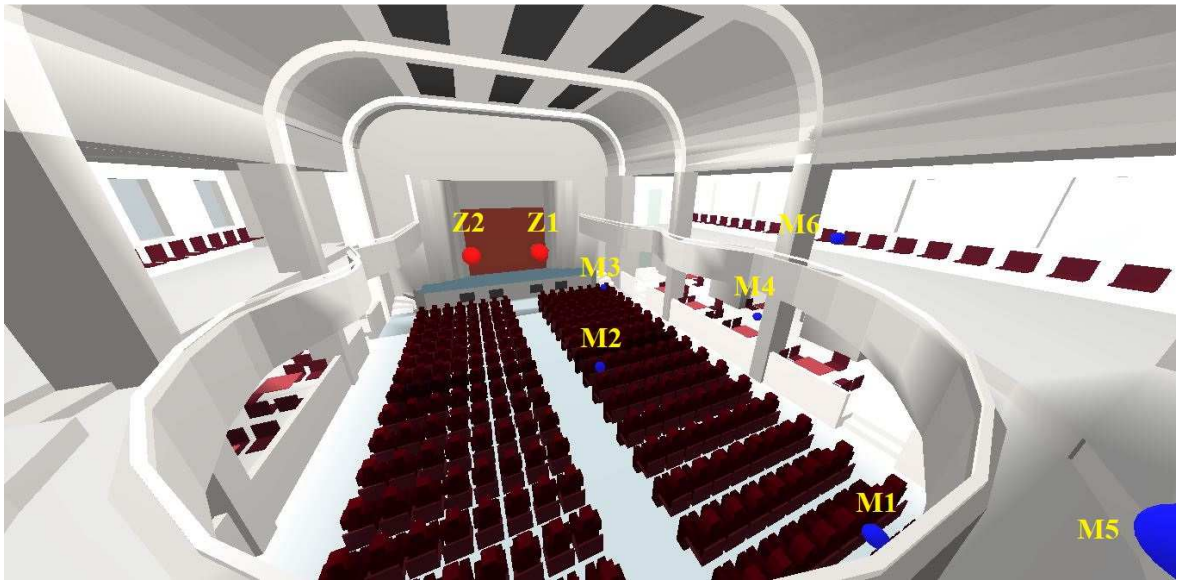
Ukázka šíření zvuku během testování těsnosti modelu. Signál vyslaný z umístění zdroje Z1. Na obrázku vlevo po době t = 15 ms, vpravo t = 30 ms.



Obr. 32 – Test těsnosti modelu při šíření zvuku

Jednotlivé polohy zdroje (Z) a mikrofonu (M) – zobrazení 3D

Na následujícím obrázku je zobrazeno rozmístění jednotlivých poloh zdroje (Z) a mikrofonu (M) v modelu, shodně tak, jak tomu bylo během měření (*Obr. 22* a *Obr. 23*)



Obr. 33 - Jednotlivé polohy zdroje (Z) a mikrofonu (M) – zobrazení 3D

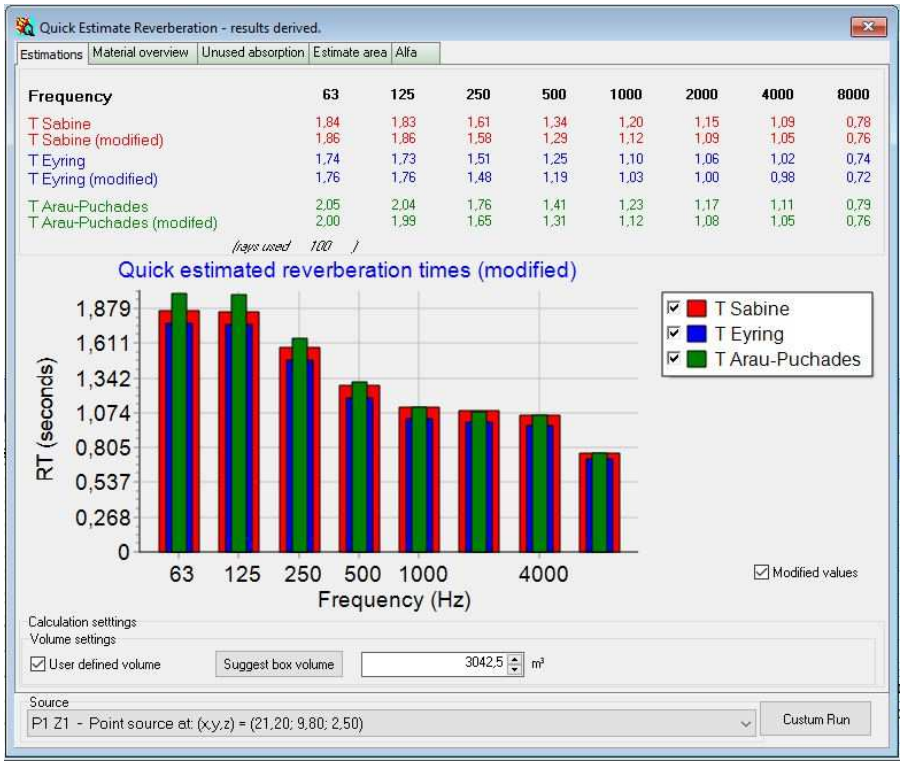
Knihovna materiálů – parametry použitých materiálů

V následující tabulce je uvedena vždy: pracovní hladina při tvorbě modelu, vybraný (ev. vytvořený) materiál v knihovně v Odeonu a jednotlivé činitele pohltivosti zvuku α pro jednotlivé kmitočty.

Název použité hladiny	Materiál - knihovna Odeon	Kmitočet f (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
Omítka - stěny, strop	4000 - Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Dveře	10007 - Solid wooden door	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Okna	10002 - Single pane of glass, 3 mm (Fasold_Winkler, 1976)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Podlaha - podium	3000 - Hollow wooden podium (Ref. Dalenback, CATT)	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Podlaha - parkety_sál	3004 - Wooden floor on joists	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Podlaha - kamenná_přísálí, galerie	2001 - Marble or glazed tile (Harris, 1991)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Opona - přední, zadní	8010 - Drapes, heavy velour (Harris, 1991)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Větrací desky - podium, strop	10009 - Ventilation grille (approx. per sq. m.) (Kristensen, 1994)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Stoly (vč. povrch. úpr.)	8011 - Table-cloth, cotton cloth (0,33 kg/m^2), (Ref. Dalenback, CATT)	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
Židle - odrazivá část	11006 - |Ch.|Empty chairs, reflective part	0,19	0,24	0,25	0,31	0,29	0,22
Židle - pohlcující část	11006 - Empty chairs, upholstered with cloth cover (Beranek, 1962)	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
Diváci v.1	11001 - Areas with audience including narrow aisles (Bobran, 1973)	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
Diváci v.2	14301 - "Výpočet přes modelovou plochu diváka"	0,08	0,17	0,24	0,25	0,25	0,25
Úprava 1	14306 - Gyptone Big Quattro 47	0,48	0,57	0,49	0,39	0,29	0,29
Úprava 2,3,6	14308 - MDF drev. Desky	0,25	0,25	0,20	0,15	0,15	0,15
Úprava 4-I,II	14307 - AMF - Thermatex acoustic RL	0,27	0,18	0,14	0,12	0,15	0,20
Úprava 4-III	Obklad Audition Verso T-LA2	0,69	0,43	0,33	0,26	0,21	0,18
Úprava 5	14309 - Panely AVS1	0,82	0,53	0,64	0,53	0,55	0,51

Tab. 20 – Parametry použitých materiálů

Ukázka výstupu z funkce Quick estimate - (konkrétně pro obsazený původní stav)

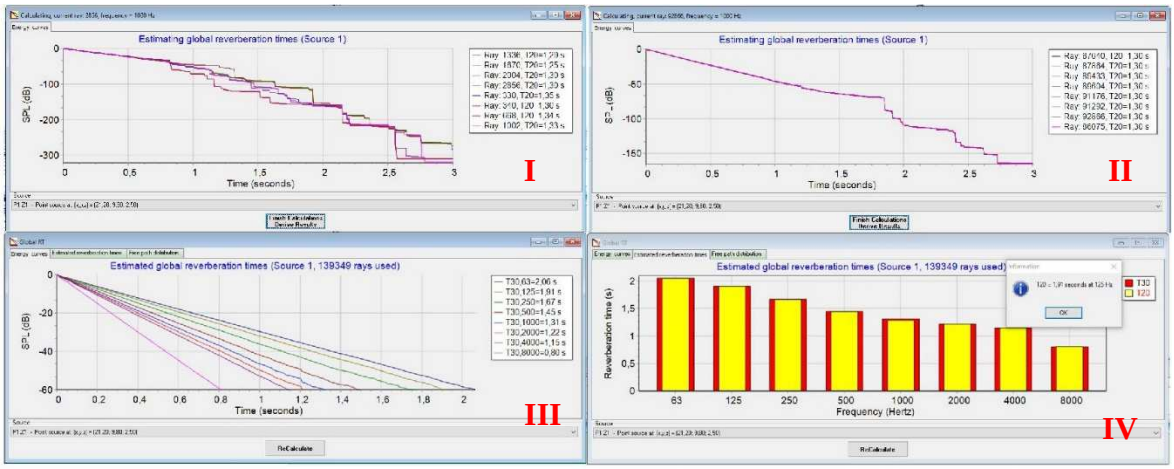


Obr. 34 – Ukázka výstupu z funkce Quick Estimate

Ukázka výstupu z funkce Global estimate - (konkrétně pro obsazený původní stav)

