

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A REALIZACE AKUSTICKÉHO ŘEŠENÍ POSLECHOVÉHO PROSTORU

DESIGN AND REALIZATION OF ACOUSTIC SOLUTION FOR LISTENING ROOM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Burda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Jan Burda

ID: 156141

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace akustického řešení poslechového prostoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte model poslechového prostoru, který bude vybrán zadavatelem, v programu EASE a proveďte návrh a simulaci jeho akustických vlastností dle ČSN 73 0526. Proveďte též v programu optimalizaci poslechu pro systém prostorového ozvučení 5+1. Navrhňte štěrbinové dutinové rezonátory pro rezonanční kmitočty 60, 80, 100 a 120 Hz a kmitací panel s rezonančním kmitočtem 130 Hz, které budou vhodné pro tlumení nízkých frekvencí v uvažovaném prostoru a budou tvarově přizpůsobeny výslednému vzhledu interiéru. Výsledky simulací ověřte měřeními v upraveném prostoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOLMER, F., KYNCL, J. Prostorová akustika. 2, vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 242 s. ISBN 0451480.
- [2] ČECHURA, J. Stavební fyzika 10, Akustika stavebních konstrukcí. 1. vyd. Vydavatelství ČVUT Praha 6, 1997, 173 s. ISBN 80-01-01593-9.
- [3] COC, T., J., D'ANTONIO, P. Acoustic Absorbers and Diffusers, 1st ed.. Spon Press, Taylor & Francis Group, 2004, 405 s. ISBN 0-415-29649-8.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

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

Konzultant bakalářské práce: Ing. Rostislav Daněk

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ANOTACE

Tato práce se zaměřuje na problematiku prostorové akustiky a možnosti jejího zkoumání. Popisuje základní kritéria akustické kvality prostoru, běžně používané materiály a akustické obklady. Dále se práce zabývá modelováním prostoru a akustickou analýzou pomocí programu EASE. Ve třetí části práce je podrobný popis návrhu akustických prvků založených na rezonančním principu. Poslední část této práce se zabývá měřením doby dozvuku.

Klíčová slova: prostorová akustika, modelování prostoru, EASE, návrh akustických prvků, doba dozvuku

ABSTRACT

This work is focused on the problem of room acoustics and its analysis options. It describes the basic criteria of acoustic quality space, commonly used materials and acoustic tiles. It also deals with modeling and acoustic analysis of space using EASE. The third part of thesis is a detailed description of the design of acoustic elements based on resonance principle. The last part deals with the measurement of the reverberation time.

Keywords: room acoustics, modeling space, EASE, design of acoustics absorbers, reverberation time

BURDA, J. *Návrh a realizace akustického řešení poslechového prostoru: bakalářská práce*. Brno:FEKT VUT v Brně, 2016. 56 stran, 18 s. příloh. Vedoucí práce Ing. J. Schimmel, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh a realizace akustického řešení poslechového prostoru“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Rostislavu Daňkovi za odborné vedení mé bakalářské práce, Ing. Jiřímu Schimmelovi, PhD. za pedagogickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizovaný v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Prostorová akustika	2
1.1 Šíření zvuku prostorem	2
1.2 Geometrická akustika	3
1.3 Vlnová akustika	3
1.3.1 Vlastní kmity prostoru	3
1.3.2 Kritický kmitočet	4
1.4 Statistická akustika	5
1.4.1 Doba dozvuku a její výpočet	5
1.4.2 Měření doby dozvuku	8
1.5 Kritéria akustické kvality prostoru	10
1.5.1 Počáteční doba dozvuku EDT.....	10
1.5.2 Míra přímého zvuku C_7	10
1.5.3 Míra zřetelnosti C_{50}	11
1.5.4 Míra jasnosti C_{80}	11
1.5.5 Síla zvuku G	12
1.5.6 Čas těžiště impulsové odezvy t_s (Center Time)	12
1.5.7 Ztráta srozumitelnosti souhlásek AL_{cons}	12
1.6 Akustické materiály a obklady	12
1.6.1 Porézní materiály	13
1.6.2 Kmitající desky	13
1.6.3 Helmholtzovy rezonátory	14
2 Simulace akustických vlastností	17
2.1 Popis prostoru	17
2.2 3D model.....	17
2.3 Materiály	18

2.4	Simulace před úpravou	19
2.5	Simulace po úpravě.....	23
3	Návrh akustických obkladů	26
3.1	Kmitající panel.....	26
3.2	Helmholtzovy rezonátory	27
3.3	Akustické stěny.....	29
4	Měření	30
4.1	Vyhodnocení a interpretace výsledků měření.....	31
4.2	Návrh dodatečného řešení.....	32
5	Závěr	34
	Literatura	35
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	36
	Seznam příloh	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1.1: Zobrazení energií zvukové vlny na překážce	2
obr. 1.2: Znázornění konstrukce odraženého paprsku pomocí fiktivního zdroje	3
obr. 1.3: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného pro hudbu i řeč v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma.....	6
obr. 1.4: Mechanická analogie akustického rezonančního obvodu.	13
obr. 1.5: Náčrt kmitající desky s různými druhy pružného uložení a) plst', b) pěnová guma, c) pásy koženky.	14
obr. 1.6: Schematicky znázorněný Helmholtzův rezonátor	15
obr. 1.7: Zjednodušený náčrt Helmholtzova rezonátoru v provedení s děrovanou deskou.....	15
obr. 1.8: Závislost koncové korekce K_1 na činiteli děrování ϵ pro kruhové, čtvercové a obdélníkové otvory.....	16
obr. 2.1: Náhled 3D modelu prostoru vytvořeného v programu Google SketchUp	18
obr. 2.2: Doba dozvuku analyzovaného prostoru před úpravou podle Eyringa.....	19
obr. 2.3: Rozmístění reproduktorů pro vícekanálový poslech	20
obr. 2.4: Simulace objektivního parametru C_{80} před úpravou	21
obr. 2.5: Simulace objektivního parametru AL_{cons} před úpravou	22
obr. 2.6: Rozmístění akustických prvků v prostoru	23
obr. 2.7: Simulovaná doba dozvuku po akustické úpravě	24
obr. 2.8: Simulace C_{80} po akustických úpravách	25
obr. 2.9: Simulace AL_{cons} po akustických úpravách	25
obr. 3.1: Model navrženého kmitajícího panelu v programu SolidWorks.....	26
obr. 3.2: Model navrženého rezonátoru v programu SolidWorks	27
obr. 3.3: Orientační kmitočtová závislost α pro různá tlumení rezonátoru.	28
obr. 4.1: Rozmístění zdrojů a mikrofonů pro měření doby dozvuku.....	30
obr. 4.2: Kmitočtová závislost změřené doby dozvuku	31
obr. 4.3: Změřená kmitočtová závislost C_{80}	32
obr. 4.4: Návrh dodatečného akustického řešení	32
obr. 4.5: Simulovaná doba dozvuku po dodatečných úpravách.....	33

SEZNAM TABULEK

tab. 1.1: Doporučený objem a optimální doba dozvuku vybraných prostorů	6
tab. 1.2: Minimální počty míst a měření podle přesnosti.....	9

ÚVOD

Tato bakalářská práce se ve své první kapitole věnuje problematice prostorové akustiky. Popisuje chování zvukových vln v uzavřeném prostoru a možnosti pro základní analýzu akustického pole. Jsou zde přehledně uvedené vztahy pro výpočet módů místnosti, kritického kmitočtu či doby dozvuku. Součástí této kapitoly je také popis metodiky měření doby dozvuku. Dále je představeno několik objektivních kritérií pro posuzování akustické kvality prostoru. Zaměřeno je především na parametry definované poměrem energií určitých časových úseků impulsové odezvy prostoru, jako je míra přímého zvuku, míra zřetelnosti nebo míra jasnosti. Následuje popis materiálů využívaných pro efektivní pohlcování zvuku a akustických obkladů založených na rezonančním principu. V této části se práce věnuje především možným konstrukcím a principům návrhu. Tento teoretický úvod bude sloužit k základnímu přehledu potřebnému ke splnění zadání bakalářské práce.

Cílem práce je vytvořit 3D model zadaného prostoru a provést simulaci a vyhodnocení akustických vlastností před i po úpravách dle ČSN 73 0526, to vše za pomoci softwaru EASE. Toto je obsahem druhé kapitoly.

Následující kapitola pojednává o vlastním návrhu akustických obkladů pracujících na rezonančním principu, které budou využity v uvažovaném prostoru. Cílem je navrhnout šěrbinové dutinové rezonátory a kmitající panel.

Samotné simulování prostoru a návrh řešení však není možné považovat za jednoznačný a není možné na základě těchto výsledků tvrdit, že je skutečnost stejná. Z toho důvodu by měla být každá taková simulace a návrh řešení ověřena měřením. Tím se zabývá poslední kapitola této práce.

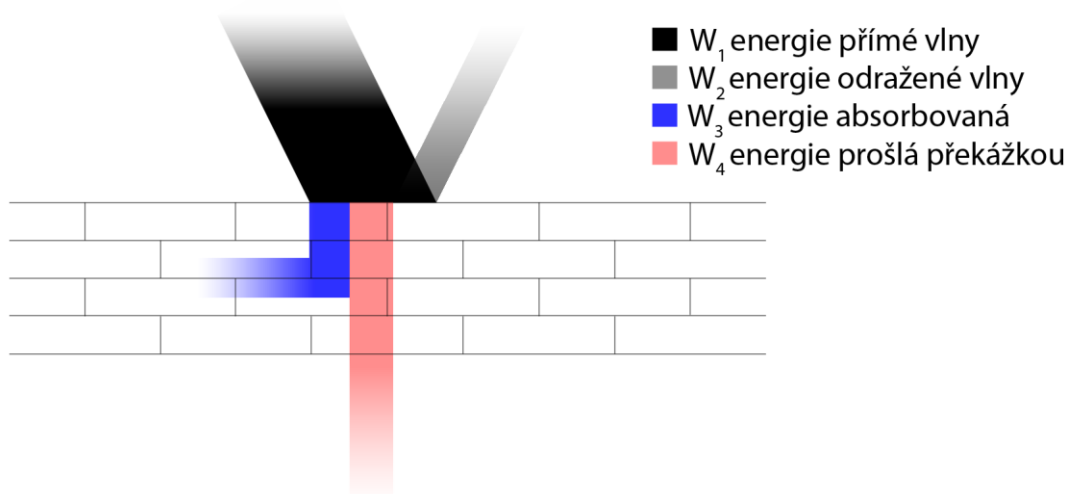
1 PROSTOROVÁ AKUSTIKA

Prostorová akustika je jedním z oborů akustiky zabývající se šířením zvuku v uzavřených prostorech. Za uzavřený prostor lze považovat každý prostor ohraničen plochami, které mají určitou schopnost zvuk odrazet, pohlcovat, koncentrovat či rozptylovat v závislosti na jejich materiálu a tvaru. Každý takový prostor může sloužit k jiným účelům a podle toho jsou normami udány akustické parametry, kterými je nutné se řídit při návrhu akustiky. Proto je v první řadě vhodné analyzovat stávající stav prostoru a určit tyto parametry. Dále se prostorová akustika zabývá vhodným výběrem materiálu a z nich vyrobených akustických prvků na obklad stěn, podlahy a stropu. Za akustické prvky se považují např. kmitající panely, dutinové rezonátory nebo rozptylové (difuzní) panely.

1.1 Šíření zvuku prostorem

Zákony šíření zvuku v uzavřených prostorech jsou v podstatě zvláštními případy obecných zákonů pro šíření vlnění. Je-li ve směru šíření zvukové vlny nějaká překážka, dojde ke dvěma jevům: odrazu a ohybu zvukové vlny. O tom, který z obou jevů bude převládat, tj. zda většina energie bude odražena nebo zda se většina energie bude šířit ohybem dále, rozhodují rozměry překážek ve srovnání s vlnovou délkou zvuku. Čím větší jsou rozměry překážky, tím více se blíží chování zvukových vln při odrazu chování světelných paprsků [1].

Šíření energie zvukové vlny je znázorněno na **obr. 1.1**, kde zeď představuje překážku konečných rozměrů.

