

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky



Bakalářská práce

Akustické úpravy prostoru menších rozměrů

Acoustic Treatment of Smaller Spaces

Květen 2018

Vypracoval: Vojtěch Horný

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horný** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **457075**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akustické úpravy prostoru menších rozměrů

Název bakalářské práce anglicky:

Acoustic Treatment of Smaller Spaces

Pokyny pro vypracování:

Provedte rozbor úprav akustiky prostoru se zaměřením na místnosti menších rozměrů, porovnejte se sabinovskými prostory. Na základě výsledků akustického měření vypracujte projekt akustických úprav prostoru s použitím prvků dostupných na současném trhu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/Aifa 1980
- [2] Kuttruff, H.: Room Acoustics, Spon Press, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 25. května 2018

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Dr. Ing. Husníkovi za odborné vedení práce a cenné rady. Dále děkuji panu Ing. Tomášovi Hrádkovi za konzultace a poskytnuté materiály, které mi velmi pomohly v praktické části této práce.

Abstrakt

Předmětem této práce je seznámení se s akustickými prvky a provedení průzkumu trhu. V následující části je provedeno měření a následně vypracován teoretický návrh akustických úprav kanceláří AppAgent.

Klíčová slova: prostorová akustika, doba dozvuku, člen zvukové pohltivosti

Abstract

The thesis begins with an introduction to acoustic elements and market research. The following section deals with measuring acoustic parameters and developing a theoretical design of acoustic modifications to AppAgent offices.

Keywords: room acoustics, reverberation time, sound absorption coefficient

Obsah

Úvod	8
1. Prostorová akustika	9
1.1 Geometrická akustika	9
1.2 Vlnová akustika	10
1.3 Statistická akustika	11
1.3.1 Doba dozvuku	12
1.3.2 Doba dozvuku podle Sabina	13
1.3.3 Doba dozvuku podle Eyringa	13
1.3.4 Doba dozvuku podle Millingtona	13
2. Pohlcování akustické energie	14
2.1 Akustické obklady z porézních materiálů	14
2.2 Kmitající membrány a desky	14
2.3 Dutinové rezonátory	15
2.4 Difuzory	16
3. Používané materiály	17
3.1 Akustické pěny, molitany a fólie	17
3.1.1 Mappysil Piramidele	17
3.1.2 Moritz AE	18
3.2 Pohlcovače potažené tkaninou	19
3.2.1 Rockfon Contour	20
3.2.2 Akustický obraz VARIO	21
3.2.3 Akustické rolety VARIO	22
3.2.4 Japonská stěna VARIO	23
3.3 Děrované desky	24
3.3.1 Knauf Cleaneo Akustic	24
3.3.2 SON-OR	25
3.3.3 Gyptone BIG Quattro 47	26
3.4 Nízkofrekvenční pohlcovače	27
3.4.1 Audition VERSO T-LA1	27
3.4.2 Audition VOLUME T-LA1	28
4. Parametry pro hodnocení akustiky	29
4.1 Míra hlubokých tónů BR (Bass Ratio)	29
4.2 Míra vysokých tónů HFR (High Frequency Ratio)	29

4.3 Míra přímého zvuku C7	30
4.4 Míra zřetelnosti C50	30
4.5 Míra jasnosti C80	30
4.6 STI (Speech Transmission Index)	31
5. Měření a akustická úprava kanceláří AppAgent.....	32
5.1. Popis měřené místnosti	32
5.2. Měření doby dozvuku.....	33
5.2.1 Výsledek měření doby dozvuku pro zasedací místnost	33
5.2.2. Výsledek měření doby dozvuku pro openspace.....	35
5.3 Měření srozumitelnosti.....	37
5.3.1 Výsledek měření srozumitelnosti v zasedací místnosti	38
5.3.2 Výsledek měření srozumitelnosti pro openspace.....	39
5.4 Teoretický návrh akustických úprav	39
5.4.1 Akustická úprava zasedací místnosti.....	40
5.4.2 Akustická úprava openspace.....	41
5.4.3 Teoretický výpočet doby dozvuku.....	42
5.5 Porovnání s aplikovaným návrhem a zhodnocení výsledků	44
Závěr.....	45
Zdroje.....	46

Úvod

Tato práce se zabývá akustickou úpravou malých prostor, konkrétně se věnuje akustické úpravě kanceláří. Cílem práce je nejprve porozumět samotnému problému, změřit základní akustické parametry a z dostupných údajů navrhnout komplexní řešení daných prostor. Jedná se pouze o teoretický návrh, jelikož zkoumané prostory již byly akusticky upraveny.

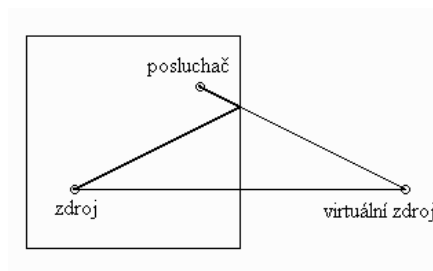
Problematika akustiky v kancelářích je důležitá z hlediska efektivity práce. V akusticky pohodlném prostředí má zaměstnanec lepší pracovní podmínky a je schopen dlouhodobě podávat lepší pracovní výkony z důvodu vyššího soustředění a psychické pohody.

1. Prostorová akustika

Prostorová akustika se zabývá šířením zvuku v uzavřeném prostoru. Jejím hlavním cílem je upravit prostor tak, aby akustická kvalita vyhovovala nárokům posluchače. Tyto nároky se značně liší podle účelu dané místnosti. Například u přednáškové místnosti se klade důraz na srozumitelnost mluveného projevu, ve výrobní hale je prioritou snížení hluku, který vzniká při výrobních procesech. Pro akustickou úpravu daného prostoru slouží několik typů prvků. Pro pohlcení akustické energie se používají akustické obklady, které jsou tvořeny porézními materiály. Tyto obklady pohlcují poměrně široké pásmo kmitočtů. V případě, kdy je potřeba potlačit úzké kmitočtové pásmo, se častěji používají obklady založené na principu rezonance. Pro rozptyl akustické energie do prostoru slouží difuzní prvky, které mají za úkol vytvořit tzv. difuzní pole. Analýzu akustiky prostoru lze získat více metodami, které se vzájemně liší specifickým využitím a složitostí výpočtu. Základními metodami analýzy jsou geometrická akustika, vlnová akustika a statistická akustika.[1].

1.1 Geometrická akustika

Geometrická akustika využívá hned několika předpokladů. V první řadě se předpokládá velmi malá vlnová délka vůči překážce. Díky tomu nastává nulový ohyb zvuku při dopadu na překážku a dochází k odrazu. Základní prvkem je podobně jako v optice zvukový paprsek, pro který platí zákon, že úhel dopadu se rovná úhlu odrazu. Dalším zjednodušením v geometrické akustice je zanedbání fáze při interferenci, sčítá se pouze amplituda. V praxi ovšem povrch není dokonale rovný a má i určitou drsnost. V případě, že se velikost nerovností blíží velikosti vlnové délky, dochází k náhodným rozptylům. [1]



Obrázek č. 1 Odražený paprsek od rovné stěny

1.2 Vlnová akustika

Vlnová akustika popisuje vlastnosti akustického pole velmi obecně. Vychází z fyzikální podstaty šíření vlnění v látkách. V praxi se používá pouze pro výpočet pravouhlých prostor tvaru kvádrů. Pro reálné prostory je výpočet velice obtížný. Užívá se zejména pro výpočet vlastních kmitů prostoru. V případě, kdy je v místnosti umístěn zdroj zvuku, se frekvence rovnající se vlastním kmitům sečtou, neboli dojde k rezonanci. Hlavním úkolem při zajištění dobrého přenosu zvuku je zajistit co největší množství vlastních kmitů ve slyšitelném pásmu. Z následující rovnice je patrné, že vlastní kmitů jsou závislé na rozměrech místnosti. [1]

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

kde c rychlost šíření ve vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

l_x, l_y, l_z rozměry uvažovaného prostoru [m]

n_x, n_y, n_z celá čísla 0, 1, 2...

V oblasti nízkých frekvencí je počet vlastních kmitů nízký a tyto kmitů jsou nerovnoměrně rozloženy. Proto se uvádí kritický kmitočet, od kterého se vytváří akustické pole s rovnoměrným rozložením, pro který platí vztah: [1]

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

kde T průměrná doba dozvuku [s]

V objem místnosti [m^3]

Pro výpočet celkového počtu vlastních kmitů platí vztah:

$$N = \frac{3\pi V}{4c^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c^2} f^2 + \frac{L}{8c} f \quad [-] \quad (4)$$

kde	S	celková plocha stěn [m ²]
	L	celková délka hran pravoúhlého prostoru [m]
	V	objem prostoru [m ³]
	f	frekvence [Hz]
	c	rychlost zvuku ve vzduchu [m.s ⁻¹]

Z hlediska vlastních kmitů a jejich rozložení se volí poměr mezi rozměry délka: šířka:výška v pravoúhlém prostoru pro malá studia zhruba 2,5 : 1,5 : 1 a pro velká studia 3 : 2 : 1. [1]

1.3 Statistická akustika

Statistická akustika je v praxi nejpoužívanější metodou. Používá se pouze pro výpočet uzavřených prostor, jelikož se počítá s četnými odrazy od stěn. Aby bylo možné tuto metodu použít, je nutné zavést následující předpoklady:

- 1) Hustota zvukové energie je ve všech bodech stejná.
- 2) Velikost zvukové energie v libovolném bodě uzavřeného prostoru je dána součtem hodnot energie, která do prostoru dospěla vlivem odrazů od stěn.
- 3) Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností. [1]

V případě že zvuková energie dopadne na stěnu, část energie se pohltí a část odrazí zpět. Schopnost materiálu pohlcovat akustickou energii je vyjádřena pomocí činitele zvukové pohltivosti:

$$\alpha = \frac{E_p}{E_o} \quad [-] \quad (3)$$

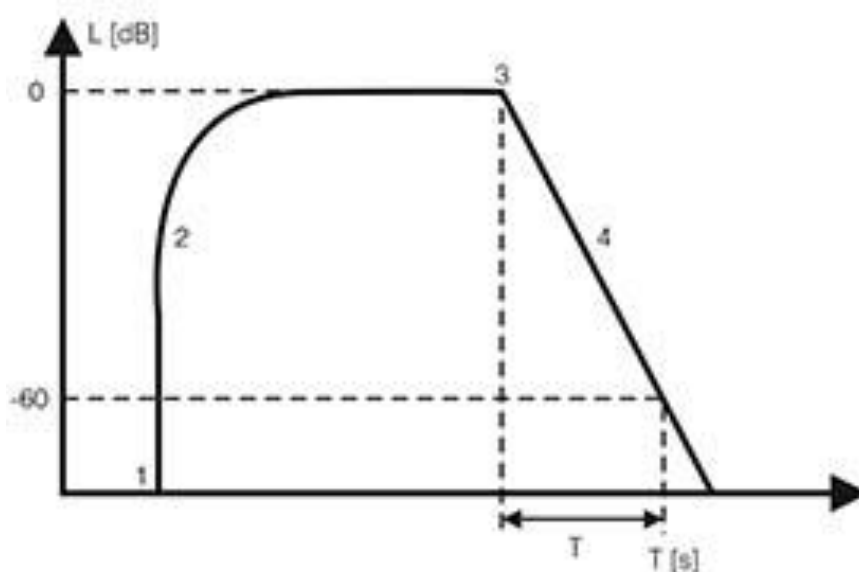
kde E_p pohlcená energie [J]

E_o odražená energie [J]

Ze vztahu vyplývá, že α je bezrozměrné číslo, které může nabývat hodnot od 0 do 1.[1]

1.3.1 Doba dozvuku

Hlavním parametrem, který se měří ve statistické akustice je doba dozvuku. Je to doba, za kterou v uzavřené místnosti dojde poklesu akustického tlaku o 60 dB od okamžiku vypnutí zdroje zvuku - viz obr.2. Pro výpočet lze použít několik vztahů, u kterých se použitelnost liší podle typu daného prostoru [1].