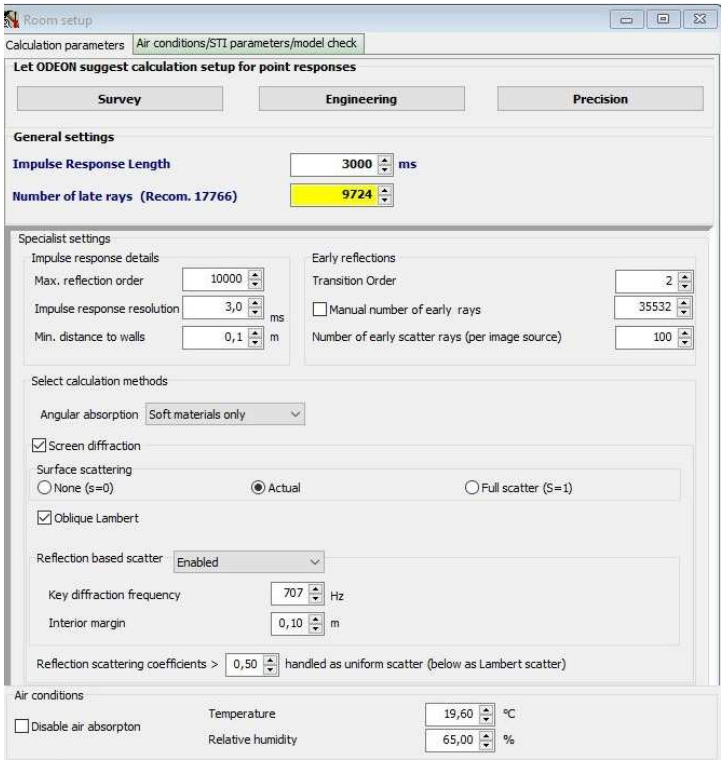
Postupně zobrazeny náhledy pro vyhlazování křivky (I-nevyhlazená, II-vyhlazená), křivka poklesu energie (III) a odhadovaný čas doby dozvuku (IV)

Pozn. Následující obrázky mají charakter pouze ilustrativní, získané hodnoty jsou zaznamenány do příslušných tabulek (Tab. 21 a Tab. 22).



Obr. 35 – Ukázka výstupů z funkce Global Estimate

Nastavení prostoru-Room setup



Obr. 36 – Nastavení prostoru-Room setup

Příloha 5

Výsledky dostupné z vytvořeného modelu z Odeonu

Seznam přílohy 5 **(Původní stav)** **(Stav po úpravách)**

- Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Neobsazený stav <*Tab. 21*>
- Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Obsazený stav <*Tab. 22*>
- Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Obsazený stav <*Tab. 23*>
- Vyhodnocení – původní stav – Odeon vs. Měření <*Tab. 24*>
- Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry <*Tab. 25*>
- Vyhodnocení – stav po úpravách – Doplňující parametry <*Tab. 26*>

Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Neobsazený stav – Původní

ODEON - původní (neobsazený) stav									
Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M1	Z1	2,42	2,29	2,00	1,66	1,46	1,37	1,31	0,87
	Z2	2,37	2,25	1,95	1,66	1,50	1,41	1,33	0,88
M2	Z1	2,35	2,24	1,96	1,67	1,49	1,41	1,33	0,92
	Z2	2,26	2,15	1,87	1,59	1,41	1,31	1,22	0,79
M3	Z1	2,19	2,09	1,84	1,57	1,39	1,30	1,23	0,87
	Z2	2,13	2,03	1,77	1,49	1,31	1,24	1,14	0,72
M4	Z1	2,40	2,28	1,99	1,71	1,49	1,44	1,36	0,96
	Z2	2,43	2,33	2,08	1,82	1,64	1,53	1,43	0,93

Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M5	Z1	2,45	2,35	2,11	1,83	1,62	1,49	1,37	0,90
	Z2	2,47	2,35	2,04	1,72	1,49	1,38	1,29	0,84
M6	Z1	2,52	2,41	2,13	1,87	1,70	1,62	1,52	1,05
	Z2	2,46	2,36	2,07	1,78	1,56	1,46	1,37	0,89

Aritmetický průměr všech měření	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	2,37	2,26	1,98	1,70	1,51	1,41	1,33	0,89

Tab. 21 – Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – neobsazený stav – původní

Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – Obsazený stav – Původní

ODEON - původní (obsazený) stav									
Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M1	Z1	1,96	1,77	1,52	1,30	1,16	1,08	1,02	0,70
	Z2	2,01	1,84	1,62	1,41	1,27	1,17	1,11	0,75
M2	Z1	2,02	1,81	1,56	1,34	1,21	1,13	1,06	0,74
	Z2	1,93	1,78	1,57	1,32	1,18	1,08	1,00	0,68
M3	Z1	2,12	1,91	1,59	1,28	1,16	1,10	1,08	0,78
	Z2	1,77	1,66	1,48	1,24	1,09	1,00	0,92	0,62
M4	Z1	2,09	1,89	1,59	1,33	1,21	1,13	1,09	0,86
	Z2	2,18	2,01	1,79	1,54	1,38	1,27	1,18	0,85

Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M5	Z1	2,14	2,00	1,79	1,56	1,41	1,29	1,19	0,85
	Z2	2,16	2,00	1,76	1,52	1,36	1,24	1,15	0,77
M6	Z1	2,22	2,07	1,84	1,63	1,49	1,36	1,27	0,92
	Z2	2,21	2,07	1,85	1,61	1,40	1,26	1,17	0,82

Aritmetický průměr všech měření	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	2,07	1,90	1,66	1,42	1,28	1,18	1,10	0,78

Tab. 22 - Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – obsazený stav – původní

Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon–Obsazený stav–Po úpravách

ODEON - Upravený(obsazený) stav									
Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M1	Z1	1,31	1,22	1,20	1,06	1,02	0,99	0,96	0,69
	Z2	1,37	1,30	1,27	1,14	1,11	1,03	0,95	0,71
M2	Z1	1,30	1,21	1,27	1,08	1,05	0,99	0,95	0,69
	Z2	1,49	1,35	1,27	1,11	1,06	1,01	0,96	0,71
M3	Z1	1,27	1,17	1,15	1,03	1,00	0,96	0,92	0,71
	Z2	1,32	1,32	1,31	1,18	1,12	1,02	0,97	0,70
M4	Z1	1,40	1,27	1,18	0,97	0,96	0,93	0,91	0,69
	Z2	1,64	1,67	1,68	1,61	1,69	1,46	1,17	0,75

Měření	Zdroj	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
M5	Z1	1,45	1,36	1,28	1,13	1,09	1,03	0,98	0,73
	Z2	1,39	1,30	1,28	1,16	1,12	1,05	0,98	0,72
M6	Z1	1,42	1,33	1,29	1,14	1,08	1,02	0,98	0,77
	Z2	1,38	1,29	1,22	1,12	1,10	1,06	1,01	0,74

Aritmetický průměr všech měření	Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	1,40	1,32	1,28	1,14	1,12	1,05	0,98	0,72

Tab. 23 - Dílčí hodnoty pro jednotlivé kombinace zdroj/mikrofon – obsazený stav – Po upravách

Vyhodnocení - původní stav – Odeon vs. Měření

Posouzení (HUDBA-ŘEČ)		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000
T_0	[s]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19
T/T_0 - neobsazený stav - Měření	[-]	2,54	1,92	1,51	1,18	1,13	1,01
T/T_0 - ob. stav (100%) - Měření	[-]	2,04	1,40	1,05	0,88	0,85	0,77
T/T_0 - neobsazený stav - ODEON	[-]	2,26	1,98	1,70	1,51	1,41	1,33
T/T_0 - ob. stav (100%) - ODEON	[-]	1,90	1,66	1,42	1,28	1,18	1,10
T_E/T_0 - neobsazený stav - Výpočet	[-]	2,11	1,85	1,56	1,28	1,24	1,13
T_E/T_0 - ob. stav (100%) - Výpočet	[-]	1,72	1,31	1,02	0,88	0,86	0,80
Limitní mez $T_{horní}$	[-]	1,45	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Limitní mez $T_{dolní}$	[-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,65