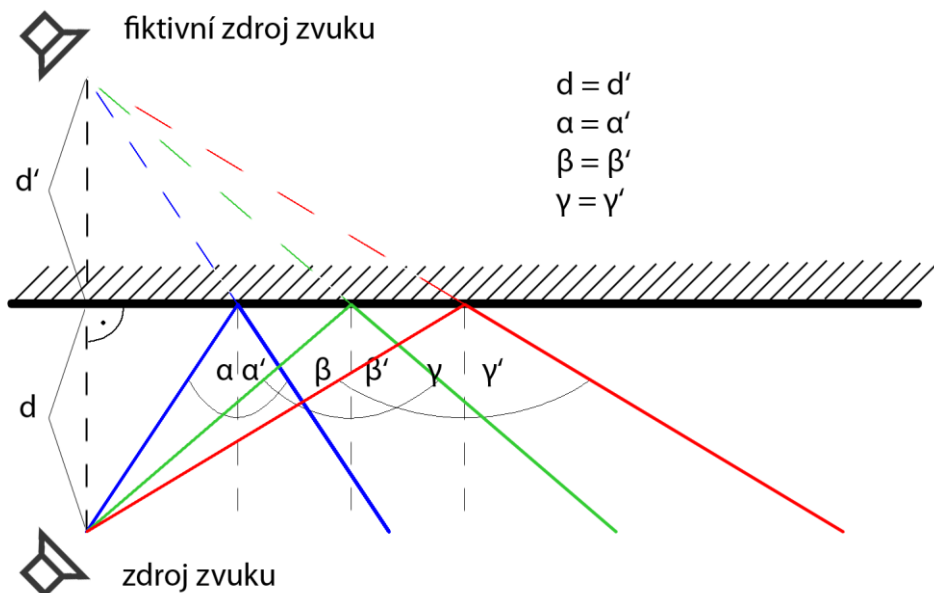


obr. 1.1: Zobrazení energií zvukové vlny na překážce

1.2 Geometrická akustika

V uzavřených prostorech se šíří zvukové vlny ze zdroje do daného místa přímo a odrazy od stěn obklopujících tento prostor. Odrazové plochy stěn nebývají vždy rovinné. Křivost nebo členitost jejich povrchu se pak uplatňuje tím více, čím větší jsou rozměry dílčích útvarů ve srovnání s vlnovou délkou. Pojmem geometrická akustika označujeme onu oblast akustiky, která se zabývá odrazy zvukových vln od překážek za předpokladu, že nenastává ohyb zvuku. V tomto případě můžeme obdobně jako v optice zavést pojem zvukového paprsku, pro který platí zákon rovnosti úhlu dopadu a odrazu [1].

Při konstruování odraženého paprsku se využívá fiktivního zdroje, který je umístěn ve stejné vzdálenosti za stěnou jako zdroj zvuku před stěnou. Odražený paprsek má potom směr vycházející z fiktivního zdroje. Tento princip je znázorněn na **obr. 1.2**.



obr. 1.2: Znázornění konstrukce odraženého paprsku pomocí fiktivního zdroje

1.3 Vlnová akustika

V prostoru se může šířit současně mnoho vln a ještě mohou mít různý tvar. Při řešení vlnové rovnice musíme přihlížet k vlastnostem akustického signálu a k okrajovým podmínkám. Úplné analytické řešení, při své matematické těžkosti, je možné jen v jednoduchých případech. Pro praktické využití má význam řešení vlnové rovnice pro pravoúhlý prostor tvaru kvádru o délkách hran l_x , l_y , l_z [m] [1].

1.3.1 Vlastní kmity prostoru

Z řešení vlnové rovnice (popsané v [1]) plyne vztah pro vlastní kmity prostoru, tzv. módy místnosti

$$f_n = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

kde c_0 představuje konstantu rychlosti šíření zvuku, 343,3 m/s pro 20°C podle [11], l_x , l_y , l_z udávají okrajové podmínky – rozměry prostoru [m] a indexy n_x , n_y a n_z reprezentují celá kladná čísla.

Módem místnosti je označován kmitočet, který místnost díky svým rozměrům přirozeně zesiluje, stejně tak zesiluje i celočíselné násobky těchto frekvencí. Z toho plyne, že spektrum vlastních kmitů je diskrétní a nerovnoměrné.

Vlastní kmity můžeme rozdělit do tří skupin:

- kmity osově, které dostaneme, jsou-li dvě čísla z n_x , n_y , n_z rovna 0. Vlny odpovídající těmto kmitům se šíří rovnoběžně s jednou z os místnosti a odrážejí se pouze od dvou protilehlých stěn;
- kmity tangenciální, které dostaneme, je-li jedno z čísel n_x , n_y , n_z rovno 0. Příslušná vlna se odráží pouze od čtyř stěn;
- kmity kosé, k nimž dochází, jestliže žádné z čísel n_x , n_y , n_z není rovno 0. [1]

Konečný počet vlastních kmitů v kmitočtovém intervalu od 0 Hz do kmitočtu f lze vypočítat podle následujícího vztahu

$$N(f) = \frac{4\pi V}{3c_0^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c_0^2} f^2 + \frac{L}{8c_0} f \quad [-] \quad (1.2)$$

kde V je objem prostoru [m^3], S plocha všech stěn prostoru [m^2], L délka všech hran prostoru [m], c_0 rychlost šíření zvuku [m/s] a f udává konečný kmitočet [Hz], do kterého požadujeme vypočítat počet vlastních kmitů prostoru.

1.3.2 Kritický kmitočet

Nerovnoměrné spektrum vlastních kmitů bývá především na nízkých kmitočtech, kde mají od sebe jednotlivé módy místnosti větší rozestup. Až od kmitočtu f_k se spektrum považuje za vyrovnané, tento kritický kmitočet je možné vypočítat následujícím vztahem

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.3)$$

kde T je doba dozvuku v prostoru [s] a V objem místnosti [m^3].

Má-li být zajištěn dobrý přenos zvuku, je důležité, aby v poslechovém kmitočtovém pásmu byl co největší počet rovnoměrně rozložených vlastních kmitů. Z toho vyplývá, že nejnižší vlastní kmitočet by měl být hluboko pod uvažovaným pásmem. Tato podmínka je splněna jen pro větší místnosti [1].

1.4 Statistická akustika

Vlnová teorie aplikovaná na uzavřené prostory neumožňuje plně formulovat závěry, potřebné jak z hlediska návrhů, tak i oceňování akustické kvality uzavřených prostorů. Je to způsobeno tím, že vlnová teorie, pokud dovedeme nalézt řešení, udává příslušné akustické veličiny jako funkci polohy a času. Tyto hodnoty se v jednotlivých bodech prostoru od sebe mnohdy značně liší. Možnost nalezení průměrných hodnot dává teorie statistická. Základními veličinami, charakterizujícími zvukové pole, budou v tomto případě veličiny energetické, a to hlavně hustota zvukové energie nebo intenzita zvuku. Aby bylo možné nalézt hodnoty zvukové energie, je zapotřebí učinit některé zjednodušující předpoklady, které můžeme shrnout takto [1]:

- a) Velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn. Tento předpoklad znamená, že se nezabýváme studiem okamžitých hodnot amplitud a fází kmitů, a tedy interferencemi odražených zvukových vln, procházejících v daném okamžiku uvažovaným bodem.
- b) Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně veliká. V této souvislosti je třeba si uvědomit, že zvukové pole v daném bodě prostoru je složeno ze zvuku dopadajícího do uvažovaného místa ze zdroje přímo (jehož intenzita u bodových zdrojů klesá s druhou mocninou vzdálenosti) a zvuku odraženého od stěn. Hustota zvukové energie je konstantní jen v poli odražených zvukových vln, takže náš předpoklad platí teprve v takové vzdálenosti od zdroje, ve které můžeme ve srovnání s energií odraženou zanedbat energii přímo dopadající zvukové vlny.
- c) Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do uvažovaného bodu, jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností.

V reálném prostoru platí tyto předpoklady jen přibližně, pouze v kmitočtové oblasti nad kritickým kmitočtem f_k a v určité vzdálenosti od zdroje, větší než poloměr dozvuku r' , který vypočítáme podle následujícího vztahu (převzatý z [1])

$$r' = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad [\text{m}] \quad (1.4)$$

kde V je objem prostoru [m^3] a T doba dozvuku v prostoru [s].

1.4.1 Doba dozvuku a její výpočet

Zvuk, který se šíří prostorem po vypnutí zdroje, se nazývá dozvuk. Doba, po kterou dozvuk existuje, je dobou dozvuku RT (Reverberation Time), označována také jako T_{60} .

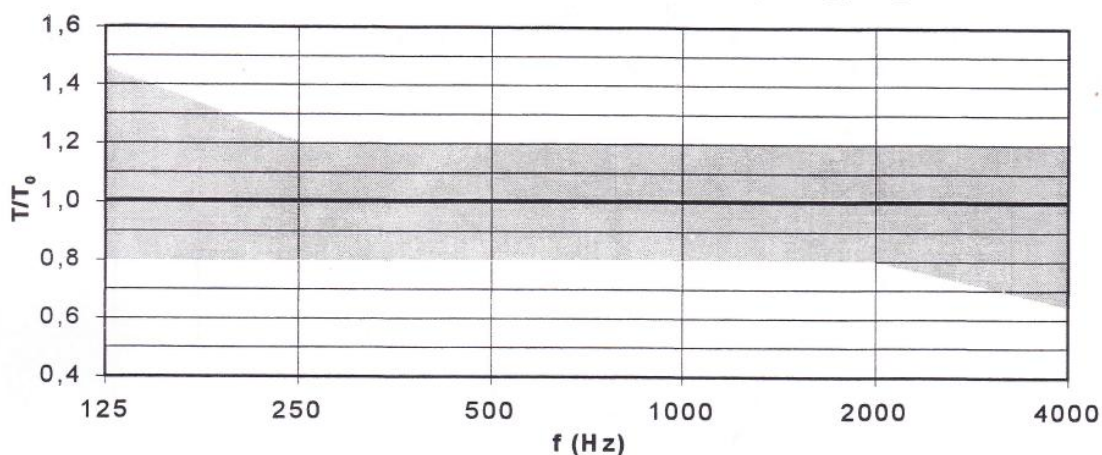
Pro charakterizování vlastností uzavřeného prostoru je dozvuk velmi důležitý. Standardní doba dozvuku je definována jako doba, za kterou hustota energie nebo intenzita zvuku klesne po vypnutí zdroje na 10^{-6} původní hodnoty. Při subjektivním posuzování vhodnosti doby dozvuku v daném prostoru rozhoduje účel, k jakému je prostor především určen. Zřejmě jinou optimální dobu dozvuku vyžaduje prostor pro poslech řeči než pro poslech hudby. Avšak i v oblasti hudby samotné jsou sledovány rozdílné optimální doby dozvuku podle toho, o jaký druh hudby jde; např. pro varhanní

hudbu se všeobecně žádá podstatně delší doba dozvuku než např. pro komorní nebo sólovou hudbu. Dokonce i různé styly hudby mohou vést k rozdílným optimálním dobám dozvuku [1].

Normy udávají optimální dobu dozvuku v závislosti na celkovém objemu uzavřeného prostoru. Vybrané účelové prostory se svojí optimální dobou dozvuku i doporučeným objemem ilustruje **tab. 1.1** (převzaté z [3]). Normy také udávají přípustná toleranční pásma (horní i dolní mez T_0) v závislostech na středních kmitočtech oktávových pásem. Toleranční pásmo určené např. pro hudbu i řeč zobrazuje **obr. 1.3** (převzatý z [4])

tab. 1.1: Doporučený objem a optimální doba dozvuku vybraných prostorů

Účel prostoru	T_0 [s]	V_0 [m ³]
Hlasatelna, dabingové studio	0,3	90
Malé hudební studio	1,0	1500
Střední hudební studio	1,5	4000
Velké hudební studio	1,8	13000
Střední televizní/filmové studio	1,1	10000
Režijní místnost	0,3	130
Mixážní hala	0,7	700



obr. 1.3: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného pro hudbu i řeč v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma

Doba dozvuku podle Sabina

P. E. Sabine předpokládal, že zvuková energie je stěnami obklopujícími uzavřený prostor pohlcována plynule. Doba dozvuku je dána následujícím vztahem (převzatý z [1])

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad [s], \quad (1.5)$$

kde α představuje střední činitel zvukové pohltivosti prostoru, S plochu všech stěn prostoru [m^2] a V objem prostoru [m^3].