Obrázek č.2 Grafické vyjádření doby dozvuku [10]

1.3.2 Doba dozvuku podle Sabina

Následující vztah se používá pro prostory z materiálů s nízkým činitelem zvukové pohltivosti. Ve více tlumených prostorách použít nelze, jelikož vzniká chyba. [1]

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

kde	V	objem místnosti [m^3]
	α	činitel zvukové pohltivosti [-]
	S	plocha místnosti [m^2]

1.3.3 Doba dozvuku podle Eyringa

Eyring na rozdíl od Sabina předpokládal, že se energie po odrazu místo plynulého útlumu skokově zeslabí. Jeho vztah je vhodné použít pro hodnoty činitele zvukové pohltivosti přibližně do $\alpha = 0,8$. [1]

$$T_e = 0,164 \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad [\text{s}] \quad (6)$$

1.3.4 Doba dozvuku podle Millingtona

Tento vzorec se používá pro hodnoty činitele zvukové pohltivosti $\alpha > 0,8$, jelikož se ukázalo, že Eyringův vzorec pro tyto hodnoty není dostatečný. Tento výpočet je nejpřesnější, ale také početně nejnáročnější. V praxi však tento výpočet není příliš používaný, protože prostorů s tak vysokým činitelem zvukové pohltivosti není mnoho. [1]

$$T_e = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad [\text{s}] \quad (7)$$

kde S_i a α_i jsou parametry stěny i .

2. Pohlcování akustické energie

Při pohlcování akustické energie dochází k přeměně akustické energie na energii jinou, nejčastěji tepelnou. Používají se k tomu speciální akustické prvky, které přeměňují energii pomocí tření, poklesu akustického tlaku nebo nepružné deformace těles. [1]

2.1 Akustické obklady z porézních materiálů

Nejpoužívanějším a nejdostupnějším akustickým prvkem jsou obklady z porézních materiálů. Kostra těchto materiálů je tvořena z vláken nebo ztuhlé pěny. Póry jsou vzájemně propojené, kvůli lepšímu šíření zvuku v materiálu. Energie se přeměňuje pomocí tření mezi vrstvami vzduchu. Tyto obklady mají pevně určený činitel zvukové pohltivosti a hodí se pro pohlcování středních a vysokých kmitočtů. Zlepšení pohltivosti lze dosáhnout tzv. vzduchovým polštářem, kdy se porézní materiál neupevní přímo na stěnu, ale několik centimetrů se odsadí. [1]

2.2 Kmitající membrány a desky

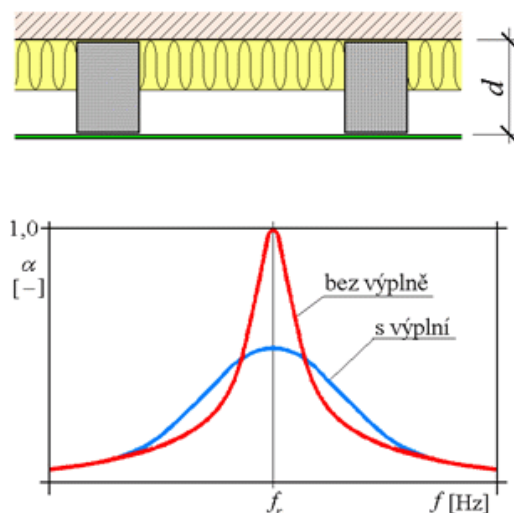
Kmitající membrána pracuje na rezonančním principu přeměny energie, kde se akustická energie přemění na energii mechanickou, která rozkmitá membránu. Tato membrána je tlumena a dochází k přeměně na energii tepelnou. Kmitající membrána nebo deska je uchycena v určité vzdálenosti od stěny. Tato konstrukce potlačuje, jak už bylo zmíněno v úvodu, jen úzké pásmo kmitočtů, které se nachází v okolí rezonančního kmitočtu f_r . Ten se spočte podle následující rovnice: [1], [4]

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{Md}} \text{ [Hz]} \quad (8)$$

kde M plošná hmotnost [kg.m⁻²]

d vzduchová mezera [m]

Ze vzorce je patrné, že zvyšováním tloušťky vzduchové mezery a plošné hmotnosti membrány se snižuje rezonanční kmitočet. Proto se kmitající desky a membrány používají pro útlum nízkých kmitočtů. Vzniklý prostor za membránou se často vyplňuje porézním materiálem, který upravuje průběh závislosti činitele pohltivosti na kmitočtu. [4]



Obrázek č.3 Konstrukce pohlcovače typu kmitající membrána a průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti [4]

2.3 Dutinové rezonátory

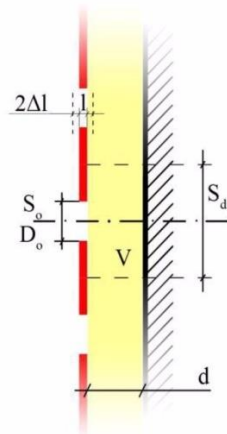
Stejně jako kmitající membrána i dutinový rezonátor pracuje na principu rezonance. Je tvořen děrovanou deskou uchycenou v určité vzdálenosti od stěny. Principiálně se od prvku fungujícího na principu kmitající membrány liší tím, že místo membrány se rozkmitá vzduch v každém otvoru rezonátoru. Pro výpočet rezonančního kmitočtu platí vztah: [1], [4]

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_o}{V(l + 2\Delta l)}} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

kde	S_o	plocha otvoru [m ²]
	c	rychlost zvuku ve vzduchu [m.s ⁻¹]
	V	objem jednoho otvoru dutiny rezonátoru [m ³]

l	délka hrdla rezonátoru [m]
$2\Delta l$	korekce, kterou udává tvar otvoru

Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti je obdobný jako u prvků s kmitající membránou. Proto se také do vzduchové mezery přidává porézní materiál, který udává, jestli bude prvek laděn na úzké nebo široké spektrum. [4]



Obrázek č.4 Dutinový rezonátor v provedení s děrovanou deskou [4]

2.4 Difuzory

Jak již bylo řečeno v úvodu difuzory jsou akustické prvky, které odrážejí a rozptylují zvukovou energii do prostoru, tím vytvářejí difuzní pole. Díky tomu eliminují ozvěny a zvuk zní přirozeněji. Konstrukčně se jedná o plochy, na kterých jsou výstupky různých velikostí a tvarů, které jsou přesně navrženy pro odrážení určitých vlnových délek. Výrobci kladou velký důraz na estetiku, proto je často jako používaným materiálem dřevo.



Obrázek č.5 Difuzor Artnovion Alps [9]

3. Používané materiály

3.1 Akustické pěny, molitany a fólie

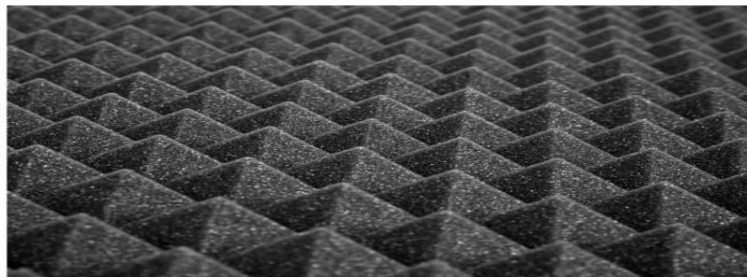
Akustické pěny molitany a fólie představují nejjednodušší a nejlevnější řešení při úpravě prostoru. Jsou velmi lehké a jejich instalace je nenáročná, proto jsou v praxi velmi používané. Hodí pro úpravu mnoha typů místností.

3.1.1 Mappysil Piramidale

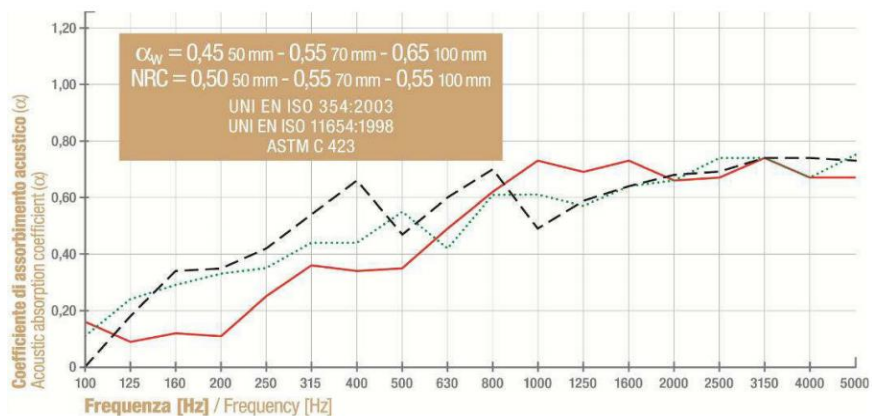
výrobce: Mappy Itallia

materiál: expandovaný polyuretal

hustota: $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Obrázek č.6 Mappysil Piramidale [7]

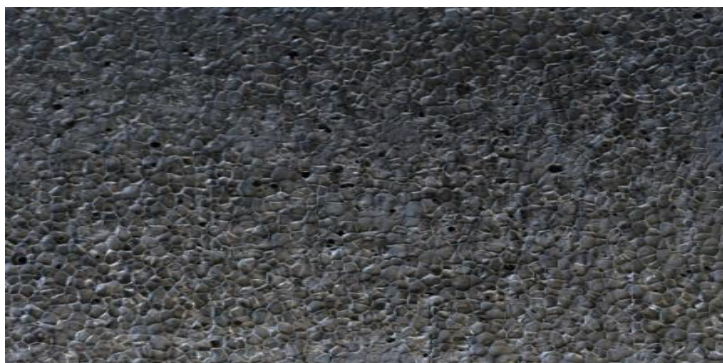


Obrázek č.7 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti, červená čára značí průběh pro tloušťku obkladu 50 mm, zelená 70 mm a černá 100 mm [7]

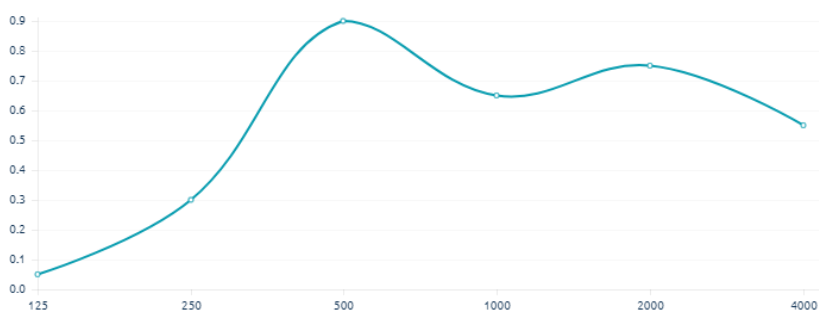
3.1.2 Moritz AE

výrobce: Artnovion

materiál: nehořlavá pěna



Obrázek č.8 Artnovion - Moritz AE [9]



Obrázek č.9 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti [9]

3.1.3 Clipso 705 A

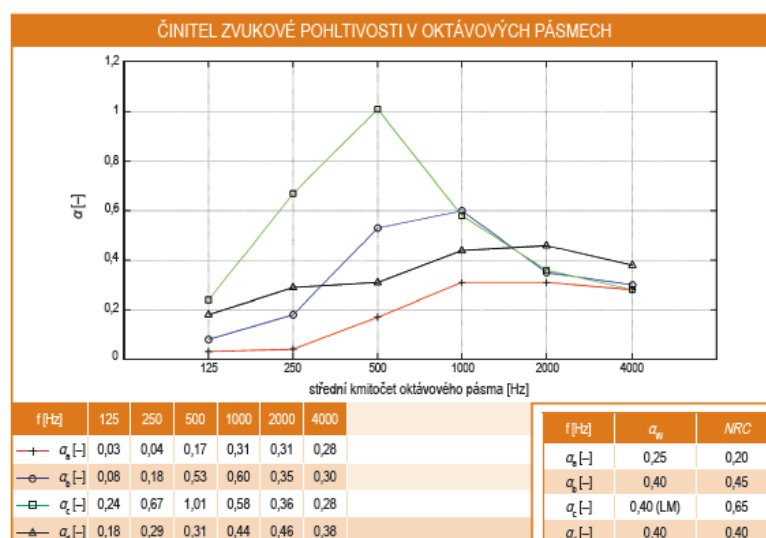
Jedná se o fóliový materiál vyrobený z polyesterového plátna s vrstvou polyuretanu. Fólie jsou opatřeny mikroperforací s 250 000 otvory na m^2 . Perforace není viditelná, tím vzniká dojem celistvého plátna. Na tento materiál může být nanesen potisk podle přání uživatele, proto se hodí do kanceláří a bytů. [2]

výrobce: Clipso Swiss

materiál: polyester s polyuretanem



Obrázek č.10 Clipso 705 A [2]



Obrázek č.11 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti. Jednotlivé křivky se od sebe liší odsazením a zatlumením vzduchové mezery. [2]

3.2 Pohlcovače potažené tkaninou

Používají se v prostorech, kde se klade velký důraz na estetiku. Hodí se do domácností, konferenčních sálů nebo divadel. Také se hojně používají v kancelářích.