Tab. 24 - Vyhodnocení – původní stav – Odeon vs. Měření

Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry

M1		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,27	0,30	0,35	0,38	0,40	0,41	0,38	0,41	0,46	0,49	0,51	0,52
	Z2	0,32	0,35	0,40	0,44	0,46	0,47	0,38	0,42	0,48	0,52	0,55	0,56
C_{50} [dB]	Z1	-4,2	-3,6	-2,8	-2,1	-1,7	-1,7	-2,1	-1,5	-0,8	-0,2	0,3	0,4
	Z2	-3,3	-2,7	-1,8	-1,1	-0,7	-0,5	-2,1	-1,4	-0,4	0,3	0,8	1,1
C_{80} [dB]	Z1	-1,7	-0,9	0,1	1,0	1,3	1,4	0,4	1,2	2,1	2,9	3,3	3,5
	Z2	-1,2	-0,5	0,4	1,2	1,6	1,9	0,0	0,8	1,9	2,6	3,2	3,5
STI [-]	Z1	0,50						0,57					
	Z2	0,53						0,57					
BR [-]	Z1	1,38						1,34					
	Z2	1,33						1,29					
HFR [-]	Z1	1,16						1,17					
	Z2	1,15						1,18					
M2		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,26	0,29	0,32	0,34	0,36	0,38	0,34	0,37	0,40	0,43	0,45	0,47
	Z2	0,37	0,41	0,45	0,48	0,50	0,51	0,42	0,46	0,50	0,53	0,55	0,57
C_{50} [dB]	Z1	-4,5	-3,9	-3,3	-2,8	-2,5	-2,2	-2,8	-2,3	-1,7	-1,3	-0,9	-0,6
	Z2	-2,2	-1,6	-0,9	-0,3	-0,1	0,2	-1,4	-0,7	0,0	0,5	0,9	1,2
C_{80} [dB]	Z1	-1,8	-1,1	-0,2	0,4	0,7	1,1	0,0	0,9	1,8	2,4	2,7	3,1
	Z2	-0,2	0,7	1,7	2,4	2,7	3,0	0,8	1,7	2,8	3,4	3,9	4,3
STI [-]	Z1	0,47						0,52					
	Z2	0,54						0,57					
BR [-]	Z1	1,33						1,32					
	Z2	1,34						1,34					
HFR [-]	Z1	1,15						1,16					
	Z2	1,19						1,20					
M3		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,47	0,51	0,55	0,58	0,59	0,60	0,59	0,62	0,66	0,67	0,68	0,69
	Z2	0,46	0,49	0,52	0,54	0,55	0,57	0,52	0,56	0,60	0,63	0,64	0,65
C_{50} [dB]	Z1	-0,4	0,1	0,8	1,3	1,5	1,8	1,5	2,2	2,8	3,2	3,4	3,6
	Z2	-0,6	-0,2	0,3	0,7	0,9	1,2	0,3	1,0	1,8	2,3	2,6	2,7
C_{80} [dB]	Z1	1,1	1,8	2,5	3,1	3,3	3,6	3,1	3,7	4,5	4,9	5,1	5,4
	Z2	1,0	1,5	2,1	2,7	3,0	3,5	2,3	3,0	3,7	4,3	4,7	5,1
STI [-]	Z1	0,58						0,64					
	Z2	0,57						0,61					
BR [-]	Z1	1,33						1,43					
	Z2	1,36						1,35					
HFR [-]	Z1	1,17						1,12					
	Z2	1,18						1,21					
M4		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,25	0,29	0,34	0,38	0,39	0,40	0,28	0,33	0,38	0,43	0,44	0,44
	Z2	0,29	0,35	0,42	0,48	0,48	0,49	0,34	0,39	0,46	0,52	0,53	0,54
C_{50} [dB]	Z1	-4,8	-3,9	-2,9	-2,1	-1,9	-1,7	-4,1	-3,1	-2,2	-1,2	-1,1	-1,0
	Z2	-3,8	-2,7	-1,4	-0,4	-0,4	-0,2	-3,0	-1,9	-0,7	0,3	0,4	0,7
C_{80} [dB]	Z1	-2,4	-1,5	-0,5	0,5	0,7	1,0	-1,5	-0,4	0,7	1,7	2,0	2,2
	Z2	-1,9	-0,8	0,6	1,7	1,9	2,0	-0,8	0,3	1,5	2,4	2,8	3,2
STI [-]	Z1	0,48						0,51					
	Z2	0,51						0,54					
BR [-]	Z1	1,33						1,37					
	Z2	1,27						1,30					
HFR [-]	Z1	1,14						1,14					
	Z2	1,17						1,19					

M5		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,25	0,27	0,32	0,38	0,42	0,45	0,28	0,31	0,35	0,40	0,45	0,48
	Z2	0,34	0,38	0,43	0,48	0,51	0,52	0,36	0,39	0,44	0,49	0,53	0,55
C_{50} [dB]	Z1	-4,9	-4,2	-3,3	-2,2	-1,4	-0,9	-4,1	-3,5	-2,6	-1,7	-0,8	-0,3
	Z2	-2,9	-2,2	-1,2	-0,4	0,2	0,4	-2,6	-1,9	-1,0	-0,2	0,5	0,8
C_{80} [dB]	Z1	-2,5	-1,8	-0,8	0,2	1,0	1,5	-1,7	-1,0	-0,1	0,9	1,7	2,2
	Z2	-0,9	-0,1	1,0	1,9	2,4	2,7	-0,3	0,4	1,4	2,2	3,0	3,4
STI [-]	Z1	0,50						0,53					
	Z2	0,54						0,56					
BR [-]	Z1	1,29						1,28					
	Z2	1,37						1,31					
HFR [-]	Z1	1,21						1,20					
	Z2	1,20						1,21					
M6		ODEON - původní (neobsazený) stav						ODEON - původní (obsazený) stav					
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]						Frekvence (oktávová pásma) [Hz]					
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,12	0,14	0,16	0,19	0,21	0,24	0,15	0,17	0,20	0,23	0,26	0,29
	Z2	0,25	0,27	0,32	0,36	0,39	0,40	0,26	0,29	0,33	0,38	0,41	0,43
C_{50} [dB]	Z1	-8,6	-8,0	-7,1	-6,3	-5,6	-5,0	-7,5	-6,8	-6,0	-5,2	-4,5	-3,9
	Z2	-4,9	-4,2	-3,3	-2,5	-2,0	-1,7	-4,5	-3,9	-3,0	-2,2	-1,6	-1,3
C_{80} [dB]	Z1	-5,2	-4,5	-3,6	-2,8	-2,2	-1,7	-4,0	-3,3	-2,4	-1,7	-1,1	-0,6
	Z2	-2,2	-1,5	-0,5	0,3	0,8	1,2	-1,7	-1,1	-0,2	0,5	1,2	1,6
STI [-]	Z1	0,45						0,49					
	Z2	0,49						0,51					
BR [-]	Z1	1,27						1,25					
	Z2	1,33						1,30					
HFR [-]	Z1	1,14						1,19					
	Z2	1,18						1,24					

Tab. 25 - Vyhodnocení – původní stav – Doplňující parametry

Vyhodnocení – stav po úpravách – Doplňující parametry

M1		ODEON - obsazený stav po ÚPRAVĚ					M2		ODEON - obsazený stav po ÚPRAVĚ				
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							Frekvence (oktávová pásma) [Hz]				
		125	250	500	1000	2000	4000			125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,57	0,58	0,61	0,61	0,63	0,64	D_{50} [-]	Z1	0,50	0,49	0,52	0,52	0,54	0,55
	Z2	0,57	0,59	0,63	0,64	0,66	0,67		Z2	0,56	0,58	0,60	0,61	0,62	0,63
C_{50} [dB]	Z1	1,30	1,40	1,90	2,00	2,30	2,50	C_{50} [dB]	Z1	0,00	-0,10	0,30	0,30	0,60	0,90
	Z2	1,30	1,50	2,30	2,50	2,90	3,10		Z2	1,10	1,30	1,70	1,90	2,20	2,40
C_{80} [dB]	Z1	4,50	4,70	5,30	5,40	5,60	5,90	C_{80} [dB]	Z1	2,60	2,90	3,70	3,90	4,30	4,50
	Z2	3,80	4,10	4,90	5,10	5,60	5,90		Z2	3,70	4,30	5,20	5,40	5,70	6,00
STI [-]	Z1				0,65			STI [-]	Z1				0,58		
	Z2				0,66				Z2				0,63		
BR [-]	Z1				1,16			BR [-]	Z1				1,81		
	Z2				1,14				Z2				1,94		
HFR [-]	Z1				1,07			HFR [-]	Z1				1,10		
	Z2				1,14				Z2				1,10		

M3		ODEON - obsazený stav po ÚPRAVĚ					M4		ODEON - obsazený stav po ÚPRAVĚ				
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							Frekvence (oktávová pásma) [Hz]				
		125	250	500	1000	2000	4000			125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,75	0,76	0,77	0,77	0,77	0,78	D_{50} [-]	Z1	0,39	0,46	0,48	0,52	0,51	0,51
	Z2	0,61	0,62	0,66	0,66	0,69	0,68		Z2	0,50	0,55	0,61	0,65	0,65	0,65
C_{50} [dB]	Z1	4,70	5,00	5,20	5,10	5,20	5,40	C_{50} [dB]	Z1	-2,00	-1,20	-0,40	0,30	0,30	0,20
	Z2	1,90	2,20	2,90	2,90	3,20	3,20		Z2	0,00	0,80	1,90	2,60	2,70	2,80
C_{80} [dB]	Z1	6,50	6,80	7,20	7,10	7,00	7,20	C_{80} [dB]	Z1	1,10	1,80	2,80	3,70	3,70	3,90
	Z2	4,20	4,30	4,70	4,80	5,10	5,40		Z2	2,00	2,80	4,00	4,60	4,80	5,00
STI [-]	Z1				0,71			STI [-]	Z1				0,56		
	Z2				0,64				Z2				0,62		
BR [-]	Z1				1,14			BR [-]	Z1				1,27		
	Z2				1,14				Z2				1,02		
HFR [-]	Z1				1,08			HFR [-]	Z1				1,05		
	Z2				1,16				Z2				1,25		