Sabinův vzorec vyhovuje v praxi pouze pro prostory s malým činitelem zvukové pohltivosti stěn. Kdyby stěny byly dokonale odrazivé ($\alpha = 0$), byla by doba dozvuku nekonečně velká, což by zřejmě nastalo, kdyby nebylo útlumu zvuku při jeho šíření v prostředí. Kdyby však stěny byly dokonale pohltivé ($\alpha = 1$), byla by doba dozvuku dána hodnotou výrazu $0,164 V/S$, ačkoliv by se měla rovnat nule [1].

Doba dozvuku podle Eyringa

Předpoklad o plynulém pohlcování zvukové energie stěnami pro vyšší střední hodnoty činitele zvukové pohltivosti již nevyhovuje. Eyring proto předpokládal, že libovolný paprsek se po odrazu skokově zeslabí. Doba dozvuku je poté dána následujícím vztahem (převzatý z [1])

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad [s], \quad (1.6)$$

kde α představuje střední činitel zvukové pohltivosti prostoru, S plochu všech stěn prostoru [m^2] a V objem prostoru [m^3].

Tento vztah vyhovuje i pro prostory s velkým činitelem pohltivosti [1].

Doba dozvuku podle Millingtona

V praxi se ukázalo, že ani Eyringův vztah nedává uspokojivé informace v těch případech, kdy jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti větší než 0,8, a proto je vhodnější použít vztah Millingtonův. Eyring předpokládal, že odrazů od jednotlivých stěn a ploch je stejný počet, kdežto ve skutečnosti, jak se zdá, je jejich počet závislý na velikosti stěny nebo plochy. Millington předpokládal, že se stěny ohraničující uzavřený prostor skládají celkem z n ploch s různými činiteli zvukové pohltivosti. Výsledná doba dozvuku podle Millingtona je dána následujícím vztahem (převzatý z [1])

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad [s], \quad (1.7)$$

kde V je objem prostoru [m^3], S_i představuje velikost jedné plochy [m^2] s jedním činitelem zvukové pohltivosti α_i . [1]

1.4.2 Měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku stanovuje norma ČSN EN ISO 3382, ta je rozdělena na tři části podle využití prostoru. Popis následujících metod a přesností měření je výtahem z [5].

Dobu dozvuku je možné měřit metodou přerušného šumu nebo metodou integrované impulsové odezvy. V obou případech je v měřené místnosti umístěn zdroj zvuku a měřicí mikrofon. Zdroj zvuku by měl být co nejvíce všesměrový a schopný vybudit hladinu akustického tlaku dostatečnou pro pořízení křivek poklesu, nejméně však o 40 dB vyšší než je hladina hluku pozadí. Mikrofon ke snímání akustického tlaku musí být všesměrový s vyrovnanou kmitočtovou charakteristikou, co nejmenších rozměrů s průměrem membrány maximálně 14 mm. Umístění zdroje zvuku mohou být zvolena jako obvyklá místa v souladu s využíváním prostoru. Umístění mikrofonu by měla být v difuzním poli, taková, aby od sebe byla vzdálena minimálně 2 m. K nejbližšímu odrazujícímu povrchu, včetně podlahy, by měla být vzdálena minimálně 1 m. Žádný z mikrofonů nesmí být umístěn příliš blízko zdroji zvuku, aby se zabránilo silnému vlivu přímého zvuku. Minimální vzdálenost d_{min} lze vypočítat z následujícího vztahu:

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c_0 T}} \quad [m], \quad (1.8)$$

kde V je objem prostoru [m^3], c_0 rychlost šíření zvuku [m/s] a T odhad očekávané doby dozvuku v prostoru [s]. Měření se provádí na více místech v prostoru, z důvodu neideálního difuzního pole a výsledky se průměrují. U interpretace výsledku se uvádí střední hodnota $a(T)$, rozptyl $D(T)$ a směrodatná odchylka $\sigma(T)$. Tyto hodnoty lze vypočítat pomocí vztahů (1.9), (1.10) a (1.11).

$$a(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad [-], \quad (1.9)$$

$$D(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - a(T_i))^2 \quad [-], \quad (1.10)$$

$$\sigma(T) = \sqrt{D(T)} \quad [-], \quad (1.11)$$

kde N je počet měření a T doba dozvuku v prostoru [s]. Minimální počty míst měření podle přesnosti jsou uvedeny v **tab. 1.2** (převzato z [5]). Výsledky měření se interpretují v podobě protokolu. Jeho nezbytný obsah je podrobně popsán v [5].

tab. 1.2: Minimální počty míst a měření podle přesnosti

	Orientační	Inženýrské ^a	Přesné
Kombinace zdroj mikrofon	2	6	12
Místa zdroje ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Místa mikrofonu ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Počet poklesů v každém místě (metoda přerušného šumu)	1	2	3
^a Když se výsledek použije pro korekční člen k jiným měřením technické úrovně, požadují se pouze jedno místo zdroje a tři místa mikrofonu.			
^b U metody přerušného šumu lze použít více nekoherentních zdrojů současně.			
^c U metody přerušného šumu, a když se výsledek použije pro korekční člen, může být využit rotující mikrofonní stojan místo několika míst.			

Orientační metoda

Tato metoda je vhodná k určení míry pohltivosti prostoru pro účely ochrany proti hluku a pro orientační měření útlumu zvuku ve vzduchu a zvukové izolace. Měří se pouze v oktávových pásmech, přičemž se předpokládá přesnost lepší než 10 %.

Inženýrská metoda

Inženýrská metoda je vhodná k ověření povedení stavby z hlediska porovnání se stanovenou dobou dozvuku nebo pohltivostí prostoru. Předpokládá se, že jmenovitá přesnost bude lepší než 5 % v oktávových pásmech a lepší než 10 % v třetinooktávových pásmech.

Přesná metoda

Je vhodná v případě, kdy je požadována vysoká přesnost měření. Předpokládá se, že jmenovitá přesnost bude lepší než 2,5 % v oktávových pásmech a lepší než 5 % v třetinooktávových pásmech.

Obě metody měření dávají stejnou očekávanou hodnotu. Kmitočtový rozsah závisí na účelu měření. Tam, kde není požadavek na určitá kmitočtová pásma, by u orientační metody měl kmitočtový rozsah pokrývat nejméně 250 Hz až 2000 Hz. U inženýrské a přesné metody by kmitočtový rozsah měl pokrývat nejméně 125 Hz až 4000 Hz v oktávových pásmech, nebo 100 Hz až 5000 Hz v třetinooktávových pásmech.

Metoda přerušného šumu

Signál přiváděný do reproduktoru musí být odvozen z širokopásmové náhodného nebo pseudonáhodného elektrického šumu. Signál má být vypínán náhodně, nesmí být opakován vždy stejný úsek. Pro měření v oktávových pásmech musí být šířka pásma signálu větší nebo rovná jedné oktávě a pro měření v třetinooktávových pásmech musí být šířka pásma signálu větší nebo rovna jedné třetině oktávy. Spektrum musí být dostatečně ploché v konkrétním oktávovém pásmu, v němž se má měřit. U inženýrské a přesné metody musí být doba buzení uzavřeného prostoru natolik dostačující, aby zvukové pole dosáhlo ustáleného stavu před vypnutím zdroje (ve velkých objemech se doporučuje doba buzení alespoň několik sekund). U orientační metody lze použít také krátké vybuzení nebo impulsní signál namísto přerušného šumového signálu.

Metoda integrované impulsové odezvy

Impulsovou odezvu lze získat přímo pomocí zdroje impulsu, jakým je pistole nebo jiný zdroj, který sám nedoznívá, pokud je jeho spektrum dostatečně široké. Je možné využít i jiných signálů a impulsovou charakteristiku tak získat zpětnou korelací signálu změřeného mikrofonem a signálu vstupujícího do zdroje zvuku. Pro tento způsob se využívá růžového a bílého šumu, přeladovaných harmonických signálů nebo MLS signálu (pseudonáhodný šum). Použitím těchto signálů je možné dosáhnout zlepšeného odstupu signálu od šumu. Díky tomu mohou být dynamické požadavky na zdroj podstatně nižší. Křivka poklesu se pro každé oktávové pásmo vypočítá zpětnou integrací kvadrátu impulsové odezvy. V ideálním případě, bez hluku pozadí, začíná integrace na konci impulsové odezvy a postupuje k jejímu začátku.

1.5 Kritéria akustické kvality prostoru

Kritéria pro hodnocení akustiky se dají rozdělit na subjektivní a objektivní. Protože subjektivní hodnocení jakéhokoliv prostoru neposkytuje data ke zpracování, dále se tato kapitola bude zabývat pouze objektivními parametry. Níže jsou stručně popsány vybrané parametry, které mohou sloužit k základní představě o akustice uzavřeného prostoru. Následující popisy jsou výtahem z [6].

1.5.1 Počáteční doba dozvuku EDT

Jedním z časových kritérií je počáteční doba dozvuku EDT (Early Decay Time). Stejně jako doba dozvuku RT se získává měřením ze sklonu křivek oktávového pásma integrované impulsové odezvy. Počáteční doba dozvuku EDT se získává z počátečních 10 dB poklesu a doba dozvuku RT se získává z části poklesu mezi -5 dB a -35 dB pod maximální počáteční hladinou. Doby dozvuku se z těchto sklonů vypočítají jako doby potřebné k poklesu o 60dB. Veličina EDT se lépe shoduje s vnímaným dozvukem prostoru, zatímco RT se týká fyzikálních vlastností poslechového prostoru.

1.5.2 Míra přímého zvuku C_7

Je definována poměrem energií přicházejících do 7 ms k energii od 7 ms. Udává se v decibelech a používá se k lokalizaci přímého zvuku zdroje. Její hodnotu získáme následujícím vztahem

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{7 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7} \quad [\text{dB}] \quad (1.12)$$

Hodnoty nad -15 dB připouští dobrou lokalizaci, čím více se hodnoty blíží k 0 dB, tím lepší je lokalizace zdroje zvuku.

1.5.3 Míra zřetelnosti C_{50}

Tato hodnota udává akustické kritérium srozumitelnosti pro řeč. Je definována poměrem energie přicházející do 50 ms k energii přicházející po 50 ms. Také se udává v decibelech a je dána následujícím vztahem

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \quad [\text{dB}], \quad (1.13)$$

Každá hodnota nad 0 dB v standardní místnosti ukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova. Hodnoty pod -5 dB ukazují na více odraznou místnost, než by byla vhodná pro přednes mluveného slova. Ekvivalentním parametrem je zřetelnost D_{50} , která je definována poměrem energie do 50 ms a celkové energie. Souvisejícím parametrem je také míra doznívání H , která popisuje ozvukový prostorový dojem hudebního výkonu. Počítá se pro oktávové pásmo 1000 Hz. Vzájemnou souvislost lze vyjádřit následujícím vztahem

$$H = -C_{50} \quad [\text{dB}], \quad (1.14)$$

1.5.4 Míra jasnosti C_{80}

Míra jasnosti zakotvená v normě ČSN 73 0525 [2] udává akustické kritérium pro hudbu (definována pro oktávové pásmo 1000 Hz) a je definována 10násobkem dekadického logaritmu poměru zvukové energie do 80 ms a po 80 ms. Také se udává v decibelech a je dána následujícím vztahem

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \quad [\text{dB}], \quad (1.15)$$

V současné době představuje zatím nejlepší shodu poslechového atributu „jasnost“ pro časové rozlišení tónů v rychlých hudebních pasážích. Optimální hodnoty C_{80} silně záleží na hudebním žánru, obecně lze považovat za optimální hodnoty v rozmezí 1 ± 2 dB. Rozsahy přípustných hodnot C_{80} pro jednotlivé hudební žánry jsou tyto:

- 0 ± 2 dB je ideální pro varhanní hudbu nebo dechové nástroje při pomalejším tempu,
- 2 ± 2 dB je ideální pro smyčcové nástroje a nejlépe je prezentována v sálech určených pro instrumentální hudbu, tempo je rychlejší, vhodné také pro sborový zpěv,
- 4 ± 2 dB je ideální pro drnkací a trsací nástroje, tempo je rychlejší, vhodné 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.

1.5.5 Síla zvuku G

Parametr síla zvuku je také zakotvený v normě ČSN 73 0525 a udává míru hlasitosti. Nejvíce odpovídá subjektivnímu parametru hlasitost a je dána následujícím vztahem

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_{80}}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad (1.16)$$

kde $p_A(t)$ je odezva snímaná ve volném poli v referenční vzdálenosti 10 m od všesměrového zdroje zvuku. Míra hlasitosti se udává pro jednotlivá kmitočtová pásma:

- L (low) značí průměr pro oktávová pásma se středními kmitočty 125 a 250 Hz,
- M (mid) prostý průměr pro oktávová pásma se středními kmitočty 500 a 1000 Hz,
- H (high) prostý průměr pro oktávová pásma se středními kmitočty 500 až 4000 Hz.