3.2.1 Rockfon Contour

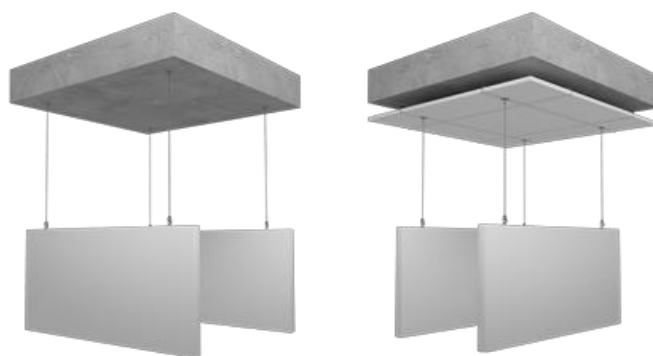
Tento prvek se liší od ostatních doposud zmíněných tím, že se volně zavěsí na strop. Díky tomu pohlcuje zvukovou energii z obou stran.

výrobce: Rockfon

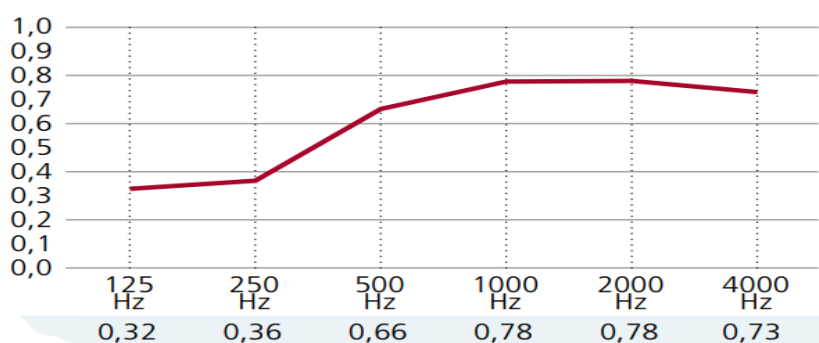
materiál: kamenná vlna pokrytá tkaninou ze skelného vlákna

rozměry: 1200 x 600 x 50 mm

hmotnost panelu: 4,3 kg



Obrázek č.12 Rockfon Contour [8]



Obrázek č.13 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti [8]

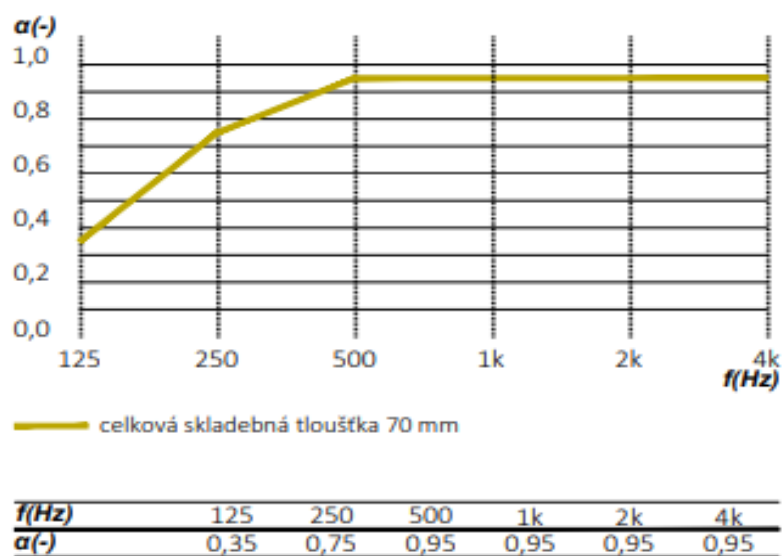
3.2.2 Akustický obraz VARIO

Prvek je zvláštní svým vzhledem. Přestože se jedná o plnohodnotný vysoko absorpční obklad, jeho vzhled lze připodobnit k obrazu nebo banneru. Jeho aplikace se tedy hodí i pro dotvoření interiéru v místnosti.

výrobce: AVETON s.r.o.



Obrázek č.14 Akustický obraz VARIO [3]



Obrázek č.15 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti [3]

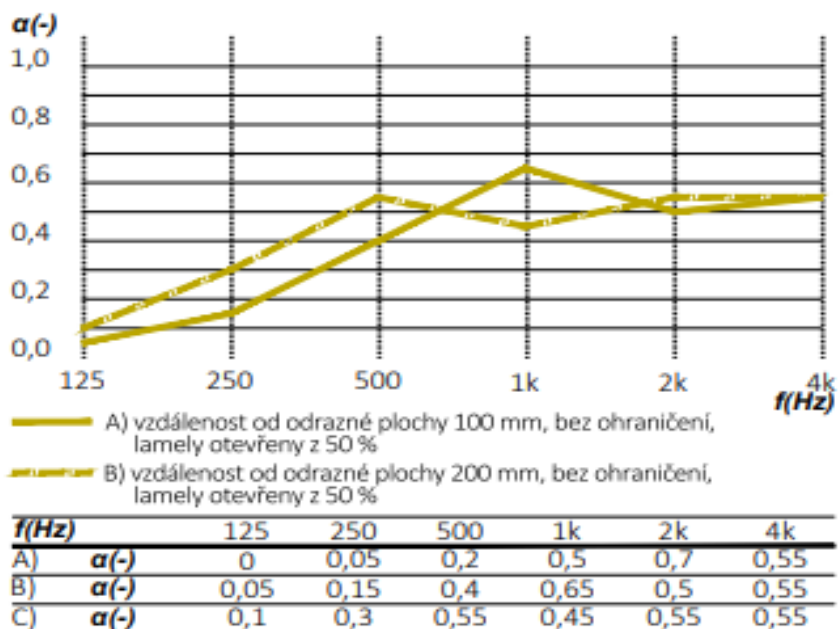
3.2.3 Akustické rolety VARIO

Akustické rolety se nejvíce uplatňují v kancelářích. Použitím tohoto prvku lze dobře zamezit třepotavé ozvěně, jelikož v místech, která jsou hodně prosklená, často nelze umístit akustický obklad.

výrobce: AVETON s.r.o.



Obrázek č.16 Akustické rolety VARIO [3]



Obrázek č.17 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti [3]

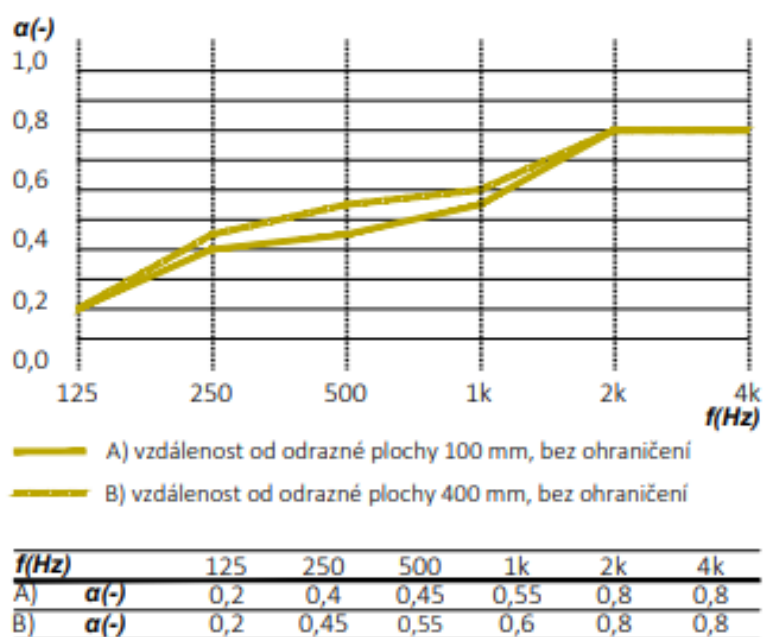
3.2.4 Japonská stěna VARIO

Japonské stěny se používají do volného prostoru. Lze nimi vytvořit novou pohltivou plochu a upravit tak tvar výsledného prostoru. V kancelářích se hojně používají, jelikož zabraňují přeslechům mezi pracovišti.

výrobce: AVETON s.r.o.



Obrázek č.18 Japonská stěna VARIO [3]



Obrázek č.19 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti [3]

3.3 Děrované desky

Jak již bylo zmíněno, děrované desky pracují na principu rezonance. Jejich konstrukce se hodí pro použití ve velkých prostorech, jako jsou obchodní centra, kanceláře nebo nemocnice. Tyto desky se upevňují převážně na strop.

3.3.1 Knauf Cleaneo Akustic

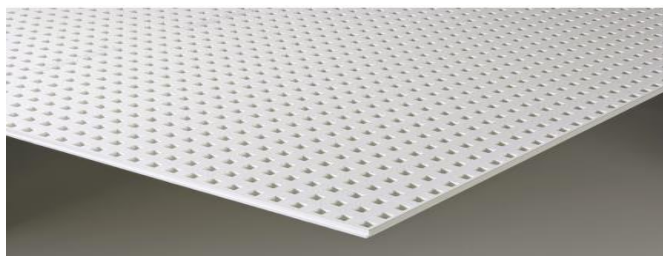
Desky mají dobré akustické vlastnosti a navíc obsahují speciální typ sádry, která rozkládá škodlivé látky ve vzduchu a tím vzduch čistí.

výrobce: Knauf

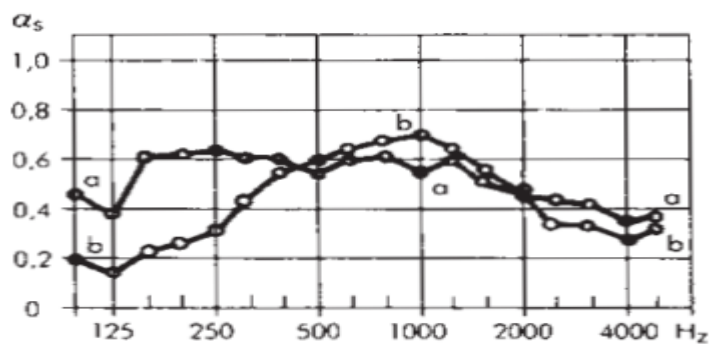
typ: přímé děrování 8/18

materiál: sádrokarton

plošná hmotnost: $45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$



Obrázek č.20 Cleaneo Akustik [5]



Obrázek č.21 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti, křivka a platí pro vzduchovou mezeru 400 mm, křivka b platí pro vzduchovou mezeru 60 mm [5]