M5		ODEON - obsazený stav po ÚPRAVĚ					M6		ODEON - obsazený stav po ÚPRAVĚ				
		Frekvence (oktávová pásma) [Hz]							Frekvence (oktávová pásma) [Hz]				
		125	250	500	1000	2000	4000			125	250	500	1000	2000	4000
D_{50} [-]	Z1	0,44	0,45	0,48	0,50	0,52	0,54	D_{50} [-]	Z1	0,27	0,27	0,31	0,34	0,37	0,40
	Z2	0,52	0,53	0,57	0,60	0,62	0,63		Z2	0,47	0,46	0,51	0,53	0,54	0,56
C_{50} [dB]	Z1	-1,00	-0,90	-0,30	-0,10	0,40	0,70	C_{50} [dB]	Z1	-4,30	-4,30	-3,40	-2,90	-2,30	-1,80
	Z2	0,30	0,60	1,30	1,70	2,10	2,40		Z2	-0,60	-0,70	0,10	0,50	0,80	1,10
C_{80} [dB]	Z1	1,70	1,90	2,60	2,90	3,40	3,80	C_{80} [dB]	Z1	-0,70	-0,60	0,40	0,90	1,50	2,00
	Z2	2,70	2,90	3,70	4,20	4,70	5,00		Z2	2,30	2,30	3,10	3,50	3,90	4,30
STI [-]	Z1				0,59			STI [-]	Z1				0,55		
	Z2				0,63				Z2				0,60		
BR [-]	Z1				1,19			BR [-]	Z1				1,18		
	Z2				1,13				Z2				1,13		
HFR [-]	Z1				1,10			HFR [-]	Z1				1,11		
	Z2				1,12				Z2				1,07		

Tab. 26 - Vyhodnocení – stav po úpravách – Doplňující parametry

Příloha 6

Kontrolní ruční výpočet

Seznam přílohy 6

- Kontrolní výpočet – původní stav – neobsazený <*Tab. 27*>
- Kontrolní výpočet – původní stav – obsazený <*Tab. 28*>
- Kontrolní ruční výpočet – stav po úpravách – obsazený <*Tab. 29*>

Kontrolní výpočet – původní stav - neobsazený

Veškeré zde použité materiály jsou čerpány z knihovny materiálů Odeon, popř. jsou uvedeny v *Tab. 20*.

Jednotlivé plochy povrchů S_i jsou odměřeny z 3D modelu daného prostoru.

Celkový objem daného prostoru V je vypočten dle materiálů dostupných ze stránek daného multifunkčního sálu a je uveden v *Tab. 17*.

Objem V [m^3]		**3045,20**	(Sál 500 ÷ 20000 m^3)					
Povrch		α_i (-)	Kmitočet f (oktávová pásma) [Hz]					
Plocha S_i [m^2]		A_i (m^2)	125	250	500	1000	2000	4000
Stěny-omítka		α_1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
S_1	430,51	$A_1 = S_1 . \alpha_1$	8,61	8,61	12,92	17,22	21,53	21,53
Strop-omítka		α_2	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
S_2	539,80	$A_2 = S_2 . \alpha_2$	10,80	10,80	16,19	21,59	26,99	26,99
Dveře		α_3	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
S_3	27,48	$A_3 = S_3 . \alpha_3$	3,85	2,75	1,65	2,20	2,75	2,75
Okna		α_4	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
S_4	58,55	$A_4 = S_4 . \alpha_4$	4,68	2,34	1,76	1,76	1,17	1,17
Podlaha-podium		α_5	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
S_5	20,47	$A_5 = S_5 . \alpha_5$	8,19	6,14	4,09	3,48	3,07	2,05
Podlaha-parkety_sál		α_6	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
S_6	236,16	$A_6 = S_6 . \alpha_6$	35,42	25,98	23,62	16,53	14,17	16,53
Podlaha-kamenná_přísálí, galerie		α_7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
S_7	316,93	$A_7 = S_7 . \alpha_7$	3,17	3,17	3,17	3,17	6,34	6,34
Opona-přední,zadní		α_8	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
S_8	40,45	$A_8 = S_8 . \alpha_8$	5,66	14,16	22,25	29,12	28,32	26,29
Větrací desky-podium, strop		α_9	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
S_9	40,94	$A_9 = S_9 . \alpha_9$	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56
Stoly (vč. Povrchové úpravy)		α_{10}	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
S_{10}	17,40	$A_{10} = S_{10} . \alpha_{10}$	1,22	5,39	8,53	14,09	11,48	9,40
Židle-odrazivá část		α_{11}	0,19	0,24	0,25	0,31	0,29	0,22
S_{11}	150,75	$A_{11} = S_{11} . \alpha_{11}$	28,64	36,18	37,69	46,73	43,72	33,17
Židle-pohlcující část		α_{12}	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
S_{12}	122,63	$A_{12} = S_{12} . \alpha_{12}$	53,96	73,58	94,42	109,14	100,55	85,84
CELKEM		A [m^2]	188,76	213,65	250,84	289,60	284,65	256,61
S=ΣSi	2002,07	α_m=A/S [-]	0,09	0,11	0,13	0,14	0,14	0,13
		α_E= -ln(1-α_m)[-]	0,10	0,11	0,13	0,16	0,15	0,14
T_S [s] dle Sabina			**2,63**	**2,32**	**1,98**	**1,63**	**1,58**	**1,41**
T_E [s] dle Eyringa			**2,50**	**2,20**	**1,85**	**1,52**	**1,48**	**1,34**
T_0 [s]			1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Tab. 27 – Kontrolní ruční výpočet – původní stav- neobsazený

Kontrolní výpočet – původní stav - obsazený

Veškeré zde použité materiály jsou čerpány z knihovny materiálů Odeon, popř. jsou uvedeny v Tab. 20.

Jednotlivé plochy povrchů S_i jsou odměřeny z 3D modelu daného prostoru.

Celkový objem daného prostoru V je vypočten dle materiálů dostupných ze stránek daného multifunkčního sálu a je uveden v *Tab. 17*.

Pozn. Ve výpočtu je nulová hodnota u povrchu „židle-pohlcující část“. Zde se uvažuje zakrytí tohoto povrchu odpovídající částí povrchu „diváci“.

Objem V [m^3]		**3045,20**	(Sál 500 ÷ 20000 m^3)					
Povrch		α_i (-)	Kmitočet f (oktávová pásma) [Hz]					
Plocha S_i [m^2]		A_i (m^2)	125	250	500	1000	2000	4000
Stěny-omítka		α_1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
S_1	430,51	$A_1 = S_1 . \alpha_1$	8,61	8,61	12,92	17,22	21,53	21,53
Strop-omítka		α_2	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
S_2	539,80	$A_2 = S_2 . \alpha_2$	10,80	10,80	16,19	21,59	26,99	26,99
Dveře		α_3	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
S_3	27,48	$A_3 = S_3 . \alpha_3$	3,85	2,75	1,65	2,20	2,75	2,75
Okna		α_4	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
S_4	58,55	$A_4 = S_4 . \alpha_4$	4,68	2,34	1,76	1,76	1,17	1,17
Podlaha-podium		α_5	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
S_5	20,47	$A_5 = S_5 . \alpha_5$	8,19	6,14	4,09	3,48	3,07	2,05
Podlaha-parkety_sál		α_6	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
S_6	236,16	$A_6 = S_6 . \alpha_6$	35,42	25,98	23,62	16,53	14,17	16,53
Podlaha-kamenná_přísálí, galerie		α_7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
S_7	316,93	$A_7 = S_7 . \alpha_7$	3,17	3,17	3,17	3,17	6,34	6,34
Opona-přední,zadní		α_8	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
S_8	40,45	$A_8 = S_8 . \alpha_8$	5,66	14,16	22,25	29,12	28,32	26,29
Větrací desky-podium, strop		α_9	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
S_9	40,94	$A_9 = S_9 . \alpha_9$	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56
Stoly (vč. Povrchové úpravy)		α_{10}	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
S_{10}	17,40	$A_{10} = S_{10} . \alpha_{10}$	1,22	5,39	8,53	14,09	11,48	9,40
Židle-odrazivá část		α_{11}	0,19	0,24	0,25	0,31	0,29	0,22
S_{11}	150,75	$A_{11} = S_{11} . \alpha_{11}$	28,64	36,18	37,69	46,73	43,72	33,17
Židle-pohlcující část		α_{13}	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
S_{13}	0,00	$A_{13} = S_{13} . \alpha_{13}$	53,96	73,58	94,42	109,14	100,55	85,84
Diváci		α_{12}	0,08	0,17	0,24	0,25	0,25	0,25
S_{12}	491,88	$A_{12} = S_{12} . \alpha_{12}$	40,80	81,60	119,68	122,40	125,12	125,12
CELKEM		A [m^2]	229,56	295,25	370,52	412,00	409,77	381,73
S=ΣSi	2371,32	α_m=A/S [-]	0,11	0,15	0,19	0,21	0,20	0,19
		α_E= -ln(1-α_m)[-]	0,12	0,16	0,20	0,23	0,23	0,21
T_S [s] dle Sabina			**2,16**	**1,68**	**1,34**	**1,16**	**1,13**	**1,04**
T_E [s] dle Eyringa			**2,04**	**1,55**	**1,21**	**1,04**	**1,02**	**0,96**
T_0 [s]			1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Tab. 28 - Kontrolní ruční výpočet – původní stav - obsazený

Kontrolní ruční výpočet – stav po úpravách – obsazený

Pozn. Pro výpočet platí shodné vstupní parametry jako pro ostatní stavy výpočtu uvedené u na předchozí straně.