Optimální rozmezí pro střední pásmo je +4 až +5,5 dB.

1.5.6 Čas těžiště impulsové odezvy t_s (Center Time)

Tento parametr je úzce svázán s hodnotou C_{80} . Má vypovídající hodnotu prostorového dojmu a jasnosti pro hudbu a mluvené slovo. Je dán následujícím vztahem

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{E_{\infty}} \quad [\text{dB}] \quad (1.17)$$

Pro hudbu se hodnoty v oktávovém pásmu 1000 Hz pohybují v rozsahu 70 až 150 ms, pro řeč v oktávových pásmech 500 až 4000 Hz jsou hodnoty v rozsahu 60 až 80 ms.

1.5.7 Ztráta srozumitelnosti souhlásek AL_{cons}

Literatura [7] představuje tento parametr jako další objektivní kritérium pro posuzování kvality akustiky prostoru. Zaměřuje se na srozumitelnost řeči, hodnoty jsou udávány v procentech, přičemž čím menší procento tím lepší srozumitelnost. Tuto hodnotu je možné přibližně vypočítat následujícím vztahem

$$AL_{\text{cons}} \approx 0,652 \left(\frac{r_{zp}}{r'} \right)^2 * RT \quad [\%] \quad (1.18)$$

kde r_{zp} je vzdálenost od zdroje k posluchači [m], r' je poloměr dozvuku [m] a RT standardní doba dozvuku [s].

1.6 Akustické materiály a obklady

K dosažení potřebných úprav pro optimální dobu dozvuku se využívá pohltivosti některých materiálů a konstrukcí. Pohltivost určuje činitel zvukové pohltivosti α , který je definován následujícím vztahem (převzatý z [1])

$$\alpha = \frac{W_3}{W_1} \quad [-], \quad (1.19)$$

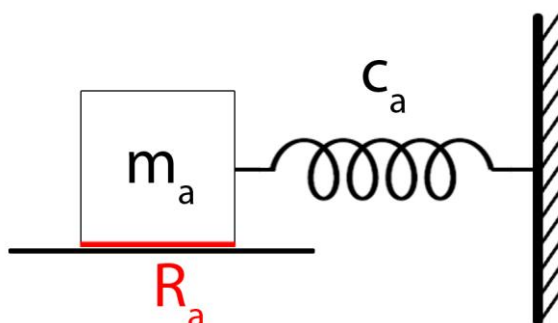
kde W_3 reprezentuje energii absorbovanou a W_1 celkovou energii dopadající zvukové vlny (grafické znázornění na **obr. 1.1**). Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která může nabývat hodnot od 0 do 1 (0 značí absolutní odraz, 1 značí absolutní pohlcení zvukové energie). Následující popisy vhodných materiálů a konstrukcí jsou výtahem z [1] a [8].

1.6.1 Porézní materiály

Jedná se o pevnou látku, v jejímž objemu jsou malé dutinky vyplněné vzduchem. Poměr objemu těchto dutinek k celkovému objemu látky bývá značný a činí asi 80 až 99 % celkového objemu. Vlastní pohlcování zvuku je přeměna akustické energie v energii tepelnou. K tomu dochází na povrchu vláken porézního materiálu třením částic vzduchu. Porézní materiály se jen zřídka používají samotné. Hlavním důvodem je nutnost použití velké tloušťky materiálu pro efektivní pohlcování na nižších kmitočtech. Dalším důvodem je jejich porézní povrch, na který se chytá prach, dále malá mechanická pevnost a tedy malá odolnost proti poškození. Ve formě klínů se používají v mrtvých místnostech, jež slouží k akustickým měřením.

1.6.2 Kmitající desky

Jedná se o obklady založené na rezonančním principu, které sestávají z akustické hmotnosti m_a , připojené na akustickou poddajnost c_a , jejíž pohyb je tlumen akustickým odporem R_a . Znázornění takové mechanické analogie je na **obr. 1.4**.



obr. 1.4: Mechanická analogie akustického rezonančního obvodu.

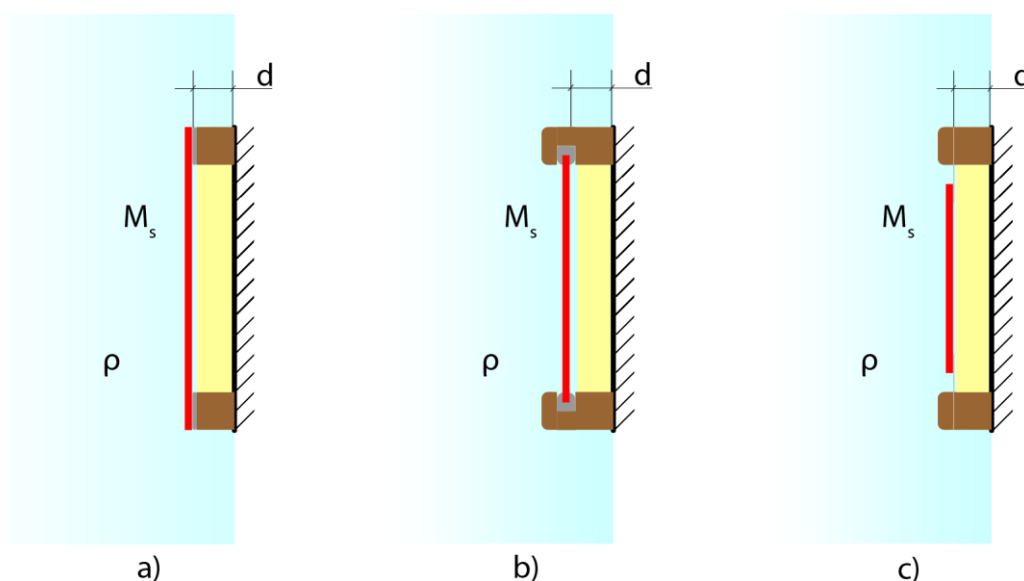
Závislost činitele zvukové pohltivosti na kmitočtu vykazuje u rezonančních soustav vždy maximum na vlastním kmitočtu soustavy.

Rezananční kmitočet kmitající desky je dán následujícím vztahem (převzatý z [9]) a platí za předpokladu, že výška vzduchového polštáře je menší než čtvrtina vlnové délky.

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{M_S d}} \quad [\text{Hz}], \quad (1.20)$$

kde c_0 reprezentuje rychlost šíření zvuku [m/s], ρ hustotu vzduchu, $1,205 \text{ kg/m}^3$ při 20°C podle [10], M_s je měrná plošná hmotnost materiálu, ze kterého je deska [kg/m^2] a d výška vzduchového polštáře [m]. Protože měrná plošná hmotnost desky je poměrně vysoká, je maximum pohlcování v oblasti nízkých kmitočtů. Kmitočtové charakteristiky jsou vzhledem k velké plošné hmotnosti velmi úzké.

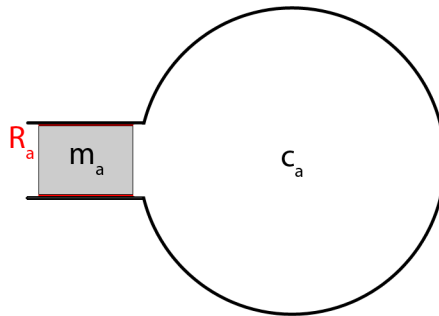
Desky jsou pružně uloženy na nosném kazetování, které vymezuje uzavřený vzduchový polštář. Pružné uložení se řeší třemi způsoby: uložení okrajů desek do plsti **obr. 1.5 a)**, pěnové gumy **obr. 1.5 b)**, nebo pomocí pásy koženky **obr. 1.5 c)**, který je přilepen k okraji desky a přichycen na kazetování. Do vzduchového polštáře se pro omezení vzniku vlastních kmitů v prostoru vkládá porézní materiál. Kmitající desky, zhotovené z překližky, sololitu, smrekolitu (dřevovláknitých desek tvrdých) mají hygienický povrch a dovolují barevné ztvárnění.



obr. 1.5: Náčrt kmitající desky s různými druhy pružného uložení a) plst', b) pěnová guma, c) pásy koženky.

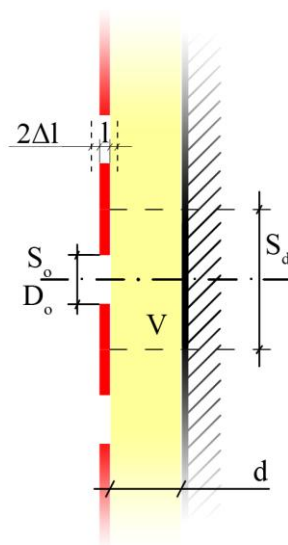
1.6.3 Helmholtzovy rezonátory

Při akustických úpravách prostorů pro účely kulturní i při akustických úpravách, směřujících ke snížení hladiny hluku v prostorách účelových se používají převážně akustické obklady, pracující na principu Helmholtzových rezonátorů. Mají obvykle tvar děrovaných desek, které představují z akustického hlediska soubor jednotlivých rezonátorů, a proti ostatním konstrukcím mají řadu výhod. Je to především možnost nastavit změnou geometrie otvorů kmitočty maximálního pohlcování v širokém pásmu kmitočtů, možnost zhotovení děrované desky z jakéhokoli materiálu, dostatečná mechanická pevnost a možnost různé povrchové úpravy. V prostorové akustice se užívá jednotlivých Helmholtzových rezonátorů (zvláště pro tlumení vlastních kmitů) rozmístěných po stěnách prostorů.



obr. 1.6: Schematicky znázorněný Helmholtzův rezonátor

Helmholtzův rezonátor, schematicky znázorněný na **obr. 1.6**, se skládá z dutiny o objemu V představující poddajnost c_a , kterou spojuje s okolním prostředím otvor o průměru D_o (plocha otvoru S_o) a délce l představující akustickou hmotnost m_a , kterému klade tření vzduchu odpor R_a . Dutinu nazýváme obvykle vzduchovým polštářem o výšce d a ploše S_d (zjednodušený náčrt ilustruje **obr. 1.7**).



obr. 1.7: Zjednodušený náčrt Helmholtzova rezonátoru v provedení s děrovanou deskou

V případě, že všechny rozměry rezonátoru jsou menší než polovina vlnové délky uvažovaného kmitočtu a plocha otvoru je menší než plocha vzduchového polštáře, lze Helmholtzův rezonátor považovat za rezonanční obvod. Za těchto podmínek dostaneme rezonanční kmitočet, pro konstrukci s jedním otvorem, vztahem

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_o}{V(l + 2\Delta l)}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.21)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s], V objem dutiny [m³], l hloubka otvoru [m] a S_o plocha otvoru [m²].

V případě děrované desky, skládající se z více otvorů a jim odpovídajícím dutinám, je rezonanční kmitočet dán vztahem

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\varepsilon}{d(l + 2\Delta l)}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.22)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s], l hloubka otvoru [m], ε činitel děrování, d výška vzduchového polštáře [m] a $2\Delta l$ korekce délky otvoru [m].