3.3.2 SON-OR

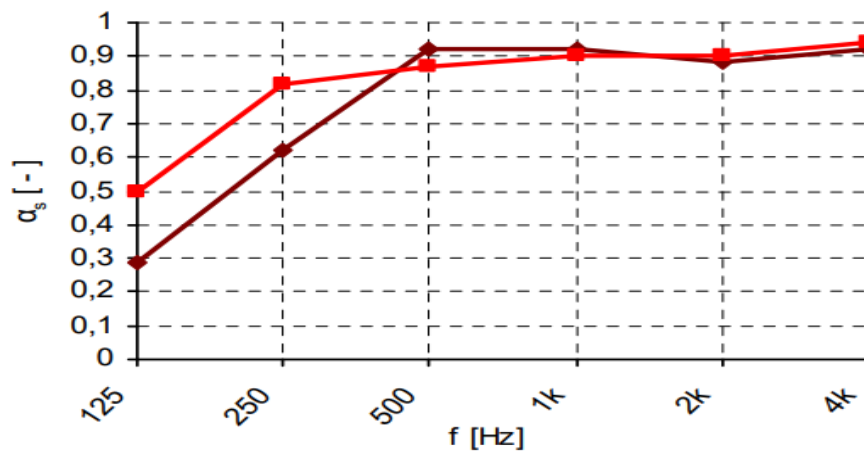
výrobce: SONING Praha, a. s.

materiál: perforovaný ocelový plech lakovaný nebo pozink, akustická pohltivá výplň z minerální vaty s krycí textilií

plošná hmotnost: $7,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$



Obrázek č.22 Akustické kazety SON-OR [6]



Obrázek č.23 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti, tmavě červená křivka značí SON-OR se vzduchovou mezerou 60 mm, světle červená značí SON-OR s doplňkovým absorbérem [6]

3.3.3 Gyptone BIG Quattro 47

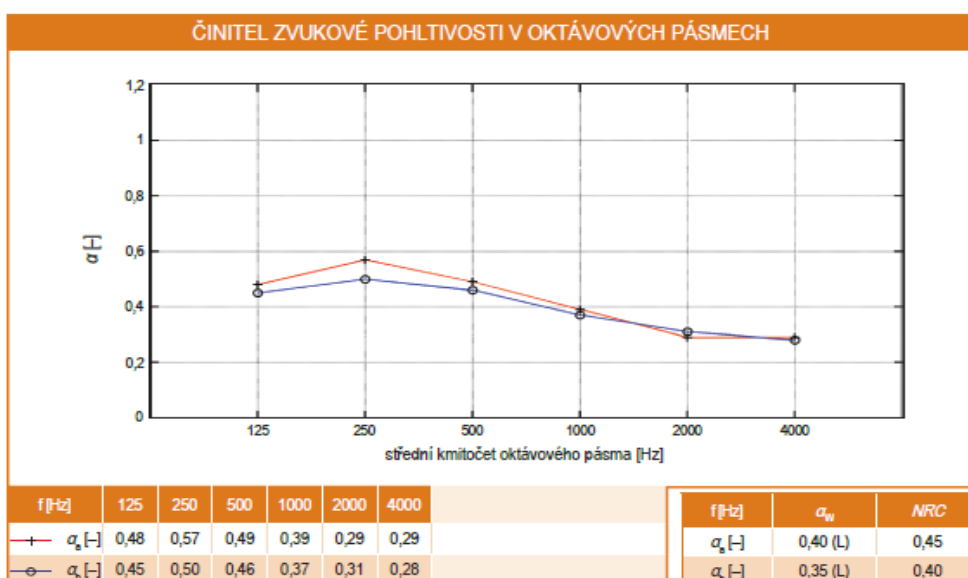
Jedná se o sádkartonové desky, které se zpravidla používají k vytvoření akustického podhledu. Desky se dají aplikovat také na stěny místnosti, a tak lze docílit ještě většího zkrácení doby dozvuku při zachování stejného designu místnosti.

výrobce: Saint-Gobain Construction Products CZ a.s.

materiál: sádkarton



Obrázek č.24 Gyptone BIG Quattro 47 [2]



Obrázek č.25 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti, naměřené křivky se liší pouze ve výšce odsazení a v ztlumení vzduchové mezery plstí [2]

3.4 Nízkofrekvenční pohlcovače

Používají se v akusticky náročnějších prostorech, kde zpravidla dochází k přenosu hudby nebo hluku. Jsou vhodné zejména do studií, koncertních sálů a kinosálů. Pracují na principu kmitající desky a jsou laděny na nízké kmitočty cca 125 Hz. Umísťují se zpravidla do rohů místnosti, jelikož zde mají vysokou účinnost.

3.4.1 Audition VERSO T-LA1

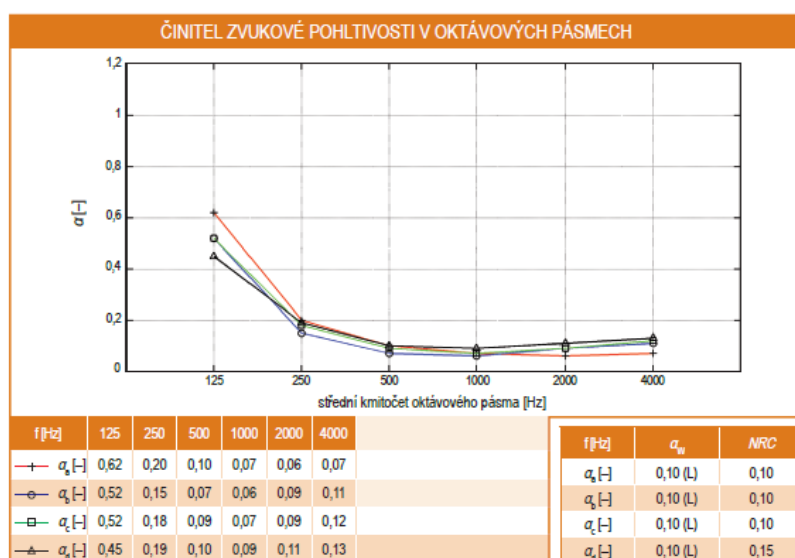
Jedná se o klasický prvek pracující na principu kmitající desky. Tento typ je velmi tenký proto se hodí do prostoru s nedostatkem místa.

výrobce: SONING Praha, a. s.

materiál: dřevo



Obrázek č.26 Audition VERSO T-LA1 [2]



Obrázek č.27 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti, naměřené křivky se liší pouze skladebnou tloušťkou a v ztlumení vzduchové mezery [2]

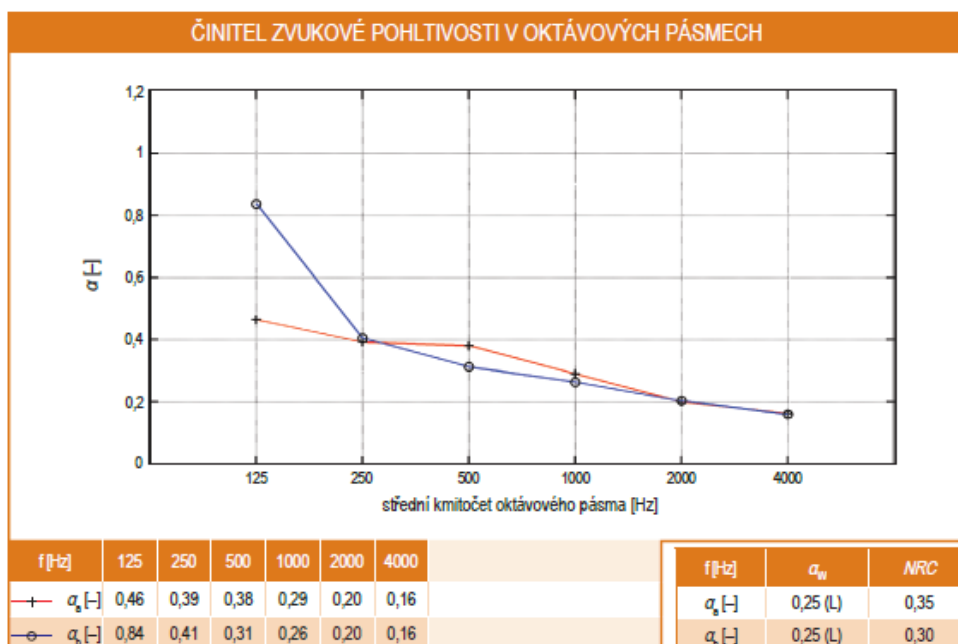
3.4.2 Audition VOLUME T-LA1

výrobce: SONING Praha, a. s.

materiál: dřevo



Obrázek č.28 Audition VOLUME T-LA1 [2]



Obrázek č.29 Průběh závislosti činitele zvukové pohltivosti, naměřené křivky se liší pouze v celkové tloušťce prvku [2]

4. Parametry pro hodnocení akustiky

Kromě doby dozvuku existuje celá řada kritérií, která popisují chování zvuku v prostoru ať už z časového nebo frekvenčního hlediska. Široké spektrum těchto kritérií umožňuje objektivně posoudit charakter prostoru.

4.1 Míra hlubokých tónů BR (Bass Ratio)

Určuje poměr dob dozvuku pro nízkých a středních kmitočtů.

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}} [-] \quad (10)$$

kde	RT_{125}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 125 Hz [s]
	RT_{250}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 250 Hz [s]
	RT_{500}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 500 Hz [s]
	RT_{1000}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 1000 Hz [s]

Celková hodnota BR by se měla blížit od shora k 1, neměla by však klesnout pod tuto hodnotu. [13]

4.2 Míra vysokých tónů HFR (High Frequency Ratio)

Určuje poměr dob dozvuku pro středních a vysokých kmitočtů.

$$HFR = \frac{RT_{500} + RT_{1000}}{RT_{2000} + RT_{4000}} [-] \quad (11)$$

kde	RT_{500}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 500 Hz [s]
	RT_{1000}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 1000 Hz [s]
	RT_{2000}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 2000 Hz [s]
	RT_{4000}	doba dozvuku v oktávovém pásmu 4000 Hz [s]

Celková hodnota HFR by se měla blížit od zdola k 1, neměla by se však od této hodnoty výrazně odchylovat. [13]

4.3 Míra přímého zvuku C_7

Používá se k predikci přímého zdroje zvuku (lokalizace přímého zvuku). Její hodnota je udávána v decibelech a je definována poměrem energií přicházejících do 7 ms k energii od 7 ms.

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7ms} p^2(t) dt}{\int_{7ms}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7} \quad (12)$$

Hodnoty větší než -15 dB připouští dobrou lokalizaci zvuku zdroje. Čím více se hodnota blíží 0 dB, tím přesněji lze zvuk lokalizovat.[13]

4.4 Míra zřetelnosti C_{50}

Používá se jako hodnotící kritérium srozumitelnosti pro řeč. Je definována poměrem energií přicházejících do 50 ms k energii od 50 ms.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \quad (13)$$

Obecně platí, že jakákoli hodnota nad 0 dB v obecné místnosti značí dobrou srozumitelnost. Hodnoty pod -5 dB ukazují, že se jedná o více odraznou místnost, která není vhodná pro přenos mluveného slova. [13]

4.5 Míra jasnosti C_{80}

Akustické kritérium pro hudbu. V současné době představuje zatím nejlepší korelát poslechového atributu „jasnost“ pro časové rozlišení tónů v rychlých hudebních pasážích.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \quad (14)$$

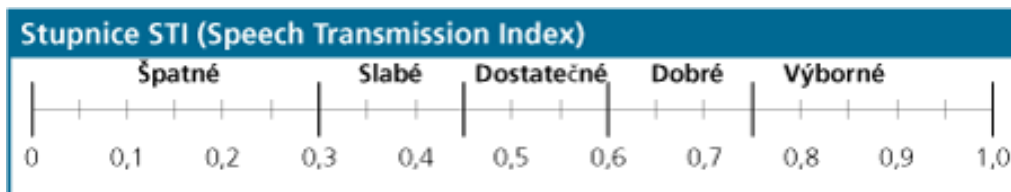
Optimální hodnoty C80 silně záleží na hudebním žánru, obecně lze považovat za optimální hodnoty v rozmezí 1 ± 2 dB.