Objem V [m^3]		**3045,20**	(Sál 500 ÷ 20000 m^3)					
Povrch		α_i (-)	Kmitočet f (oktávová pásma) [Hz]					
Plocha S_i [m^2]		A_i (m^2)	125	250	500	1000	2000	4000
Stěny-omítka (S_1 po započtení úprav)		α_1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
S_1	153,79	$A_1 = S_1 . \alpha_1$	3,08	3,08	4,61	6,15	7,69	7,69
Strop-omítka (S_2 po započtení úprav)		α_2	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
S_2	544,78	$A_2 = S_2 . \alpha_2$	10,90	10,90	16,34	21,79	27,24	27,24
Dveře		α_3	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
S_3	27,48	$A_3 = S_3 . \alpha_3$	3,85	2,75	1,65	2,20	2,75	2,75
Okna		α_4	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
S_4	58,55	$A_4 = S_4 . \alpha_4$	4,68	2,34	1,76	1,76	1,17	1,17
Podlaha-podium		α_5	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
S_5	20,47	$A_5 = S_5 . \alpha_5$	8,19	6,14	4,09	3,48	3,07	2,05
Podlaha-parkety_sál		α_6	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
S_6	236,16	$A_6 = S_6 . \alpha_6$	35,42	25,98	23,62	16,53	14,17	16,53
Podlaha-kamenná_přísálí, galerie		α_7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
S_7	316,93	$A_7 = S_7 . \alpha_7$	3,17	3,17	3,17	3,17	6,34	6,34
Opona-přední,zadní		α_8	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
S_8	40,45	$A_8 = S_8 . \alpha_8$	5,66	14,16	22,25	29,12	28,32	26,29
Větrací desky-podium, strop		α_9	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
S_9	40,94	$A_9 = S_9 . \alpha_9$	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56	24,56
Stoly (vč. Povrchové úpravy)		α_{10}	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
S_{10}	17,40	$A_{10} = S_{10} . \alpha_{10}$	1,22	5,39	8,53	14,09	11,48	9,40
Židle-odrazivá část		α_{11}	0,19	0,24	0,25	0,31	0,29	0,22
S_{11}	150,75	$A_{11} = S_{11} . \alpha_{11}$	28,64	36,18	37,69	46,73	43,72	33,17
Židle-pohlcující část		α_{13}	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70
S_{13}	0,00	$A_{13} = S_{13} . \alpha_{13}$	53,96	73,58	94,42	109,14	100,55	85,84
Diváci		α_{12}	0,08	0,17	0,24	0,25	0,25	0,25
S_{12}	491,88	$A_{12} = S_{12} . \alpha_{12}$	40,80	81,60	119,68	122,40	125,12	125,12
Úprava 1 (S_1)		α_{14}	0,45	0,50	0,46	0,37	0,31	0,28
S_{14}	71,04	$A_{14} = S_{14} . \alpha_{14}$	31,97	35,52	32,68	26,28	22,02	19,89
Úprava 2 (S_2 /-56,69+61,67/)		α_{15}	0,25	0,25	0,20	0,15	0,15	0,15
S_{15}	61,67	$A_{15} = S_{15} . \alpha_{15}$	15,42	15,42	12,33	9,25	9,25	9,25
Úprava 3 (S_1)		α_{16}	0,25	0,25	0,20	0,15	0,15	0,15
S_{16}	35,60	$A_{16} = S_{16} . \alpha_{16}$	8,90	8,90	7,12	5,34	5,34	5,34
Úprava 4-I,II (S_1)		α_{17}	0,27	0,18	0,14	0,12	0,15	0,20
S_{17}	58,52	$A_{13} = S_{17} . \alpha_{17}$	15,80	10,53	8,19	7,02	8,78	11,70
Úprava 4-III (S_1)		α_{18}	0,69	0,43	0,33	0,26	0,21	0,18
S_{18}	21,52	$A_{13} = S_{18} . \alpha_{18}$	14,85	9,25	7,10	5,60	4,52	3,87
Úprava 5 (S_1)		α_{19}	0,82	0,53	0,64	0,53	0,55	0,51
S_{19}	90,04	$A_{13} = S_{19} . \alpha_{19}$	73,83	47,72	57,63	47,72	49,52	45,92
Úprava 6 (0)		α_{20}	0,25	0,25	0,20	0,15	0,15	0,15
S_{20}	31,21	$A_{13} = S_{20} . \alpha_{20}$	7,80	7,80	6,24	4,68	4,68	4,68
CELKEM		A [m^2]	392,70	424,97	493,66	507,02	500,29	468,80
S=ΣSi	2099,58	α_m=A/S [-]	0,20	0,21	0,25	0,25	0,25	0,23
		α_E= -ln(1-α_m)[-]	0,22	0,24	0,28	0,29	0,29	0,27
T_S [s] dle Sabina			**1,26**	**1,17**	**1,01**	**0,95**	**0,94**	**0,88**
T_E [s] dle Eyringa			**1,14**	**1,04**	**0,88**	**0,83**	**0,82**	**0,79**
T_0 [s]			1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19

Tab. 29 - Kontrolní ruční výpočet – stav po úpravách – obsazený

Příloha 7

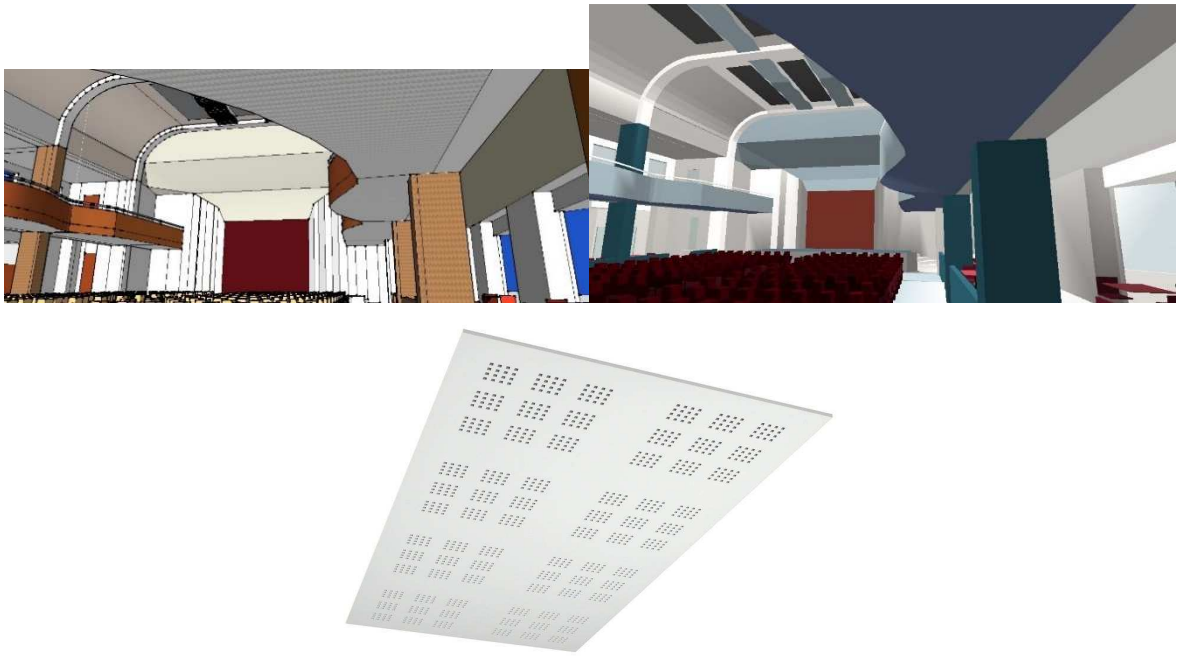
Stručný popis jednotlivých akustických úprav

Seznam přílohy 7

- Jednotlivě popsány úpravy 1 až 6

ÚPRAVA č.1

Cílem této úpravy je obložení spodních vodorovných ploch balkónu pohltivým materiálem v celé jeho ploše. Umístění úpravy a samotný materiál je patrný z následujícího obrázku.