Činitel děrování ε lze získat vztahem

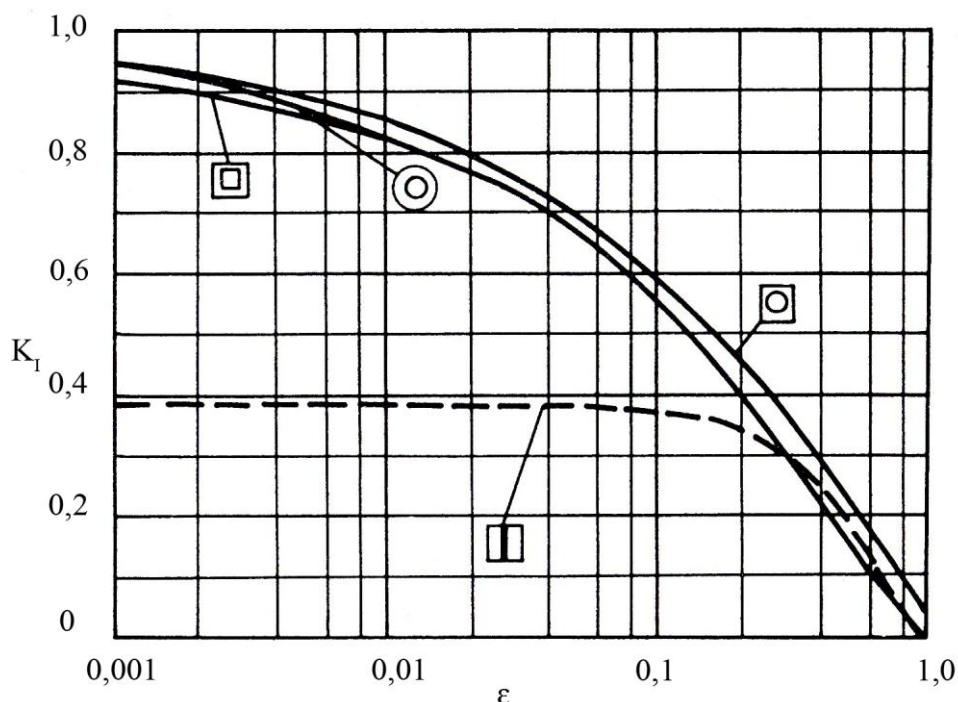
$$\varepsilon = \frac{S_o}{S_d} \quad [-] \quad (1.23)$$

kde S_o plocha otvoru [m²] a S_d plocha vzduchového polštáře [m²]

Koncová korekce $2\Delta l$ je dána vztahem

$$2\Delta l = \sqrt{S_o} K_I \quad [\text{m}] \quad (1.24)$$

kde S_o plocha otvoru [m²] a K_I hodnota odečtená z grafu na **obr. 1.8** (převzatý z [8]), na kterém jsou znázorněny průběhy pro různé tvary v závislosti na činiteli děrování ε .



obr. 1.8: Závislost koncové korekce K_I na činiteli děrování ε pro kruhové, čtvercové a obdélníkové otvory.

2 SIMULACE AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ

V současné době se při návrhu akustiky, ať už koncertních sálů, nahrávacích studií, poslucháren ve školách nebo průmyslových prostor, využívá počítačových simulací. Ty dovedou s větší či menší přesností ve výsledných datech zobrazit akustické vlastnosti prostoru. Jedním z takových programů je například program EASE, který je využit i v této práci pro nejrůznější výpočty a simulace objektivních parametrů pro hodnocení akustické kvality prostoru.

2.1 Popis prostoru

Jedná se o podkrovní prostor tří patrového řadového domu v Brně, který slouží jako nahrávací místnost studia 2000 FORZA. Budova se nachází v klidné městské části Židenice. Místnost není orientována přímo do ulice ale velmi výhodně do dvora, tím se výrazně snižuje riziko hluku z okolí. Další z velkých výhod tohoto prostoru je jeho atypický půdorys s šikmou střechou, tato skutečnost přispívá k celkové difuznosti prostoru, které se jinak dosahuje tvarovanými před-stěnami či difuzními akustickými prvky. Celkový objem místnosti je dle výpočtu z modelu 150 m³.

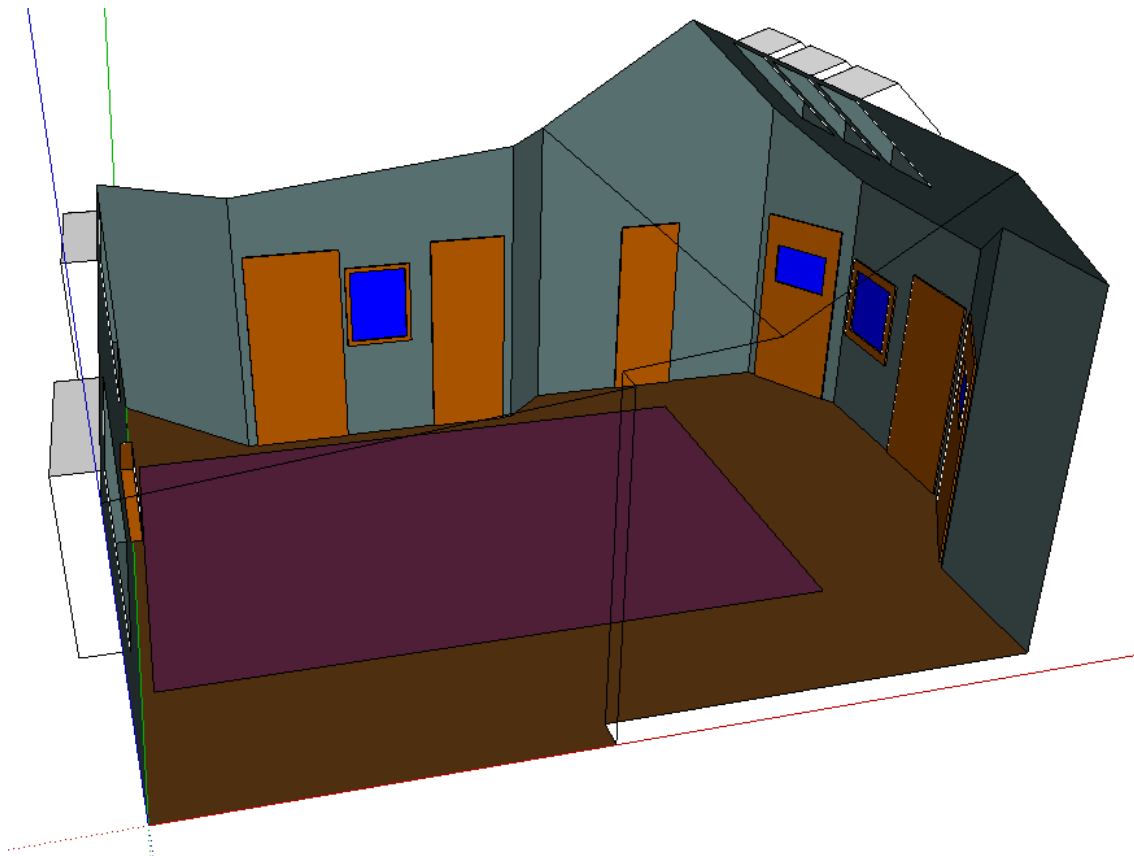
K této místnosti jsou připojeny další prostory, kterými jsou: režijní pracoviště, koupelna s WC, dvě menší zvukové kabiny, kuchyňka a schodiště. Tyto místnosti, které obklopují nahrávací místnost ze tří stran, také přispívají k útlumu okolního hluku, ty však nejsou zahrnuty ve zpracování této bakalářské práce.

2.2 3D model

Prostor, u kterého je vyžadována analýza, je nutné v první řadě vymodelovat. Prvním krokem pro vytvoření modelu je fyzické zaměření prostoru pro získání konkrétních rozměrů (stručný přehled a rozměry místnosti jsou ilustrovány v příloze). Dále se pro modelování nabízí několik možností. Samotný program EASE poskytuje modul pro modelování uzavřeného prostoru, avšak práce s ním je velmi zdlouhavá z důvodu přesné definování polohy každého bodu. Další z možností je import dat v některém z podporovaných formátů, kterými jsou soubory s koncovkou „.dxf“ či „.skp“. Zde je možné využít několik programů, které jsou schopny takový formát poskytnout. Může jimi být například program AutoCAD nebo SolidWorks. Pro účely této bakalářské práce je však použít mnohem méně sofistikovaný software a to Google SketchUp verze 8. Tento program poskytuje všechny potřebné nástroje pro vytvoření plnohodnotného 3D modelu uzavřeného prostoru, které jsou potřebné v dalších krocích definování prostoru. Práce s ním je velmi intuitivní a tím je tedy vhodný i pro uživatele, kteří nemají s programy na 3D modelování více zkušeností.

Podle zaměření před úpravou byl vypracován 3D model vnitřního prostoru (ilustruje obr. 2.1), který byl následně importován do programu EASE. Tam je nutné v prvním

kroku zkontrolovat, zda se jedná o uzavřený prostor, k tomu se využívá nástroje „Check holes“. V případě chyby, nalezení neuzavřeného prostoru, nebude možné importovaný model analyzovat.



obr. 2.1: Náhled 3D modelu prostoru vytvořeného v programu Google SketchUp

2.3 Materiály

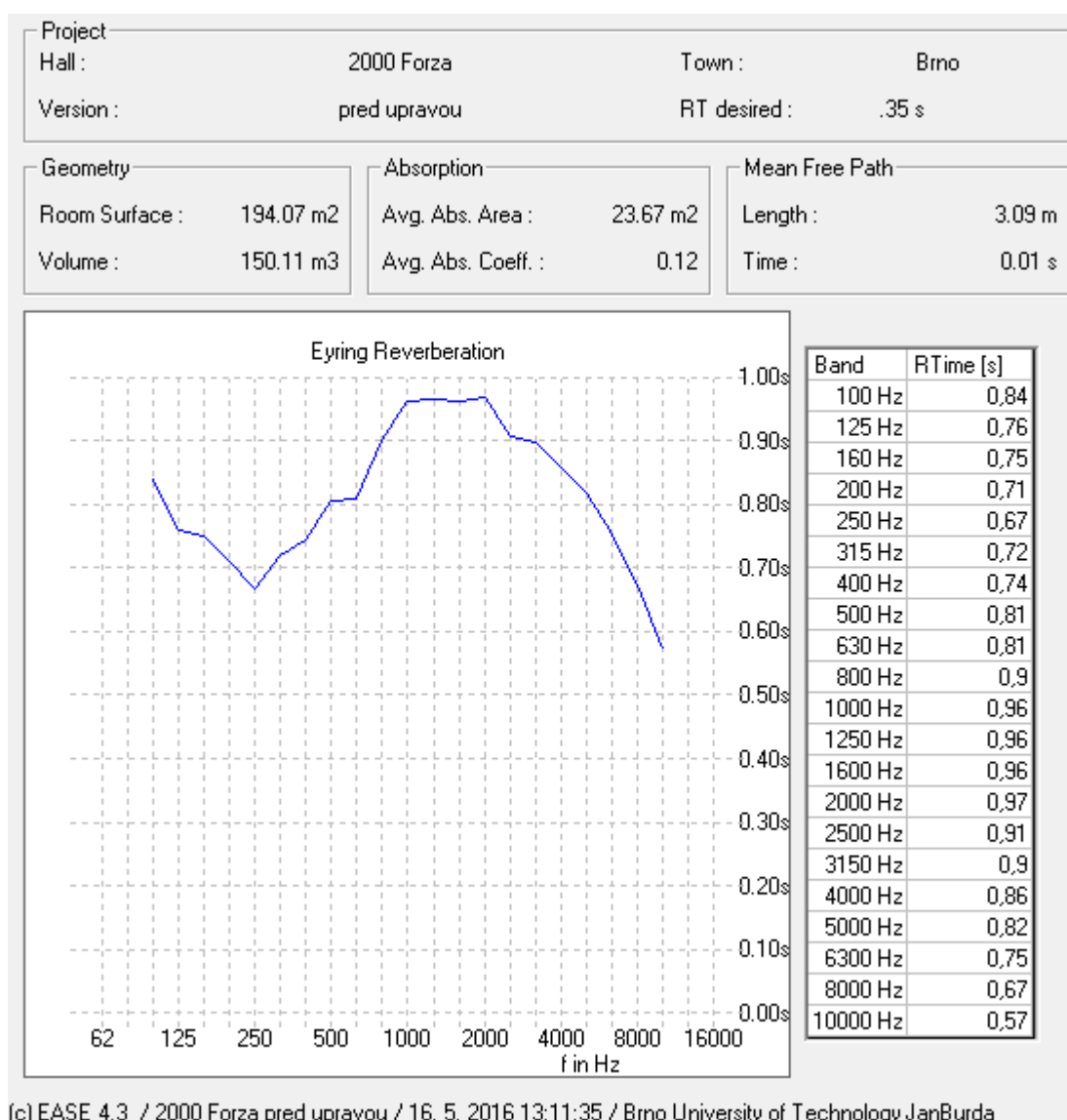
Po úspěšném importu je nutné přiřadit jednotlivým plochám materiály, tedy jejich koeficienty pohltivosti. Tyto materiály je potřeba pomoci jednoho z modulů vytvořit nebo si je vybrat z široké databáze, kterou EASE disponuje. Pro účely této bakalářské práce jsou vytvořeny. V této práci jsou použity následující:

- sádkartonová deska - obvodové stěny a strop
- parkety a koberec – podlaha
- dřevovláknitá deska – dveře, rámy oken
- sklo – okna
- akustická stěna – použitý pohlcující prvek
- KP_130 – pro simulaci kmitajících panelů s f_r 130 Hz
- HR_90, HR_60, HR_80, HR_100, HR_120 – pro simulaci helmholtzových rezonátorů s f_r 90 Hz, 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz a 120 Hz.