Rozsahy přípustných hodnot C80 pro jednotlivé hudební žánry:

- 0 ± 2 dB je ideální pro varhanní hudbu nebo dechové nástroje při pomalejším tempu. To je ideální pro sály určené pro varhanní recitály.
- 2 ± 2 dB je ideální pro smyčcové nástroje a nejlépe je prezentována v sálech určených pro instrumentální hudbu, tempo hudby je rychlejší. To je také vhodné pro sborový zpěv.
- 4 ± 2 dB je ideální pro drnkací a trsací nástroje, tempo hudby je rychlejší. Je vhodná pro folkovou a lehkou populární hudbu.
- 6 ± 2 dB je ideální pro hudbu nástrojů s perkusním průběhem, rock and roll a současnou moderní hudbu.
- Hodnota 8 dB a více by neměla být překročena v žádném místě.[13]

4.6 STI (Speech Transmission Index)

Pomocí parametru STI se určuje srozumitelnost mluveného slova. Parametr zahrnuje aspekty vyplývající jak z měření poměru signálu k šumu, tak z impulsové odezvy prostoru. Ke stanovení zkreslení přenášené řeči v místnosti je použit testovací signál ve spektrální šířce sedmi oktávových pásem od 125 Hz až do 8 kHz. Je modulován sinusovým signálem (je zavedeno 14 modulačních frekvencí v rozsahu 0,4 až 15 Hz). Frekvence odpovídají průměrné rychlosti lidské řeči. Signál je vysílán do měřeného prostoru a do měřicího mikrofonu vstupuje zkreslený. Zkreslení je ovlivněno impulsovou odezvou a aditivním šumem v měřeném prostoru. Hodnoty STI nabývají hodnot 0-1.



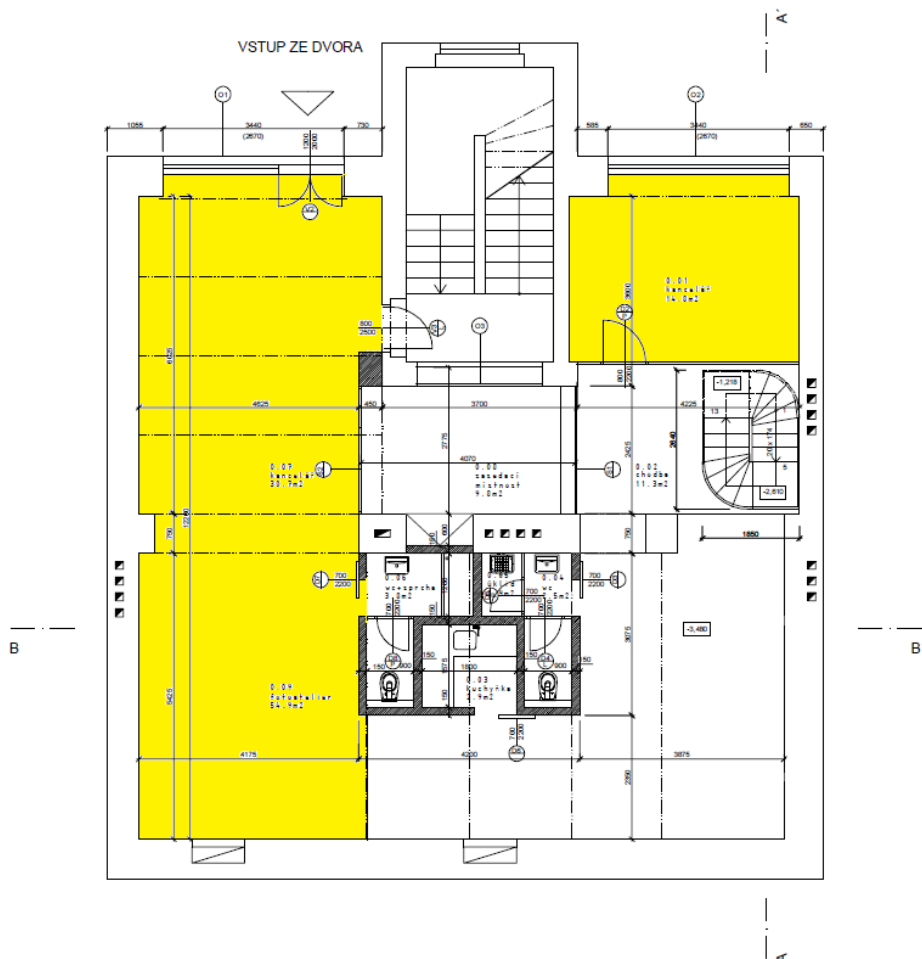
Obrázek č.30 - Přiřazení hodnocení srozumitelnosti na základě parametru STI

5. Měření a akustická úprava kanceláří AppAgent

V následující kapitole je popsána praktická část této práce. Jedná se o měření srozumitelnosti řeči a doby dozvuku, které bylo provedeno po akustické úpravě daného prostoru. Následuje akustický teoretický návrh prostoru a porovnání s návrhem, který byl již uplatněn.

5.1. Popis měřené místnosti

Jedná se o kanceláře společnosti AppAgent, konkrétně o openspace a zasedací místnost. Oba prostory jsou vyznačeny na následujícím výkresu.



Obrázek č.31 Půdorys kanceláří - žlutě je vyznačen prostor pro akustickou úpravu

Uvnitř obou místností se nachází klasický kancelářský nábytek. Co se týče velikosti místností openspace má objem zhruba 150 m^3 a zasedací místnost $40,5 \text{ m}^3$.

5.2. Měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 3382-1. Jako měřicí signál byl použit výstřel ze startovací pistole, který má impulsní charakter. Impulsová odezva místnosti byla zachycena měřicím mikrofonom a vyhodnocena analyzátozem zvuku. Měření v obou místnostech bylo provedeno v osmi různých vzájemných místech polohy zdroje zvuku a měřicího mikrofону. Výška zdroje zvuku byla 150 cm nad podlahou a výška měřicího mikrofónu 120 cm nad podlahou. Následně bylo toto měření vyhodnoceno v oktávových pásmech v rozsahu 125 Hz až 4 kHz, jak ukládá norma ČSN 73 0525. Doba dozvuku T_{20} byla stanovena z dozvukové křivky od -5 dB do -25 dB. Výsledné hodnoty byly stanoveny jako průměrné hodnoty získané z jednotlivých míst v každé místnosti.

Měřicí aparatura:

Zvukoměr NTi audio XL2 - SN 07300215

Mikrofon NTi audio MA220 - SN 3208

Kalibrační zařízení:

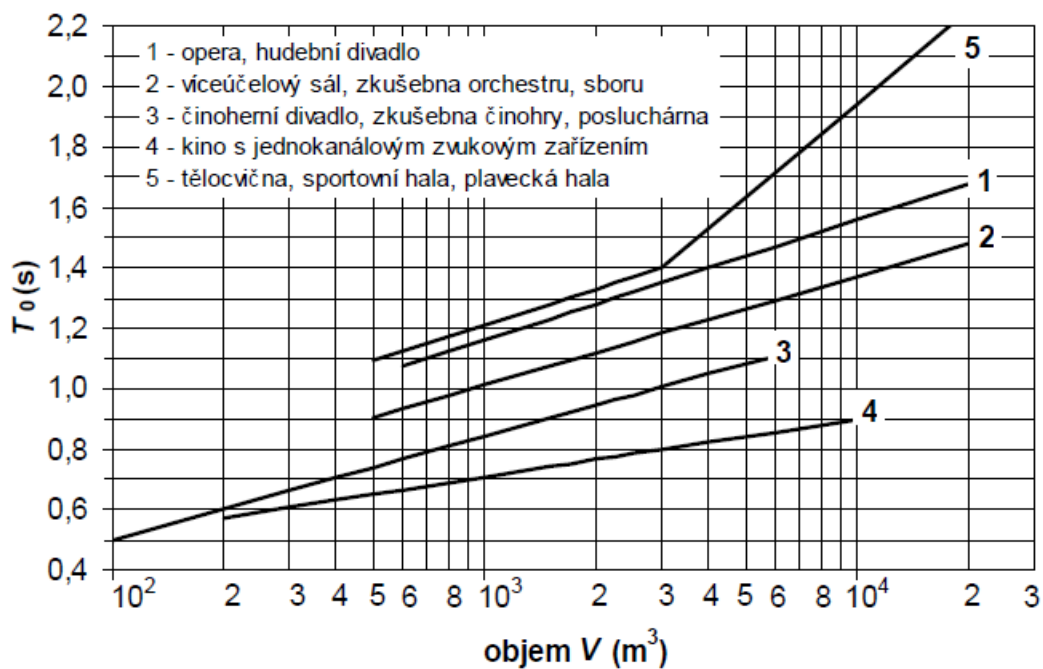
Kalibrátor NTi audio Larson Davis CAL200 - SN 10692

Zdroj měřeného signálu:

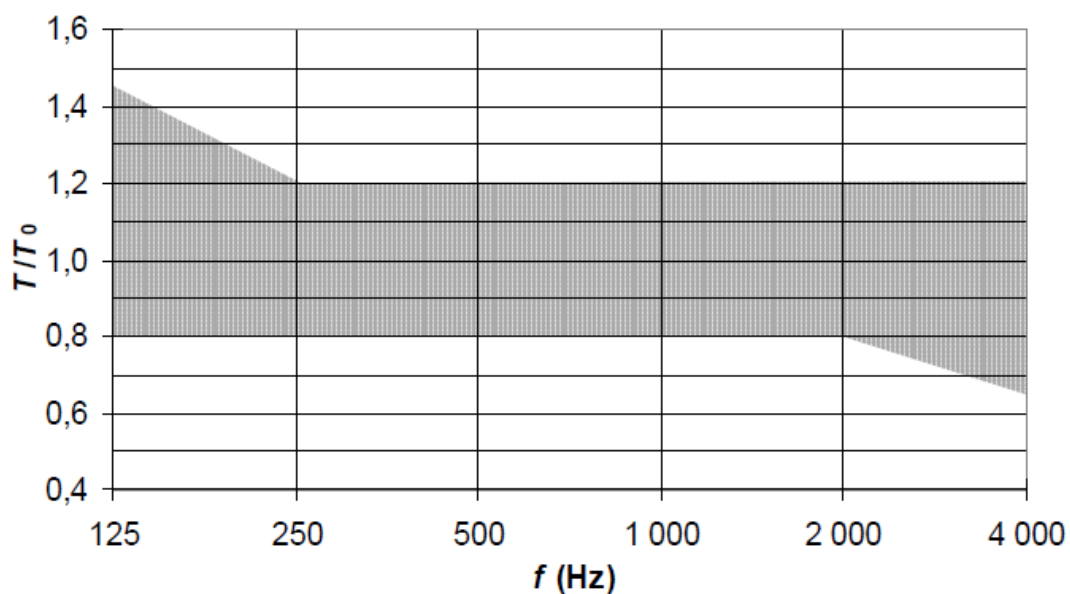
Plynový revolver Bruni Olympic 6 mm 10405080 - Koz

5.2.1 Výsledek měření doby dozvuku pro zasedací místnost

Naměřené hodnoty doby dozvuku jsou vyobrazeny v grafu č. 2. V grafu jsou také zaneseny toleranční meze dle normy ČSN 73 0525. Jelikož se v zasedací místnosti nacházel projektor s reproduktory, byly zvoleny meze pro přenos řeči i hudby viz obr. 32. Cílová doba dozvuku byla určena z grafu č.1, který byl opět převzat z normy ČSN 73 0525. Z měření je patrné, že nejvýraznějšího zlepšení bylo dosaženo v pásmech 250 Hz až 1000 Hz. Pokles v tomto pásmu se pohybuje okolo 0,35 s, což je z hlediska uživatele znatelné zlepšení.