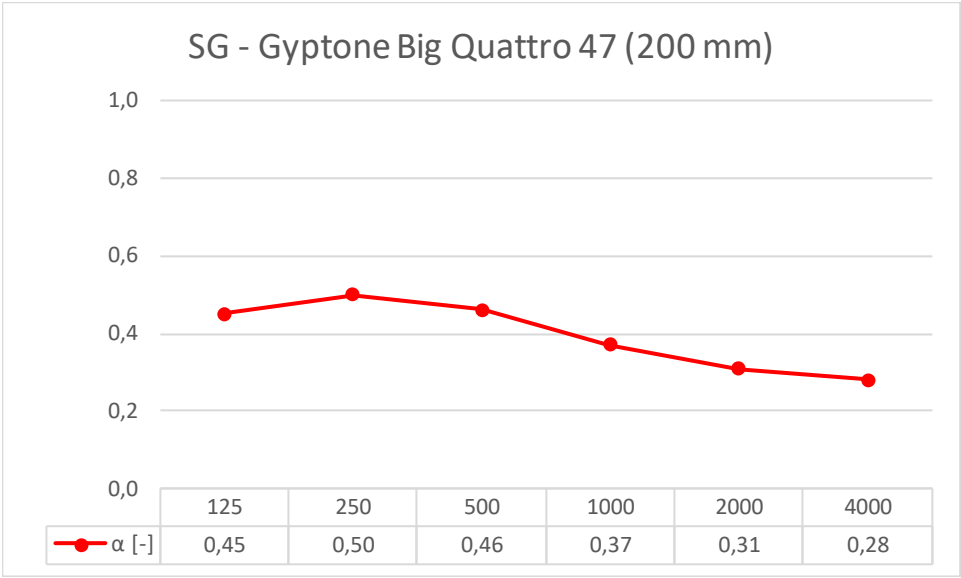
Obr. 37 – Úprava č.1 – SketchUp, Odeon, použitý materiál [33]

Celková plocha: 71,04 m^2 (údaj odečtený z modelu)

Použitý materiál: Absorpční obklad - Saint-Gobain Construction

Gyptone Big Quattro 47 (pohledová strana – bílá)

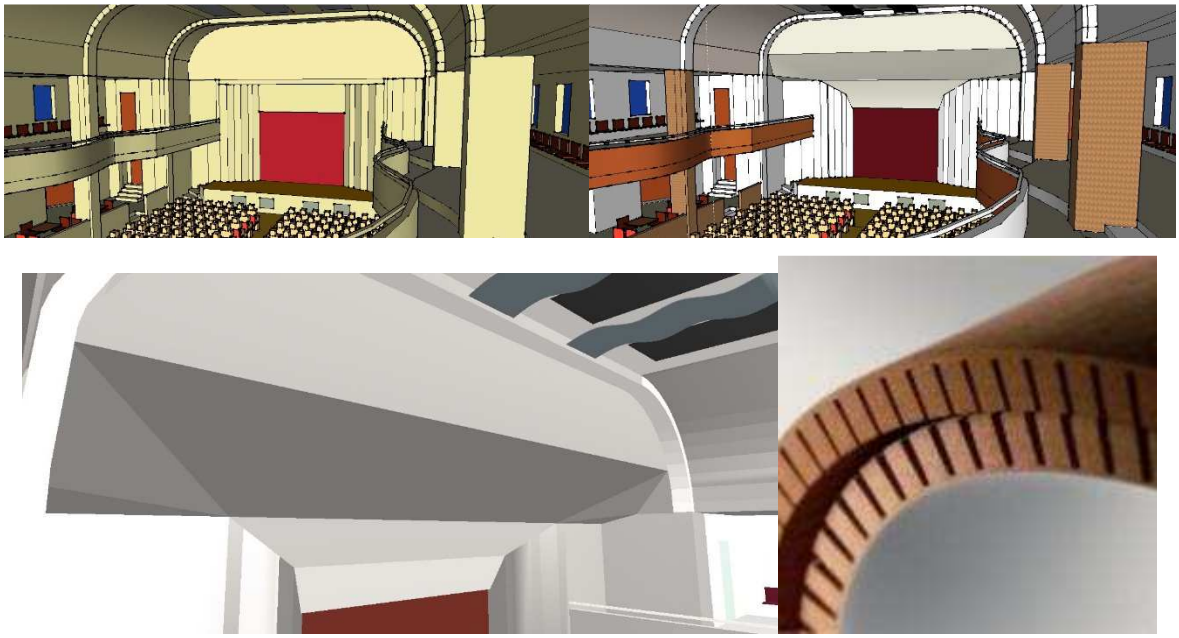
(Celková skladebná tloušťka 200 mm, tím dojde k zarovnání spodní hrany s překladem.)



Graf 25 – Materiál úprava 1 – SG – Gyptone Big Quattro 47_průběh α – vytvořeno podle [18]

ÚPRAVA č.2

Cílem této úpravy je návrh konstrukce v prostoru nad hledištěm, která bude ideálně odrážet zvuk z hlediště směrem do jeviště, zejména do zadních prostor sálu. Umístění konstrukce a její samotný tvar je patrný z následujícího obrázku. Úpravou došlo k posunutí stropní části čela sálu k 1. stropnímu průvlaku a také ke změně odrazných ploch nad prostorem jeviště.

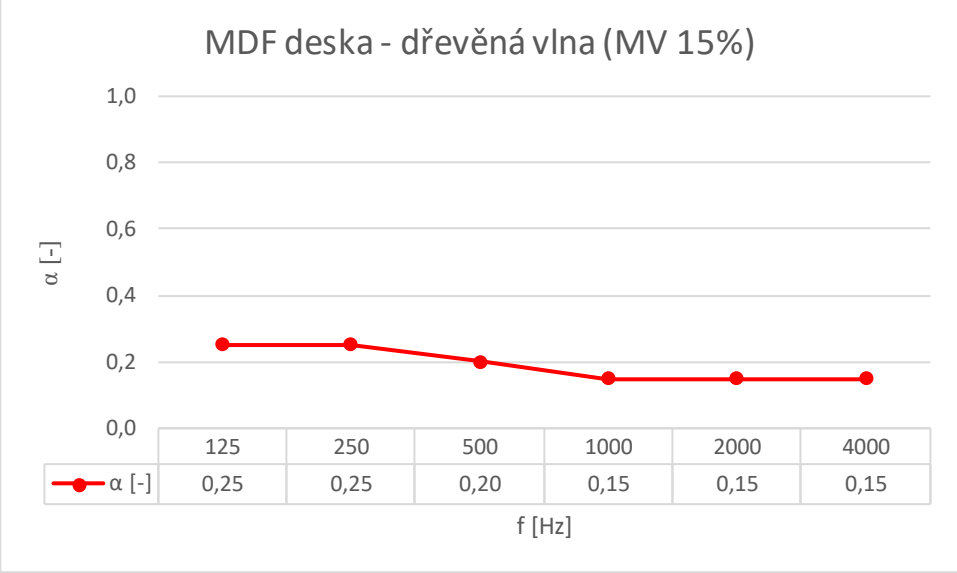


Obr. 38 – Úprava č.2 – SketchUp (před/po), Odeon (detail), použitý materiál [20]

Celková plocha: -56,69 m^2/+61,67 m^2 (údaj odečtený z modelu)

Použitý materiál: Odrazivý materiál - MDF deska (pohledová strana – bílá)

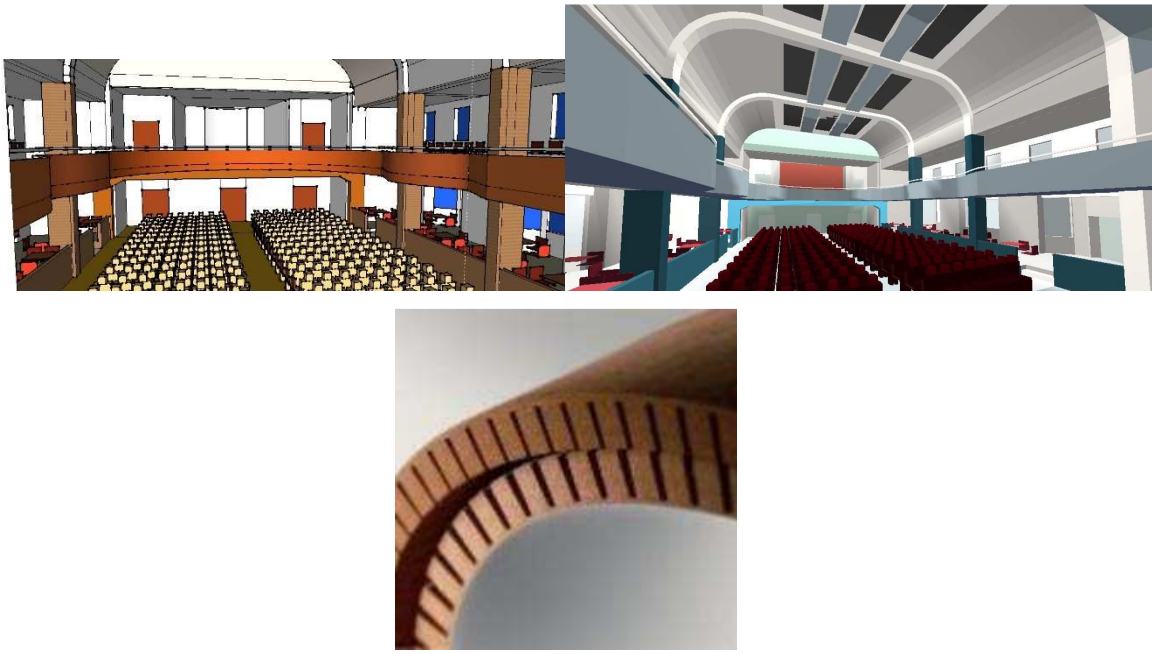
(Celková tloušťka 2x6 mm, nosný rošt 40x68 mm -> celková skladebná tloušťka 80 mm.)