Jednotlivé kmitočtové závislosti činitelů pohltivosti jsou obsahem příloh. Hodnoty koeficientů pohltivosti jsou převzaty z literatury [12], [13] a [15]. Pro vytvoření materiálů akustických prvků, je využito orientační vypočítané pohltivosti.

2.4 Simulace před úpravou

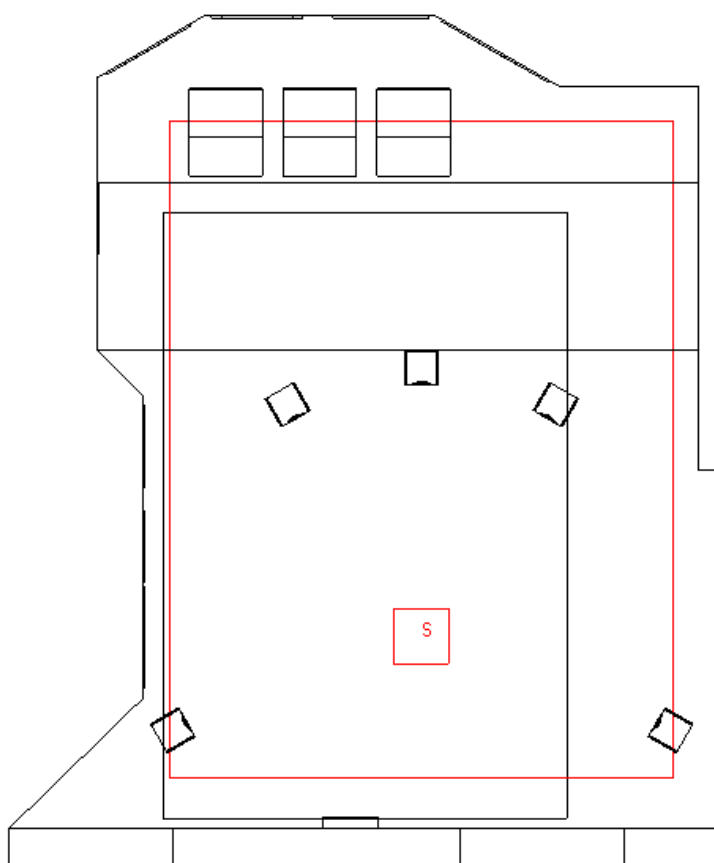
Největší význam při posuzování akustické kvality prostoru má doba dozvuku. Její kmitočtový průběh je zobrazen na obr. 2.2. Pro výpočet je možné využít dva vztahy. V tomto případě je využít Eyringův vztah. Výsledná data se při použití Sabineova vztahu liší v řádech setin sekundy.



obr. 2.2: Doba dozvuku analyzovaného prostoru před úpravou podle Eyringa

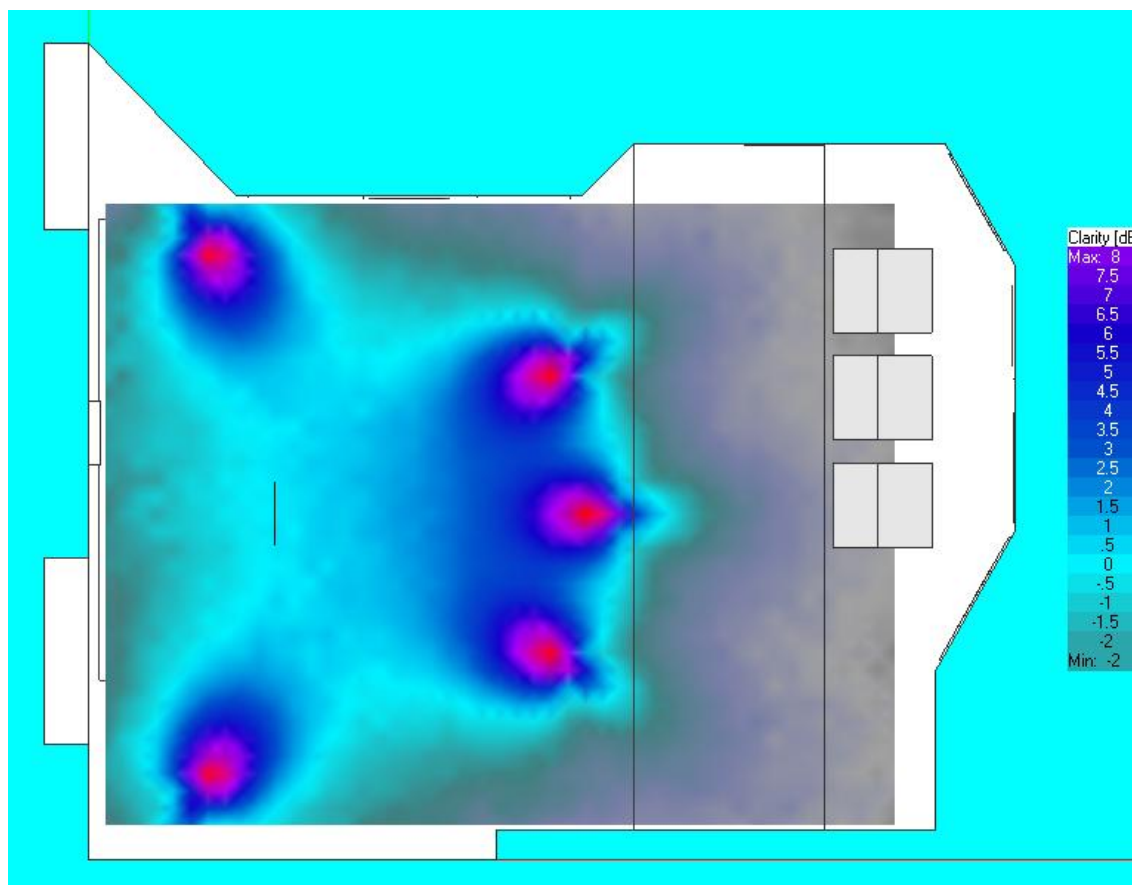
Norma ČSN 73 0526, zabývající se akustikou studií a místností pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku, neudává optimální dobu dozvuku pro místnost takového objemu (přibližně 150 m³). Po dohodě se zadavatelem práce, by se měla doba dozvuku po realizaci akustických úprav pohybovat mezi 0,3 – 0,4 s. Ze zjištěných dat je zřejmé, že zatlumit místnost bude nutné v celém kmitočtovém pásmu, nejvíce v oblasti nízkých kmitočtů.

Pro další ze simulovaných parametrů je nutné zvolit zkoumanou oblast a umístit do prostoru zdroj nebo zdroje zvuku. Vybraná oblast je zvolena s ohledem na nevytěžovanější prostor v místnosti a je umístěna ve výšce 1,5 m nad podlahou. Zdroje zvuku jsou konfigurovány pro vícekanálový poslech 5.1, přičemž umístění jednotlivých zdrojů zvuku je zvoleno s ohledem na prostorové dispozice, tedy tak, aby nezavazovaly například v otevření dveří či oken (ilustruje **obr. 2.3**). Orientace poslechu je zvolena tak, že na stěně za posluchačem je po úpravě umístěn akusticky pohltivý materiál, který omezuje odraz zvuku. Všechny zdroje jsou umístěny ve výšce 1,5 m nad podlahou a ve vzdálenosti 2,5 m od místa poslechu. Úhel, který mezi sebou svírá levý a pravý monitor se středním je 30°, levý surround a pravý surround se středním svírají úhel 110°. Pro účely simulace je z široké databáze programu EASE vybrán model studiového monitoru JBL LSR 6328P.



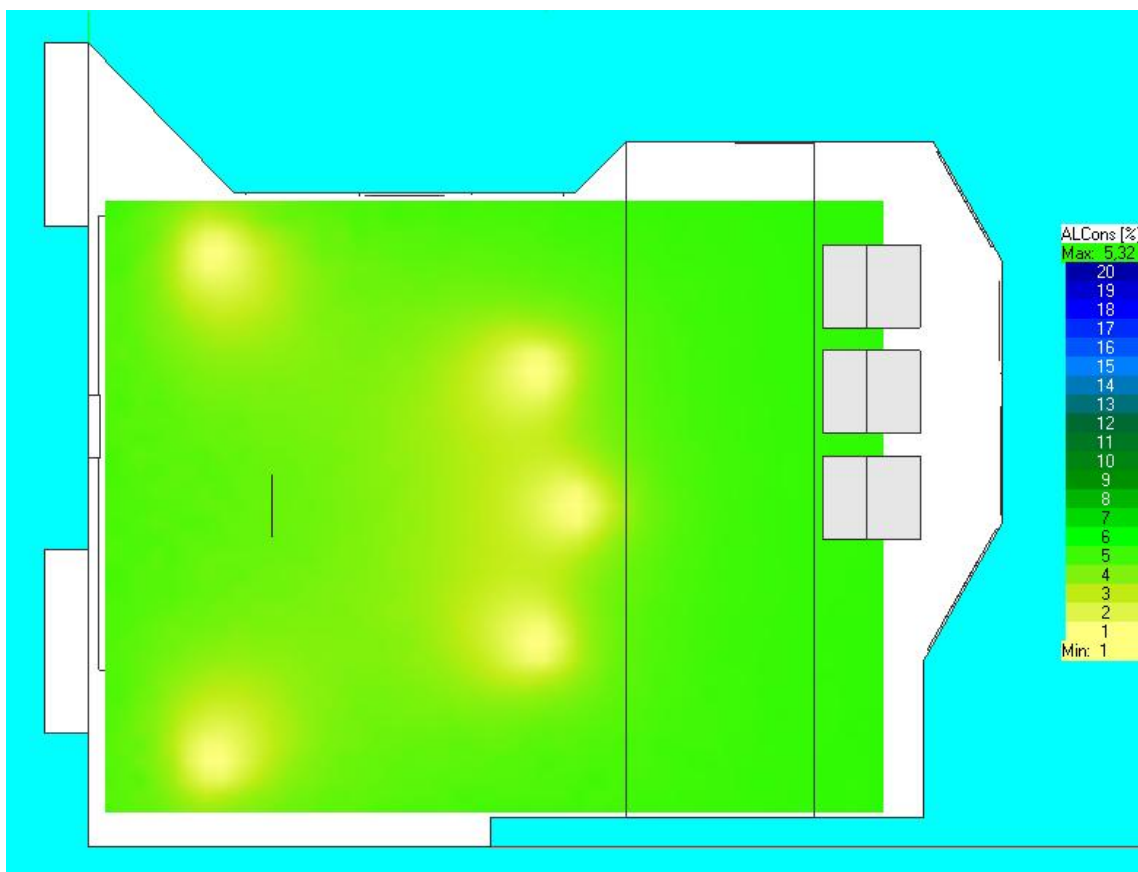
obr. 2.3: Rozmístění reproduktorů pro vícekanálový poslech

Jedním ze simulovaných parametrů je míra jasnosti – akustické kritérium využívané pro hudbu. Z následujícího obrázku (**obr. 2.4**) je možné sledovat, že v okolí poslechového místa se hodnota C_{80} pohybuje okolo 0 dB, což naznačuje nepříliš jasný poslech pro moderní hudbu, mimo poslechový prostor se jasnost poslechu ještě více zhoršuje. Kmitočtová závislost tohoto parametru je obsahem přílohy.