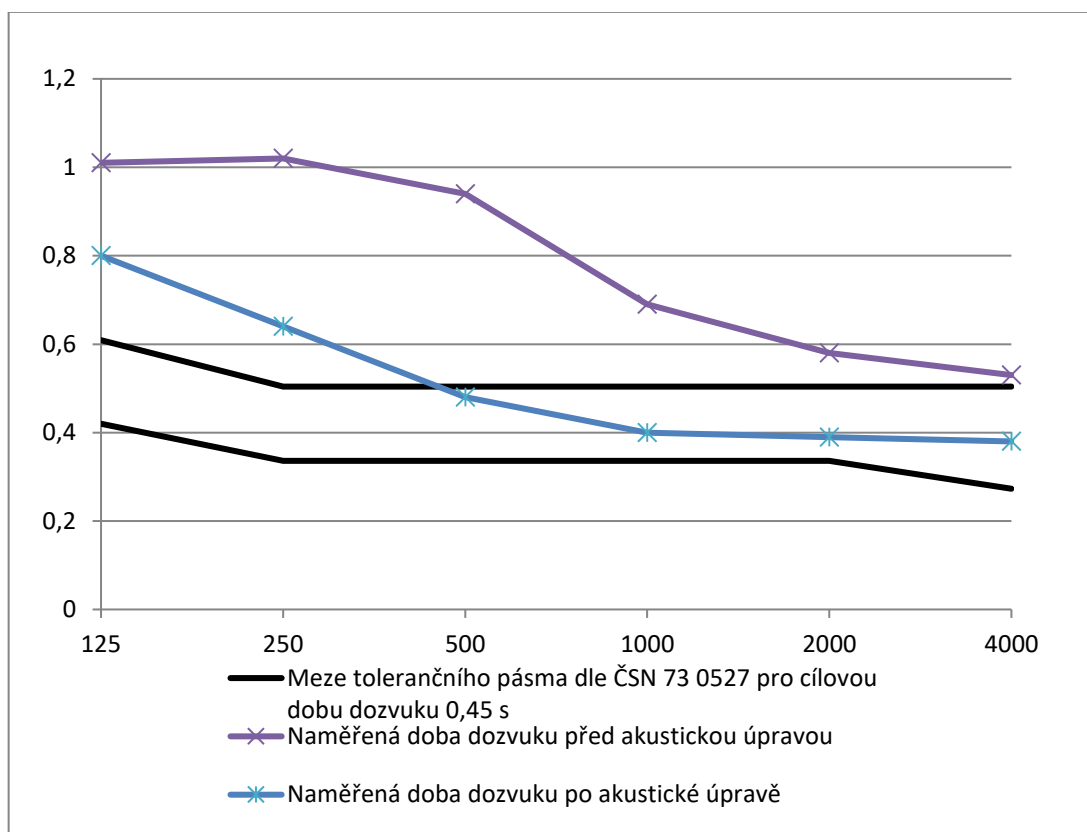
Graf č. 1 - Závislost optimální doby dozvuku pro kmitočet 1000 Hz na objemu - měřené prostory korespondují s křivkou 3



Obrázek č. 32 - Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku obsazeného prostoru určeného k přenosu řeči i hudby v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma

Naměřená doba dozvuku před úpravou						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	1,01	1,02	0,94	0,69	0,58	0,53
Naměřená doba dozvuku po úpravě						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	0,8	0,64	0,48	0,4	0,39	0,38

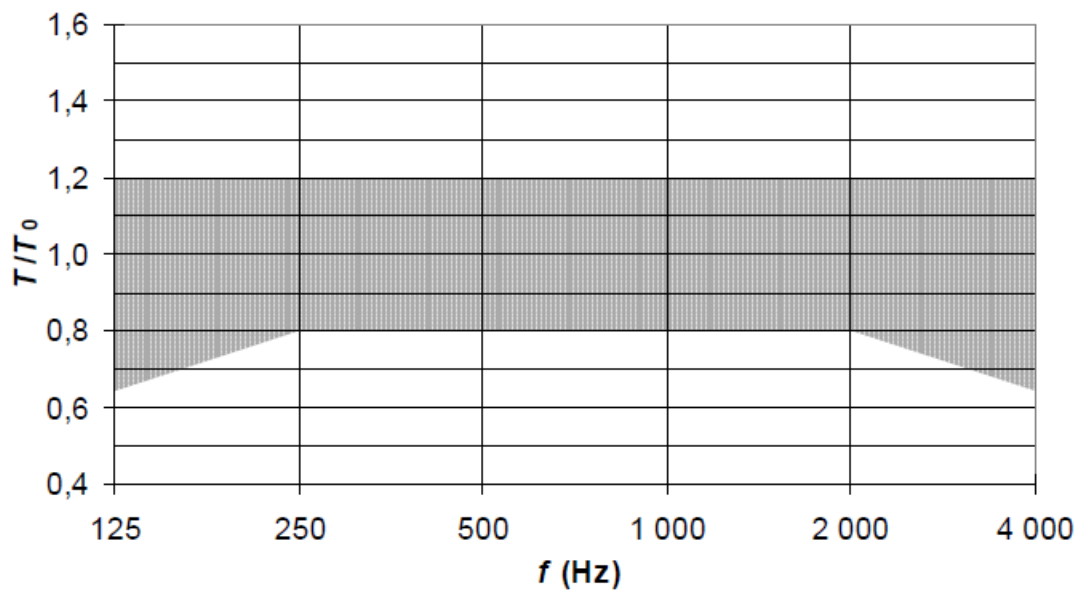
Tabulka č.1- naměřené hodnoty doby dozvuku pro zasedací místnost



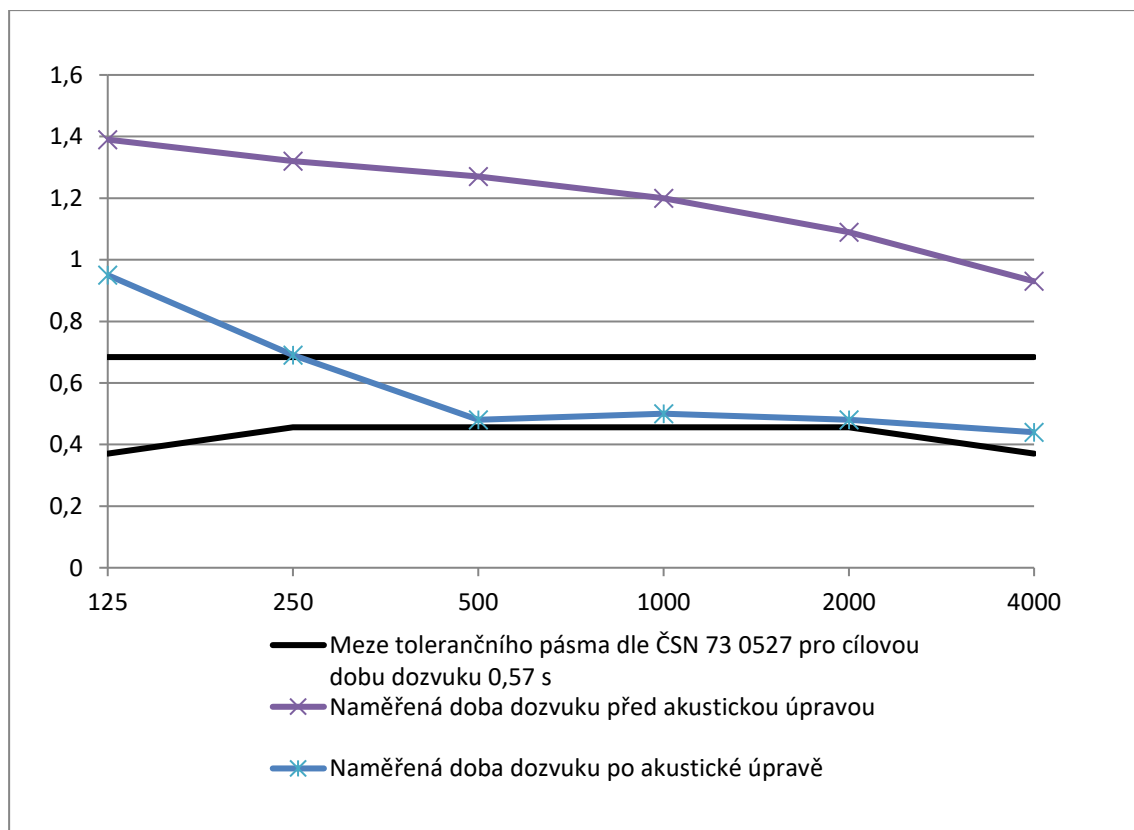
Graf č. 2 - Naměřené doby dozvuku pro zasedací místnost

5.2.2. Výsledek měření doby dozvuku pro openspace

Naměřené hodnoty doby dozvuku jsou vyobrazeny v grafu č. 3. U tohoto prostoru byla zvolena mez dle ČSN 73 0525 pro přenos řeči, viz obrázek č. 33. Z grafu je patrné, že nejvýraznějšího poklesu je dosaženo v oktávových pásmech 250 Hz až 2000 Hz, což jsou z hlediska sluchu nejvíce vnímané frekvence. Pokles v tomto pásmu přesahuje hodnotu 0,6 s. Lze konstatovat, že z uživatelského hlediska došlo ještě k většímu zlepšení než v případě zasedací místnosti.



Obrázek č. 33 - Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku obsazeného prostoru určeného k přenosu řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma



Graf č. 3 - Naměřené doby dozvuku pro openspace

Naměřená doba dozvuku před úpravou						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	1,39	1,32	1,27	1,2	1,09	0,93
Naměřená doba dozvuku po úpravě						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	0,95	0,69	0,48	0,5	0,48	0,44

Tabulka č.2 - naměřené hodnoty doby dozvuku pro openspace

5.3 Měření srozumitelnosti

Měření srozumitelnosti bylo provedeno v obou prostorech pro dvě polohy všesměrového zdroje zvuku, který byl umístěn ve výšce 150 cm nad podlahou. V zasedací místnosti byla pro každou polohu zdroje změřena srozumitelnost ve třech polohách, viz obrázek 34. V prostoru openspace byly použity polohy čtyři, jak je vidět na obrázku 35.