Graf 26 – Materiál úprava 2– MDF deska_průběh α – vytvořeno podle [20]

ÚPRAVA č.3

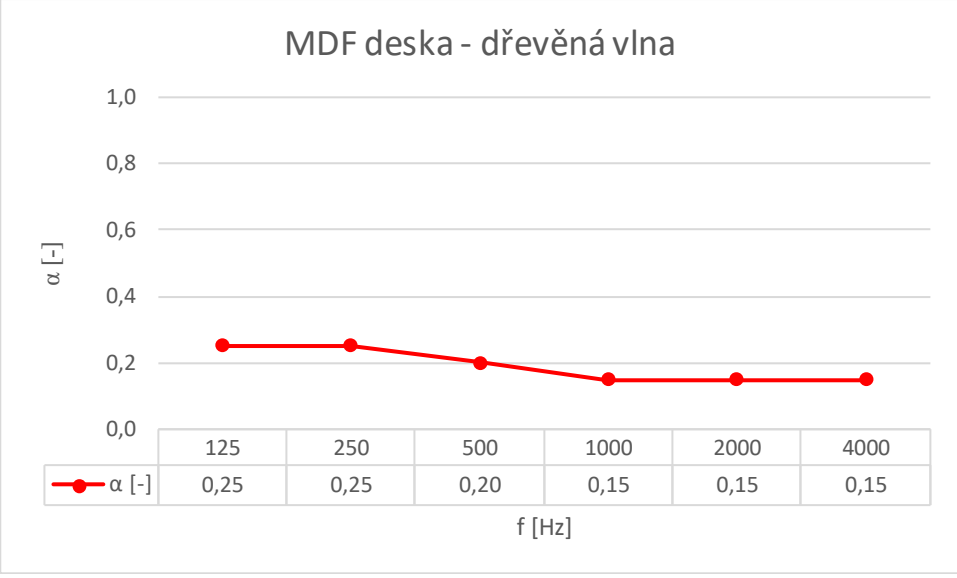
Cílem této úpravy je obložení čelní plochy balkónu. Původní myšlenkou bylo rozčlenit oblast balkónu na více sekcí. Do přední části umístit více odrazné plochy, a do části zadní naopak více pohltivé. Ve finálním návrhu je uplatněna varianta více odrazného materiálu v celé délce a rozdíl v pohltivosti materiálů je uplatněn v rámci dalších úprav popsaných dále v příloze.



Obr. 39 – Úprava č.3 – SketchUp, Odeon, použitý materiál [20]

Celková plocha: 35,60 m^2 (údaj odečtený z modelu)

Použitý materiál: Odrazivý materiál - MDF deska 2x6 mm (pohledová strana – bílá)



Graf 27 – Materiál úprava 3 – MDF deska_průběh α – vytvořeno podle [20]

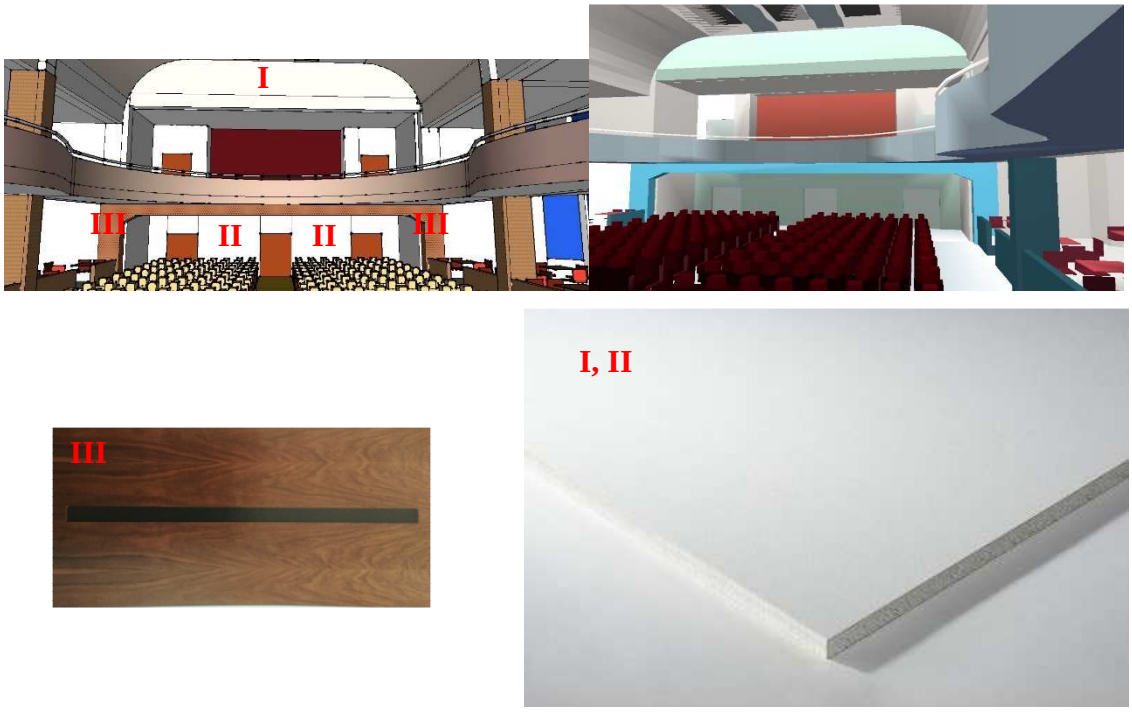
ÚPRAVA č.4

Cílem této úpravy je obložení zadního prostoru sálu více pohltivým materiálem. Samotná úprava je rozčleněna na 3 části (samotné rozdělení vystihuje níže uvedený obrázek):

I – Zadní stěna – stropní část – čelo sálu

II – Zadní stěna – spodní podlaží – prostor kolem dveří

III – Zadní stěna – spodní podlaží – oblast překladu a přilehlé pásy stěn



Obr. 40 - Úprava č.4 – SketchUp , Odeon, použitý materiál [18]

Celková plocha: I+II: (23,35 + 35,17) = 58,52 m^2

III: 21,52 m^2 (údaje odečtené z modelu)

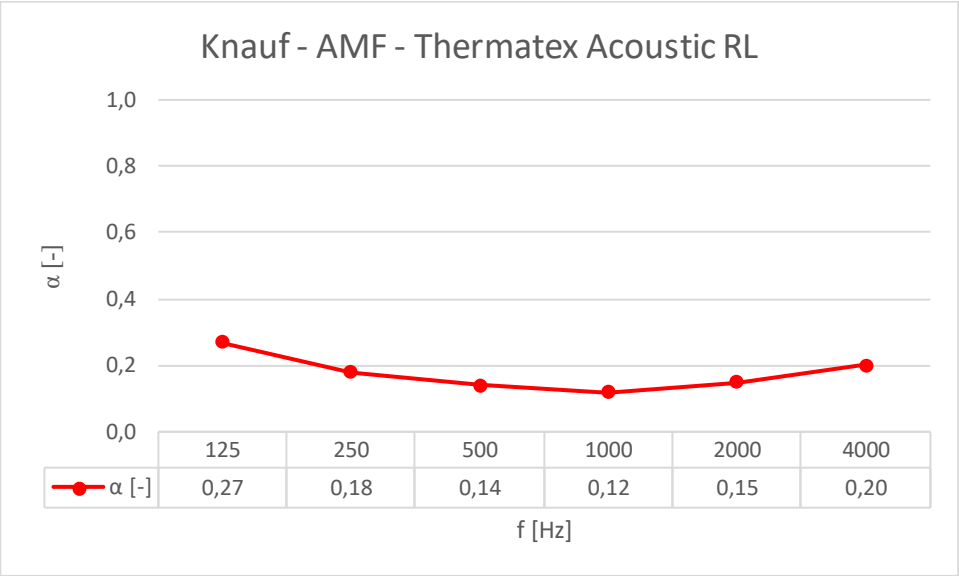
Použitý materiál: I, II: AMF – Thermatex Acoustic RL

(Panely z MV a dalších příměsí - pohledová strana – netkaná akustická textílie s finální úpravou v bílé barvě)

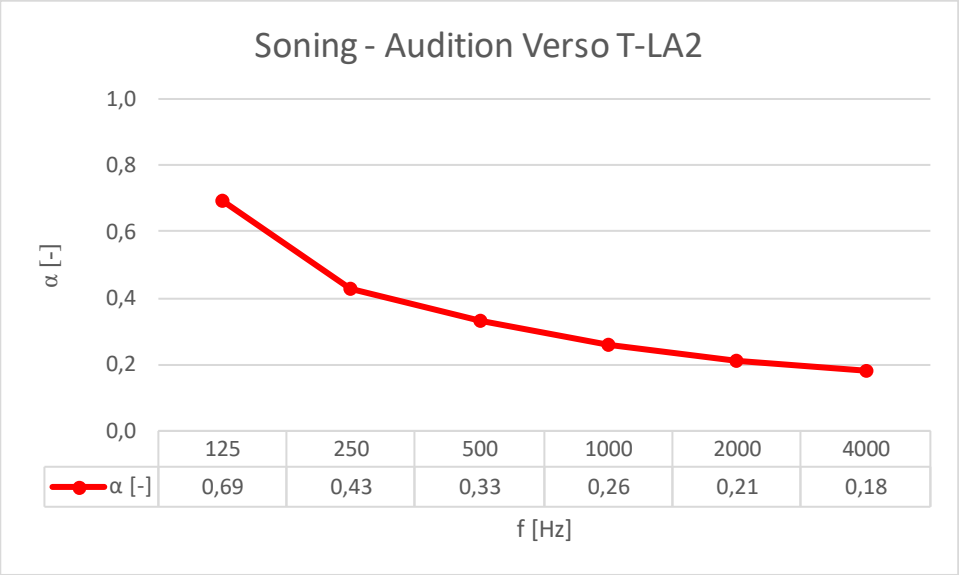
III: Soning – Audition Veso T-LA2

(Absorpční obklad na bázi dřeva s maximem zvukové pohltivosti na nízkých kmitočtech)

(Vzduchová mezera zatlumená MV tl. 40 mm, celková skladebná tloušťka je 100 mm.)