obr. 2.4: Simulace objektivního parametru C_{80} před úpravou

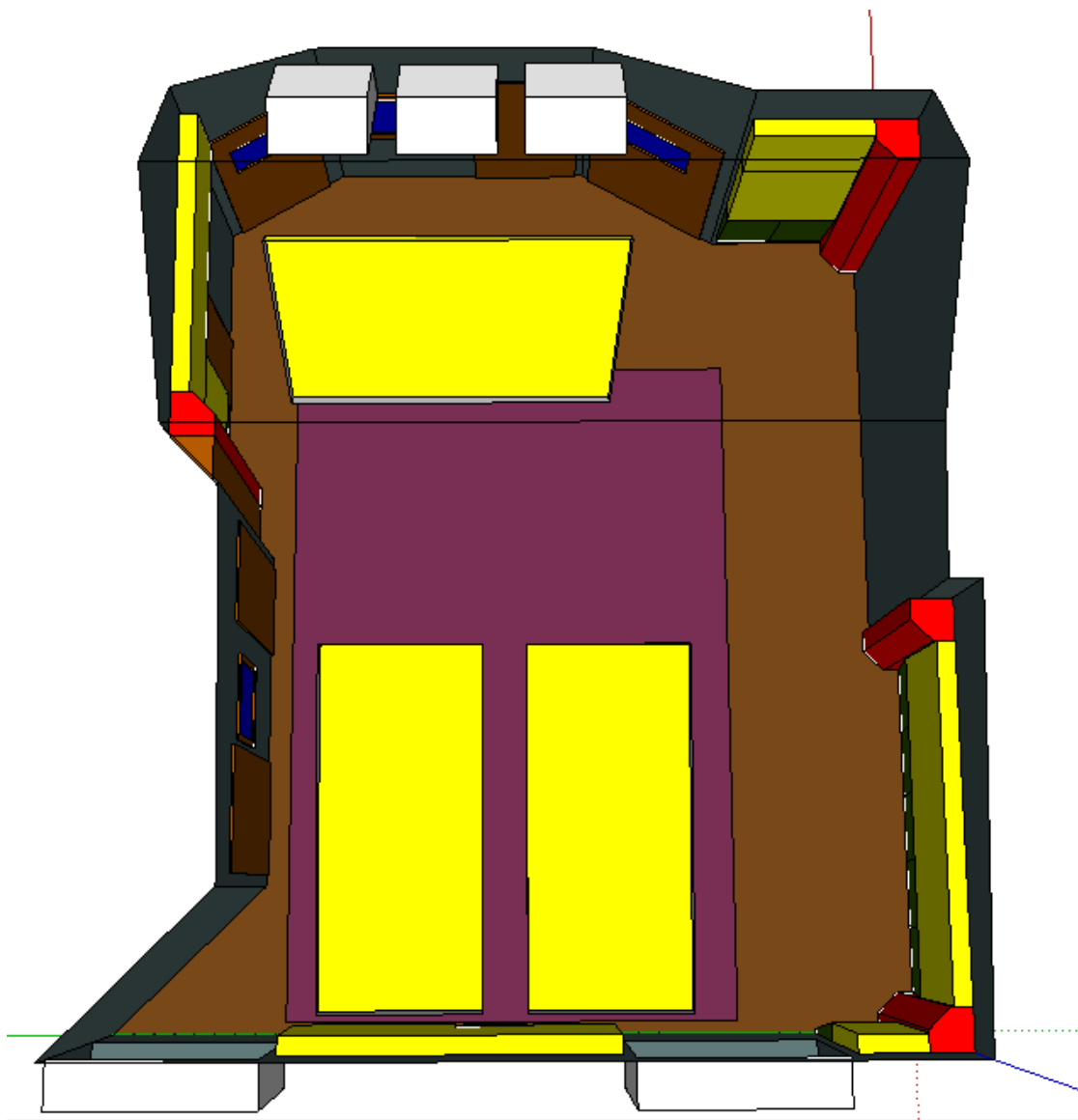
Stejným způsobem jako simulace C_{80} jsou nasimulované hodnoty AL_{cons} – parametr ztráty srozumitelnosti souhlásek. Jak je vidět z **obr. 2.5**, největší plochu zaujímá hodnota 6%. Literatura [7] udává pro hodnoty menší než 3% výbornou srozumitelnost, do které spadá jen velmi malá část prostoru v blízkosti zdrojů zvuku. Maximální i minimální hodnoty jsou obsahem grafu v příloze. Větší význam těchto simulací je po akustické úpravě prostoru.



obr. 2.5: Simulace objektivního parametru AL_{cons} před úpravou

2.5 Simulace po úpravě

Pro účely simulace byl vytvořen druhý 3D model prostoru, ve kterém jsou zakomponovány všechny akustické prvky, které byly realizovány (jejich návrh je obsahem třetí kapitoly). Rozmístění je ilustrováno na **obr. 2.6**. Červené prvky znázorňují štěrbinové rezonátory, zelené kmitající panely a žluté akustické stěny s pohltivým materiálem. Jedná se o prvky, které efektivně pohlcují kmitočty v celém slyšitelném spektru, tak aby bylo dosaženo optimální doby dozvuku, ta se díky tomu podle simulace pohybuje okolo 0,4 s. (ilustruje **obr. 2.7**). Pro výpočet je opět použit Eyringův vztah. Z výsledku je patrné, že doba dozvuku je téměř v celém spektru pod horní mezí, avšak na nízkých kmitočtech strmě stoupá a v oblasti nejnižších kmitočtů ji překračuje. Tyto výpočty je vhodné porovnat s naměřenými hodnotami, které více se více shodují se skutečnými hodnotami doby dozvuku v uvažovaném prostoru.



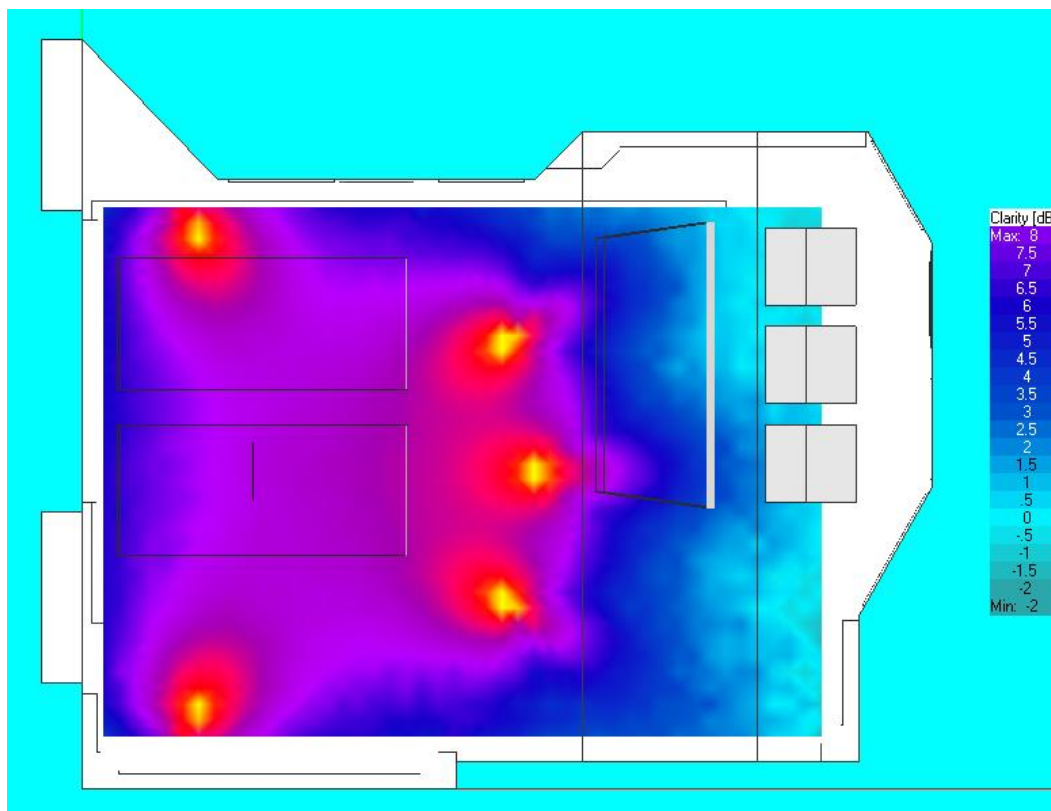
obr. 2.6: Rozmístění akustických prvků v prostoru



obr. 2.7: Simulovaná doba dozvuku po akustické úpravě

Jak je dále možné sledovat na **obr. 2.8**, míra jasnosti se v poslechovém prostoru po úpravě pohybuje mezi 6 dB – 8 dB. Takové hodnoty odpovídají velmi dobré míře jasnosti poslechu pro současnou moderní hudbu, rock and roll a nástroje s perkusním průběhem tónu, proto se dají tyto hodnoty považovat za velmi uspokojivé. Kmitočtová závislost C_{80} je obsahem příloh.

Podobně tomu je i u simulace parametru AL_{cons} , kterou ilustruje **obr. 2.9**. Zde se na téměř celé ploše rozléhá hodnota mezi 1% - 2%. Tyto hodnoty prezentují výbornou srozumitelnost řeči. Graf s maximální i minimální hodnotou je obsahem příloh.



obr. 2.8: Simulace C_{80} po akustických úpravách



obr. 2.9: Simulace AL_{cons} po akustických úpravách

3 NÁVRH AKUSTICKÝCH OBKLADŮ

Při návrhu akustických obkladů založených na principu jednoduchého rezonančního obvodu se vychází z předpokladů kolmého dopadu zvuku, malých rozměrů vůči polovině vlnové délky u rezonančního kmitočtu a ze zanedbání posunu rezonančního kmitočtu vlivem tlumení. Užití těchto předpokladů je z důvodu, že pochody v rezonátoru umístěném v akustickém poli třírozměrného prostoru, při všesměrovém dopadu vln, jsou natolik složité, že jejich řešení není možné a není při návrhu konstrukcí pro praktickou aplikaci ani účelné [8].

3.1 Kmitající panel

Pro návrh KP je použita deska materiálu MDF o tloušťce 3 mm. Materiál MDF – Medium Density Fibreboard, čili polotvrdá dřevovláknitá deska, se vyznačuje vyšší objemovou hustotou, než má například dřevotříska či OSB deska, a to 770 kg/m^3 (střední hodnota podle [14]). Tento materiál je snadno opracovatelný, má vysokou mechanickou pevnost a dovoluje téměř jakoukoliv barevnou úpravu. Tím se jeví jako ideální materiál pro použití na akustické interiérové prvky.



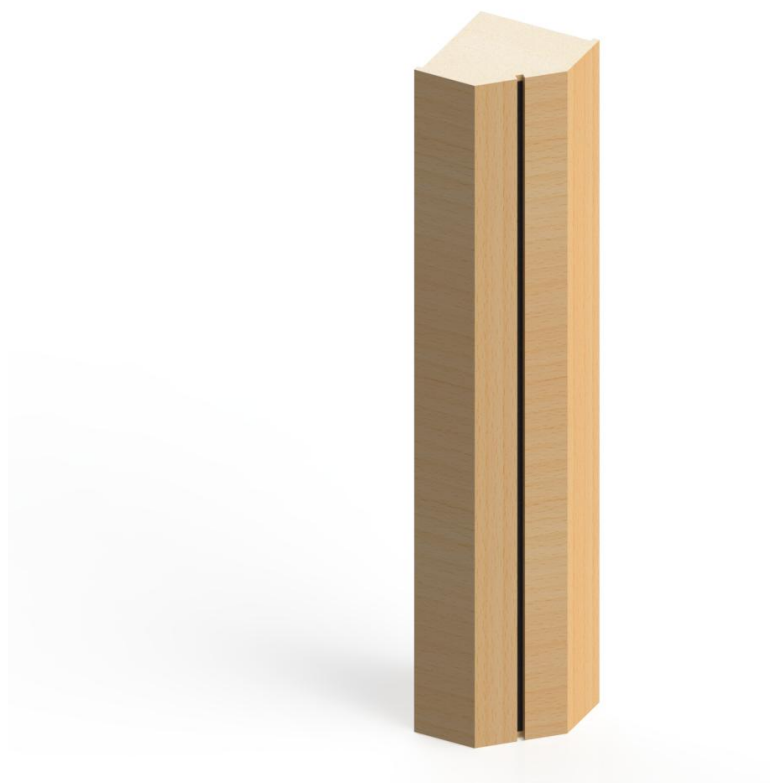
obr. 3.1: Model navrženého kmitajícího panelu v programu SolidWorks

Ze znalosti objemové hmotnosti, lze vypočítat plošnou hmotnost desky o tloušťce 3 mm, která je potřebná pro výpočet rezonančního kmitočtu panelu. V tomto případě bude M_S rovna $2,31 \text{ kg/m}^2$. Druhým parametrem, kterým lze ovlivnit rezonanční kmitočet je výška vzduchového polštáře. Tato hodnota je zvolena s ohledem na f_r uvedený v zadání bakalářské práce. Při volbě velikosti vzduchového polštáře 9,5 cm vychází rezonanční kmitočet 128,03 Hz (model KP ilustruje **obr. 3.1**). V tomto případě, kdy se jedná o šikmý KP, je hloubka vzduchového polštáře střední hodnotou mezi 15 cm a 4 cm. Vedle funkce pohlcování zvuku na rezonančním kmitočtu, mají šikmé

kmitající panely také funkci směřování odrazu zvuku, právě v závislosti na konstrukci a montáži prvku v prostoru. Takto realizovaných panelů s různou šířkou je použito celkem dvanáct kusů. Pro výpočty je použito tabulkového editoru Microsoft Excel. Dokument s výpočty (obsahuje také orientační kmitočtovou závislost činitele zvukové pohltivosti vypočítanou podle ilustrace z [13]) i nákres s rozměry panelu jsou obsahem přílohy. Kmitající panely se v praxi tlumí minerální vlnou vloženou do vzduchového polštáře, aby nedocházelo k vlastním kmitům vnitřního prostoru. Z hygienických důvodů je vata zabalena do igelitové folie.