Měřicí aparatura:

Zvukoměr NTi audio XL2 - SN 07300215

Mikrofon NTi audio MA220 - SN 3208

Kalibrační zařízení:

Kalibrátor NTi audio Larson Davis CAL200 - SN 10692

Zdroj měřeného signálu:

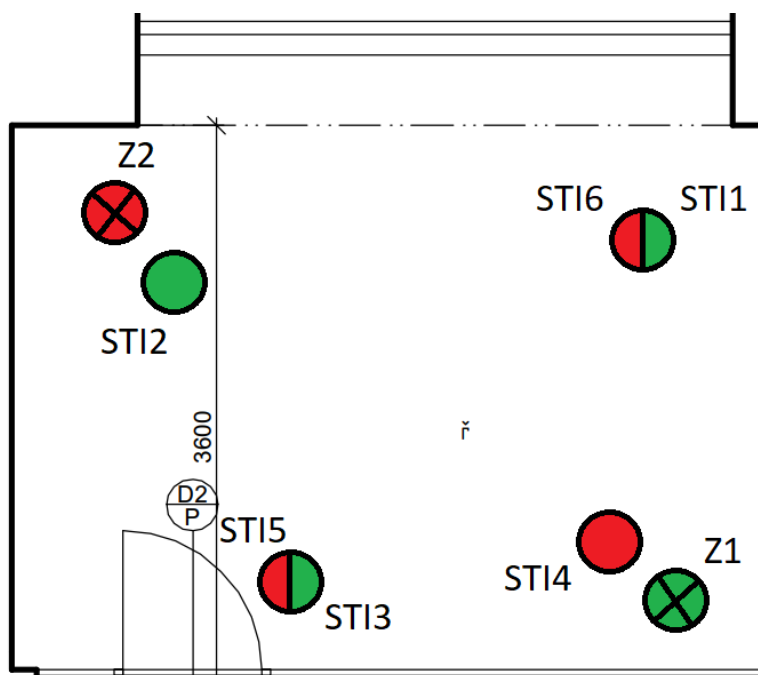
Notebook Lenovo ThinkPad L440

Zvuková karta Focusrite Scarlett 2i2 - SN S363341225667

Zesilovač YAMAHA Power Amplifier P2500S - SN HCUI01026

Všesměrový kulový zdroj osazený 12 reproduktory DEXON 5MP60N

5.3.1 Výsledek měření srozumitelnosti v zasedací místnosti



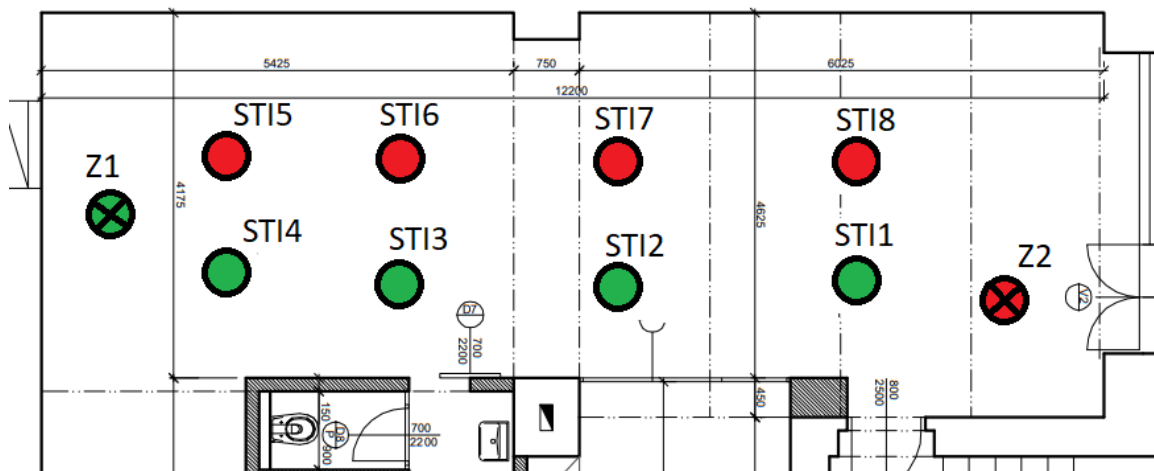
Obrázek č. 34 - Konfigurace měřících poloh srozumitelnosti STI v prostoru zasedací místnost

Vstupní měření	Závěrečné měření
STI1 = 0,64 [-]	STI1 = 0,76 [-]
STI2 = 0,58 [-]	STI2 = 0,73 [-]
STI3 = 0,59 [-]	STI3 = 0,80 [-]
STI4 = 0,56 [-]	STI4 = 0,73 [-]
STI5 = 0,62 [-]	STI5 = 0,73 [-]
STI6 = 0,65 [-]	STI6 = 0,82 [-]
STI_{prum} = 0,61 [-]	STI_{prum} = 0,76 [-]

Tabulka č.3 - naměřené hodnoty srozumitelnosti pomocí parametru STI pro zasedací místnost

Hodnoty srozumitelnosti mluveného slova STI se před a po provedení akustických úprav ve všech konfiguracích zlepšily a to průměrně o 0,15 [-].

5.3.2 Výsledek měření srozumitelnosti pro openspace



Obrázek č. 35 - Konfigurace měřících poloh srozumitelnosti STI v prostoru openspace

Vstupní měření	Závěrečné měření
STI1 = 0,41 [-]	STI1 = 0,64 [-]
STI2 = 0,46 [-]	STI2 = 0,63 [-]
STI3 = 0,48 [-]	STI3 = 0,66 [-]
STI4 = 0,46 [-]	STI4 = 0,74 [-]
STI5 = 0,33 [-]	STI5 = 0,46 [-]
STI6 = 0,45 [-]	STI6 = 0,62 [-]
STI7 = 0,56 [-]	STI7 = 0,70 [-]
STI8 = 0,59 [-]	STI8 = 0,76 [-]
STI_{prum} = 0,47 [-]	STI_{prum} = 0,65 [-]

Tabulka č.4 - naměřené hodnoty srozumitelnosti pomocí parametru STI pro openspace

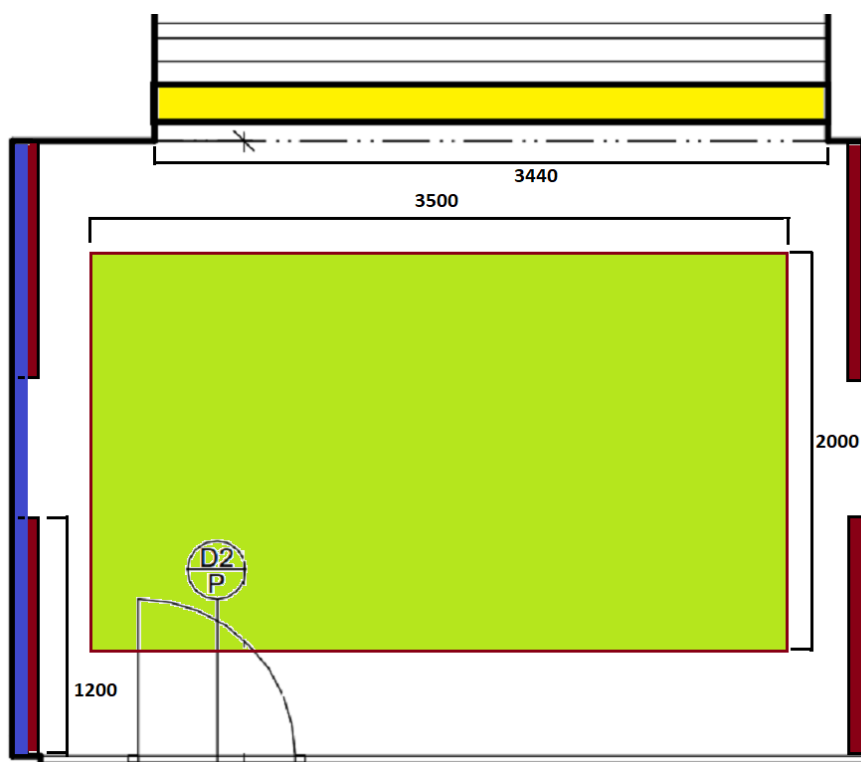
Hodnoty srozumitelnosti mluveného slova STI se před a po provedení akustických úprav ve všech konfiguracích zlepšily a to průměrně o 0,18 [-].

5.4 Teoretický návrh akustických úprav

Následující návrh se snaží dosáhnou ideálních akustických podmínek v daných prostorách. Hlavní důraz byl při výběru kladen na kombinaci co nejlepších prvků z hlediska akustiky i estetiky. Naopak nebyla brána v potaz výsledná cena akustického řešení.

5.4.1 Akustická úprava zasedací místnosti

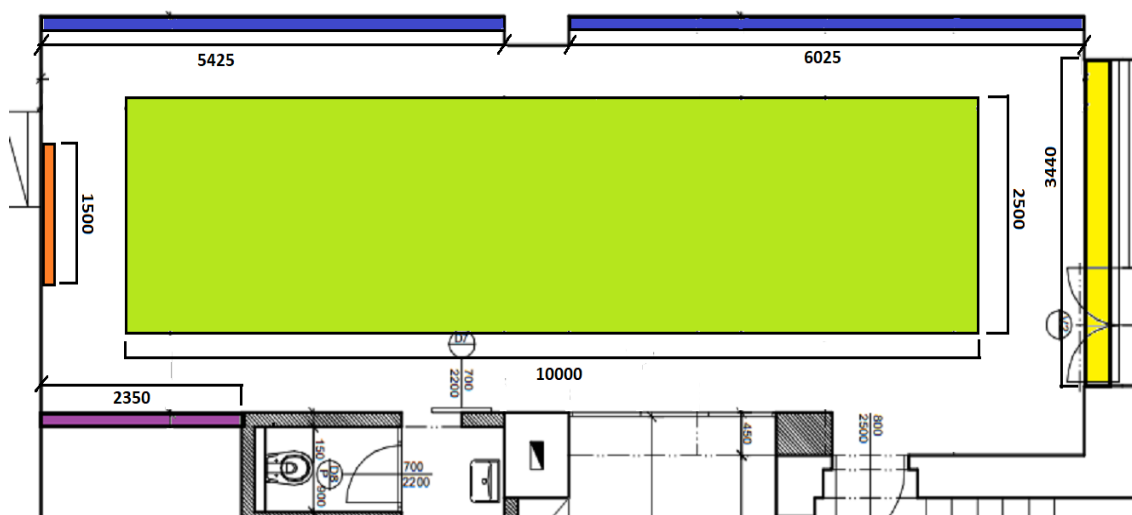
Pro tuto místnost jsem vybral akustický podhled Gyptone BIG Quattro 47. Tento podhled se vyznačuje nižší pohltivostí. Díky tomu mohu v místnosti použít další akustické prvky, aniž by byl prostor příliš zatlumený a docházelo k třepotavé ozvěně. Pro stěnu jsem volil obklad Clipso 705 A v kombinaci s absorbční plstí, která se použije k zatlumení vzduchové mezery a dojde tak k zlepšení pohltivosti. Z tohoto obkladu bych vytvořil pás, který by se nacházel ve výšce od 0,9 m do 2,1 m a pokryl bych jím celou šíři stěny. Uvedená výška je pro pohlcení zvuku z hlediska geometrické akustiky nejdůležitější. Protěšší stěnu jsem ponechal bez úpravy, jelikož se na ní nacházela magnetická tabule. Na okno bych použil akustické rolety Vario. Jelikož je v této místnosti projektor s reproduktory, přidal bych do této místnosti Audition VERSO T-LA1. Jedná se o kmitající desku, která pohlcuje zvuk pouze nízkých kmitočtech. I když se jedná o nízkofrekvenční absorbér, je tento prvek tenký a nezabírá moc místa. To je pro tento prostor velkou výhodou. Do každého rohu místnosti bych volil jeden panel o rozměrech 1200x600 mm.