Graf 28 – Materiál úprava 4–I,II – MDF deska_průběh α – vytvořeno podle [18]



Graf 29– Materiál úprava 4–III – MDF deska_průběh α – vytvořeno podle [18]

ÚPRAVA č.5

Cílem této úpravy je obložení prvků, v hlavním prostoru hlediště v sálu, pohltivým materiálem. Samotná úprava je rozčleněna na 3 části (samotné rozdělení vystihuje níže uvedený obrázek): I, II – Obložení sloupů – dolní podlaží (I), horní podlaží (II)

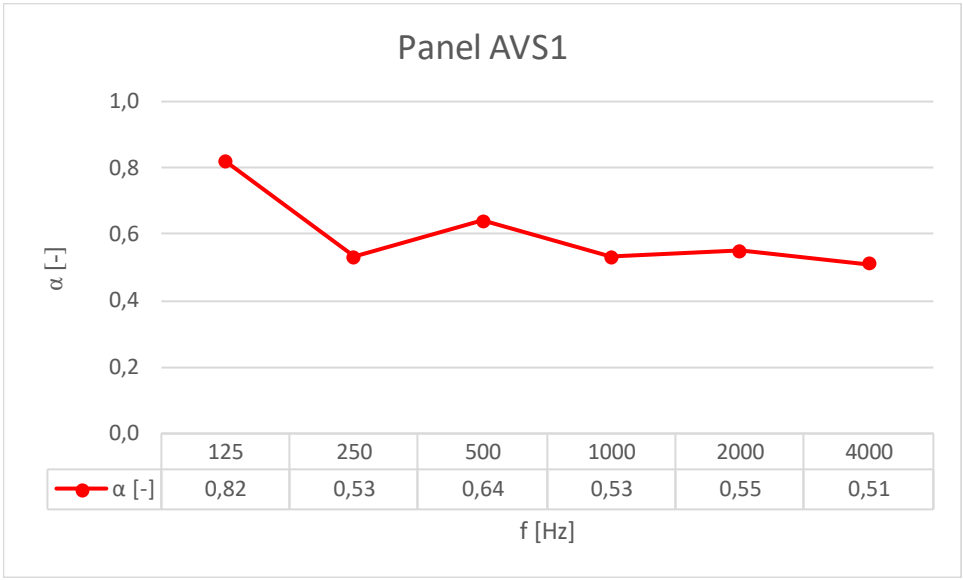
III – Obložení čelního povrchu mezistěny – sál/přísálí

Obr. 41 - Úprava č.5 – SketchUp , Odeon, použitý materiál [34]

Celková plocha: I+II+III: (29,90+27,51+32,63) = 90,04 m^2 (údaje odečtené z modelu)

Použitý materiál: AVS obkladový panel 32/3 (tl.19 mm)

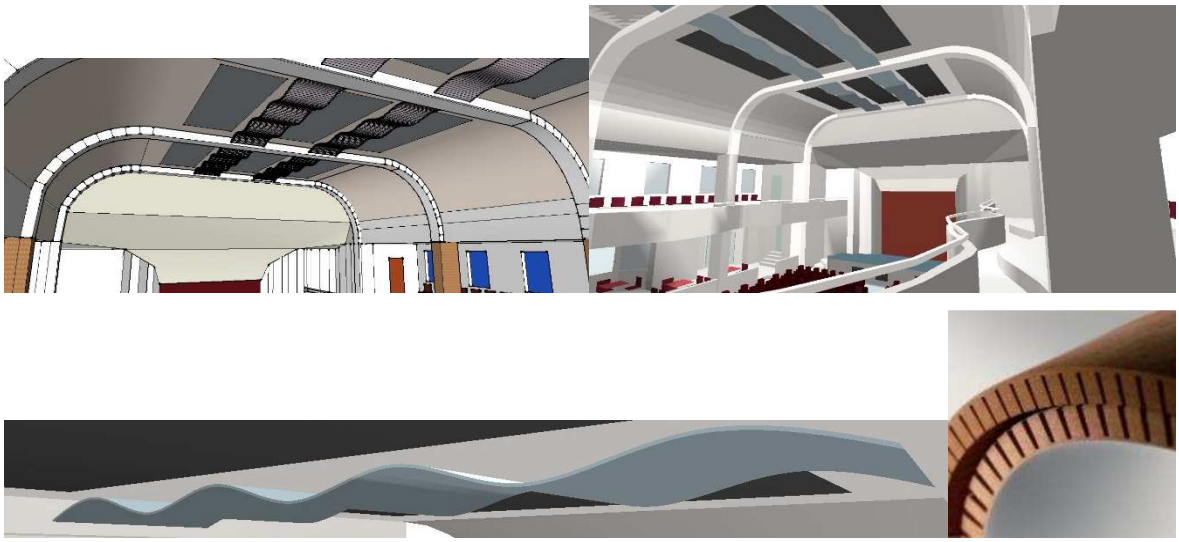
(Materiál vyroben z MDF desky z obou stran opatřený pohledovou dýhou. Děrování navrženo na základě požadavku na pohltivost α.)



Graf 30 - Materiál úprava 5 – Panel AVS1_průběh α – vytvořeno podle [34]

ÚPRAVA č.6

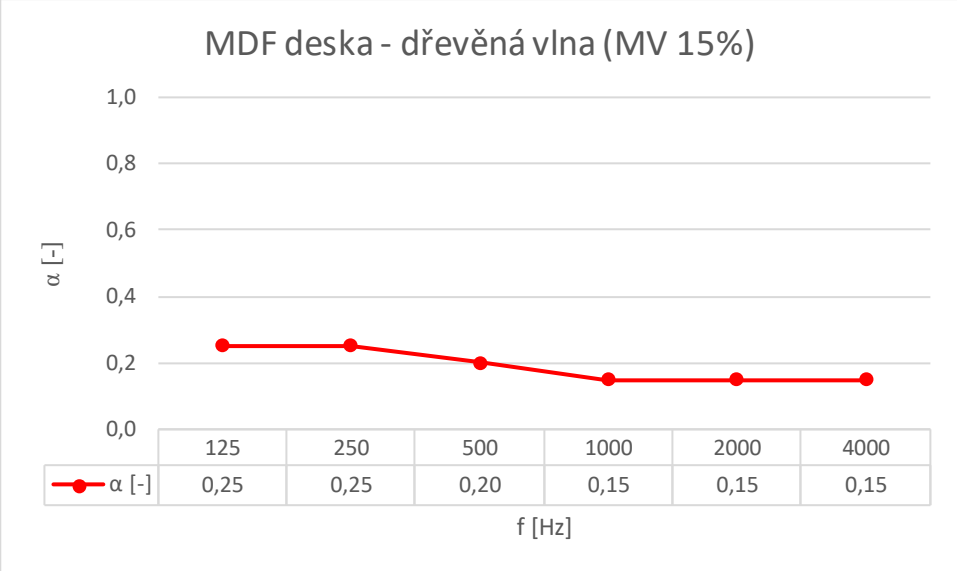
Cílem této úpravy je prostor stropu, kde je snaha o zlepšení lepší odraznosti a směrovosti zvuku vůči hledišti. Vzhledem k tomu, že podstatnou plochu tvoří vzduchotechnické vyústění a osvětlení sálu, je prostor ze značné míry omezen. Přes toto omezení jsou na strop instalovány vlnové prvky z MDF desky s povrchovou úpravou, které jsou na stropě zavěšené do prostoru. Zavěšení a tvar musí počítat s tím, aby nestínil prvkům VZT a především osvětlení (samotná instalace je uvedena na obrázku níže).



Obr. 42 - Úprava č.6 – SketchUp, Odeon, detail vlny, použitý materiál [20]

Celková plocha: 31,21 m^2 (údaje odečtené z modelu)

Použitý materiál: Odrazivý materiál - MDF deska 2x6 mm (pohledová strana – bílá)



Graf 31 - Materiál úprava 6 – MDF deska_průběh α – vytvořeno podle [18][20]

Poznámky