Obrázek č. 36 - Orientální náčrt zasedací místnosti s vyznačenými akustickými prvky, všechny rozměry jsou v mm, Gyptone BIG Quattro 47 (zelená), Clipso 705 A (modrá), akustické rolety Vario (žlutá), Audition VERSO T-LA1 (hnědá), výška prostoru je 2740 mm

5.4.2 Akustická úprava openspace

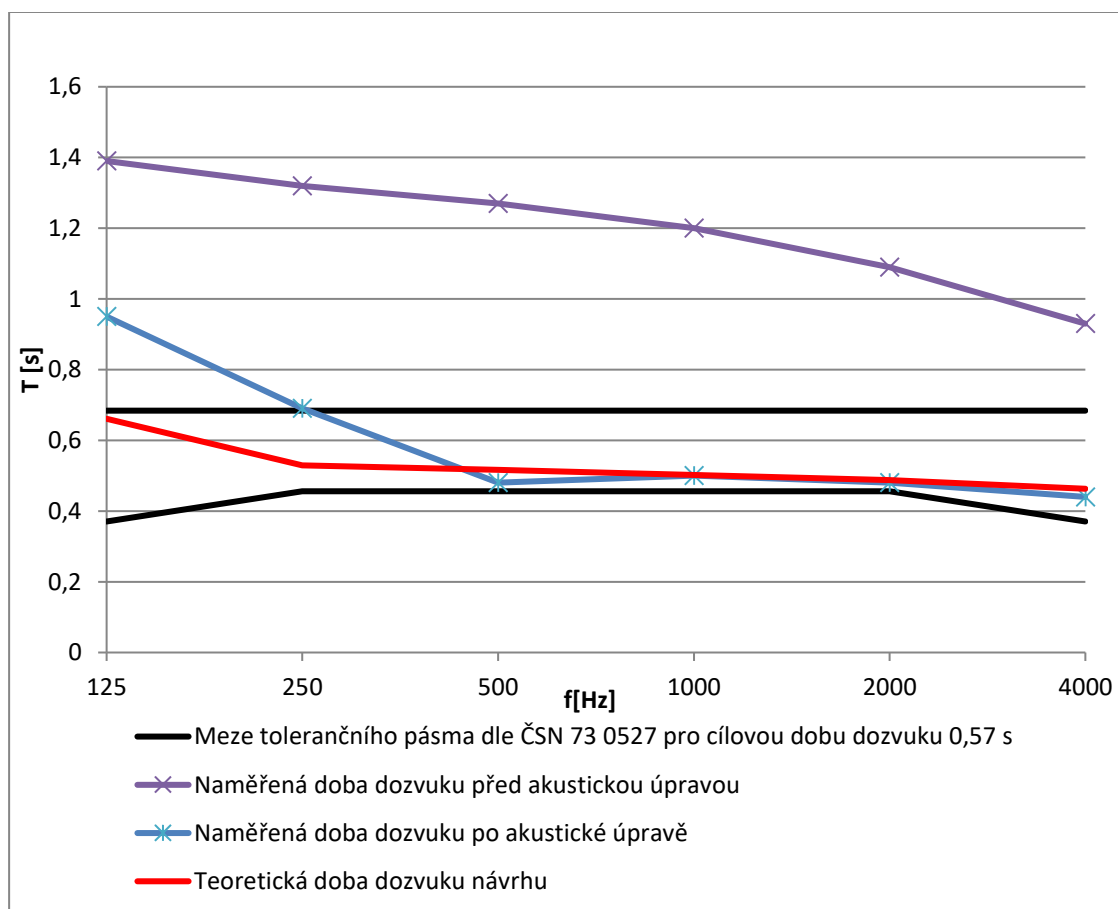
Pro tento prostor jsem vybral stejný pohled jako v případě zasedací místnosti (Gyptone BIG Quattro 47). Aby nedocházelo k přenosu nežádoucích zvuků z kuchyňky, oddělil jsem tento prostor japonskou stěnou Vario. Co se týče stěn v prostoru, byla pro úpravu vhodná pouze jedna. Použil jsem na ní stejný akustický obklad jako v případě zasedací místnosti (Clipso 705 A v kombinaci s absorbční plstí) a to opět ve stejně širokém pásu. Stejně tak tomu bylo i u okna, kde byly použity akustické akustické rolety Vario. Na protilehlou stranu místnosti od tohoto okna byl přidán akustický obraz Vario, který má rozměry 1500 x 1200 mm. V této místnosti nebyl přidán žádný nízkofrekvenční absorbér, protože místnost slouží pouze pro přenos řeči.



Obrázek č. 37 - Orientační náčrt openspace s vyznačenými akustickými prvky. Všechny rozměry jsou v mm. Gyptone BIG Quattro 47 (zelená), Clipso 705 A (modrá), akustické rolety Vario (žlutá), akustický obraz Vario (oranžová), japonská stěna Vario (fialová). Výška prostoru je 2810 mm.

5.4.3 Teoretický výpočet doby dozvuku

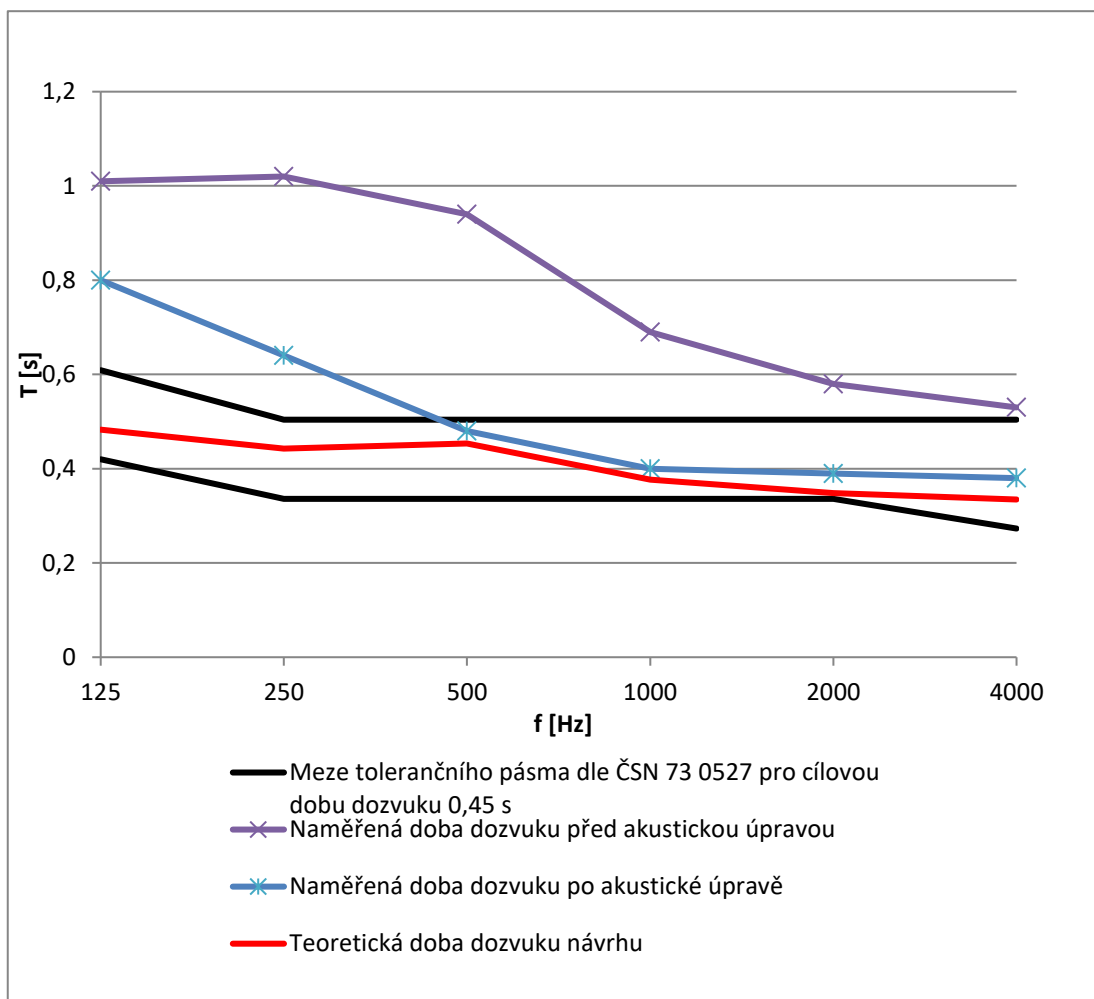
Pro výpočet doby dozvuku byl použit vzorec (6), který je v souladu s normou ČSN 73 0525. Rozměry místnosti byly odečteny z výkresové dokumentace. Z naměřené doby dozvuku před úpravou byla nejprve vypočtena průměrná α prostoru viz příloha. Tento parametr udává průměrnou pohltivost všech ploch v místnosti. Poté byla tato hodnota dosazena do vzorce (6) a následně byl proveden výpočet, který se nachází v příloze. Ve výpočtu byl zanedbán člen útlumu prostředí, jelikož oba prostory jsou z hlediska tohoto členu velmi malé. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v následujících grafech.



Graf č. 4 - Teoretická doba dozvuku pro openspace v porovnání s naměřenými hodnotami

Teoretická doba dozvuku návrhu						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	0,662	0,531	0,521	0,51	0,503	0,5

Tabulka č.5 - spočtené teoretické hodnoty doby dozvuku pro openspace



Graf č. 5 - Teoretická doba dozvuku pro zasedací místnost v porovnání s naměřenými hodnotami

Teoretická doba dozvuku návrhu						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T [s]	0,483	0,444	0,456	0,381	0,356	0,353

Tabulka č.6 - spočtené teoretické hodnoty doby dozvuku pro zasedací místnost

5.5 Porovnání s aplikovaným návrhem a zhodnocení výsledků

O akustickou úpravu obou místností se postarala firma Ecophon. Pro oba prostory bylo navrženo jednoduché řešení. Do místností ze své kolekce firma přidala podhledy pohltivosti třídy A. Zdi zůstaly beze změny. Toto řešení má řadu výhod. Mezi ty nejdůležitější patří samozřejmě cena a v neposlední řadě jednoduchá montáž. Přestože je toto řešení jednoduché a relativně levné, došlo v obou prostorech k výraznému zlepšení, obzvláště u doby dozvuku. Hlavní nevýhodou tohoto řešení může být vliv třepotavé ozvěny, jelikož strop je vůči stěnám přetlumený. Tento faktor se shoduje i s provedeným měřením srozumitelnosti. Dalším nedostatkem je nedostatečné utlumení nízkých kmitočtů, které by mohlo mít negativní vliv na přenos hudby v zasedací místnosti. Můj teoretický návrh nebral v úvahu cenu celého řešení, jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly. Díky tomu jsem mohl použít značné množství prvků od různých výrobců a docílit tak rovnoměrnějšího rozložení pohltivosti v každém z prostorů. Výsledná teoretická doba dozvuku tedy odpovídá normě ČSN 73 0525 i pro nízké kmitočty.

Závěr

V bakalářské práci jsou postupně zpracovány všechny zadané úkoly. Nejprve jsem se zabýval akustickou teorií. Zmapoval jsem různé akustické přístupy a soustředil se na pohlcování akustické energie. V další části práce jsem provedl průzkum trhu. Jednotlivé prvky jsem hodnotil zejména z hlediska akustické pohltivosti. V praktické části této práce jsem se zúčastnil měření doby dozvuku a srozumitelnosti v kancelářích společnosti AppAgent. Z měření je patrné, že došlo ke zdatelnému poklesu doby dozvuku v obou místnostech. Dále jsem naměřená data použil ve výpočtu mého teoretického návrhu. Tento teoretický návrh se výrazně lišil od návrhu, který byl pro místnosti použit. To je způsobeno rozdílným přístupem, jelikož použitý návrh bral v úvahu celkovou cenu aplikovaného řešení a používal prvky pouze od jediného dodavatele. V mém návrhu byla naopak použita kombinace rozdílných typů prvků od vícero prodejců a na cenu nebyl brán vůbec zřetel. Oba návrhy lze označit jako vyhovující.

Zdroje

- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1980, 244 s.
- [2] HRÁDEK, Tomáš a Jan TUČEK. *Katalog akustických prvků*. V Praze: Akademie múzických umění, 2011. ISBN 978-80-7331-316-6.
- [3] AVETON | *Akustika* [online]. AVETON, ©2015 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.aveton.cz/produkty.html>
- [4] KAŇKA, Jan a Jiří NOVÁČEK. *Akustika staveb* [online]. Stavební fakulta, ČVUT v Praze [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb>
- [5] D 12 Knauf Cleaneo akustické podhledy Dostupné z: <http://www.knauf.cz/upload/447-d12-akusticke-podhledy.pdf>
- [6] Technický list SON-OR
- [7] Technický list Mappysil Piramidele
- [8] Technický list ROCKFON Contour®
- [9] Artnovion Acoustics [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://www.artnovion.com/>
- [10] PAVELKA, Roman. *Prostorová akustika v aule Vědeckovýzkumného areálu PdF UP v Olomouci* | atelier-dek.cz [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/prostorov%C3%A1-akustika-v-aule-v%C4%9Bdeckov%C3%BDzkumn%C3%A9ho-are%C3%A1lu-pdf-v-olomouci-650>
- [11] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2005.
- [12] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1998.
- [13] VONDRÁŠEK, M., ANTEK, M. Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů. *Akustické listy*, 11 (3), září 2005, s. 9 – 18.