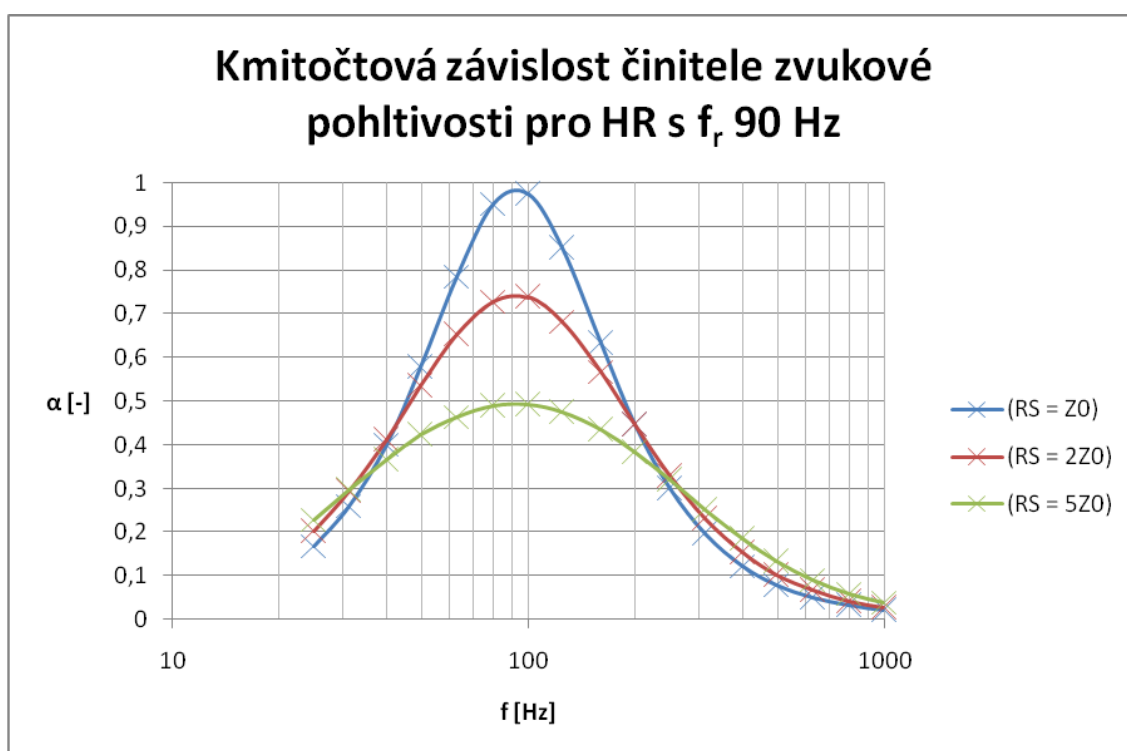
3.2 Helmholtzovy rezonátory

Při konstrukci HR není třeba brát příliš velké ohledy na materiál, ze kterého je prvek vyroben, protože neovlivní změnu rezonančního kmitočtu. Stejně jako KP je i HR dostatečně mechanicky pevný a má široké možnosti povrchové úpravy. V návrhu rezonátorů, které jsou obsahem této práce, je použit na konstrukci materiál MDF o tloušťce 18 mm a pro tlumení minerální vata „Isover Akustik Platte“ síly 30 mm. Jedná se o jednostranně kaširovanou desku tmavou netkanou textilií. Ta zaručuje vyhovující hygienické vlastnosti. Rezonátory v tomto případě nejsou tvořeny děrovanou deskou, ale mají jednu průběžnou štěrbinu s různou šířkou v závislosti na požadovaném rezonančním kmitočtu. Pro první fázi úprav byl navrhnut jeden model rezonátoru s rezonanční frekvencí 90 Hz. Tento je použit ve čtyřech rozích místnosti. Model štěrbinového dutinového rezonátoru s f_r 90 Hz je ilustrován na **obr. 3.2**.



obr. 3.2: Model navrženého rezonátoru v programu SolidWorks

Jak popisuje literatura [8], výslednou kmitočtovou charakteristiku činitele zvukové pohltivosti ovlivňuje tlumení rezonátoru, tedy reálná složka akustické impedance vzhledem k vlnovému odporu zvuku ve vzduchu. V případě rovnosti těchto hodnot dochází k tzv. ideálnímu přizpůsobení, kdy činitel zvukové pohltivosti dosahuje na rezonančním kmitočtu hodnoty 1. Se zvyšujícím se poměrem akustické impedance materiálu k akustickému odporu vzduchu klesá hodnota činitele zvukové pohltivosti a rozšiřuje se kmitočtové pásmo efektivního pohlcování. Toto ilustruje graf na **obr. 3.3**, kde je vynesena orientační závislost α na kmitočtu, konkrétně pro navržený rezonátor s f_r 90 Hz, kde R_S je akustický odpor materiálu a Z_0 akustická impedance vzduchu. Detailní výpočet podle vztahu z [8] je obsahem příloh. Aby nedošlo ke kritickému zatlumení, vkládá se mezi porézni materiál a přední desku rezonátoru distanční mřížka, která může být realizovaná ze zvlněného drátěného pletiva. Skutečnou kmitočtovou závislost činitele zvukové pohltivosti HR i KP je však možné získat pouze měřením v dozvukové místnosti.



obr. 3.3: Orientační kmitočtová závislost α pro různá tlumení rezonátoru.

Příklad výpočtu parametrů šterbinového dutinového rezonátoru s f_r 90 Hz:

Vnitřní rozměry dutiny rezonátoru:

- výška 1,934 m
- plocha podstavy 0,076 m²

Z těchto hodnot se dopočítá objem dutiny V 0,147 m³. V tomto případě se jedná o

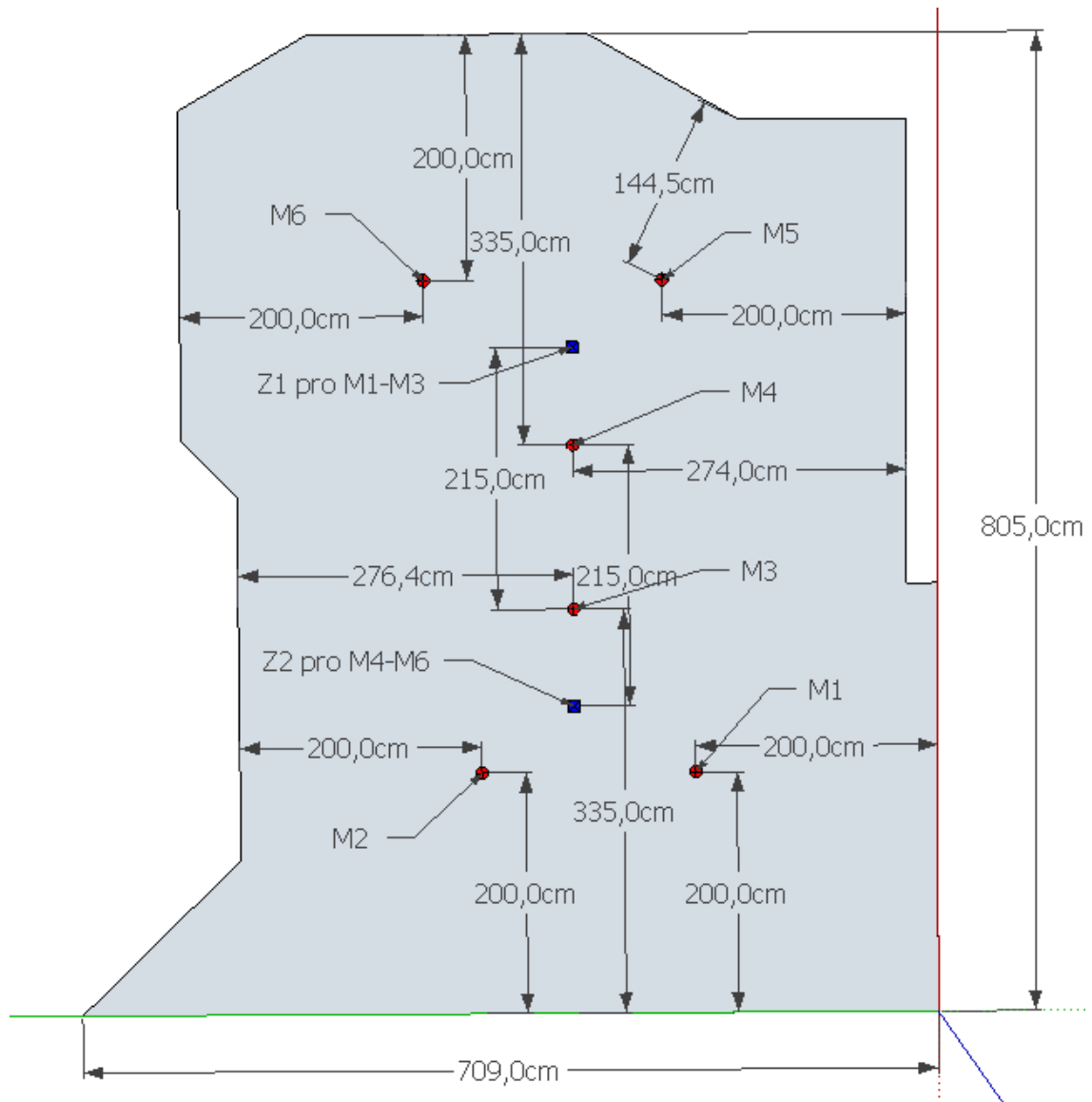
průběžnou štěrbinu, její délka je 1,934 m, šířka 0,02 m (experimentálně zvolena za pomoci dokumentu vytvořeného v tabulkovém editoru programu Microsoft Excel). Výsledná plocha štěrbiny je S_0 0,039 m². Hloubka štěrbiny l je zvolena silou materiálu použitého na přední stěnu rezonátoru, tedy 0,018 m. Dále je z grafu uvedeného na **obr. 1.8** odečten korekční činitel K_l pro otvor tvaru štěrbiny, ten je v tomto případě 0,38. Koncová korekce délky otvoru $2\Delta l$ je poté 0,075 m. Za těchto zvolených a dopočítaných parametrů vyjde rezonanční kmitočet f_r 92,2 Hz.

3.3 Akustické stěny

Pro efektivní pohlcování zvuku středních a vyšších kmitočtů je využito desek Ecophon Akusto Wall [15]. Kmitočtová závislost činitele zvukové pohltivosti je obsahem přílohy. Tato deska je zhotovena ze zhuštěného skelného vlákna. Pohledová plocha je ze sklovláknité tkaniny, tu je možné vybrat v mnoha barvách. Síla desky je 40 mm a dodává se v délce 2700 mm a šířce 1200 mm. Vzhledem k materiálu, ze kterého je vyrobena je možné ji snadno tvarovat do požadovaných ploch. Tyto desky jsou pro montáž uloženy do dřevěného obložení. V menších i větších plochách jsou použity na obložení obvodových stěn a k tomu jsou tři velké panely instalovány na strop místnosti. Celková plocha takto použitých akustických stěn v prostoru je necelých 21 m².

4 MĚŘENÍ

Měření doby dozvuku bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 3382-2. Měření probíhalo za pomoci metody integrované impulsové odezvy s inženýrskou metodou přesnosti. Přesné rozmístění zdroje zvuku a mikrofonu je ilustrováno na **obr. 4.1**.



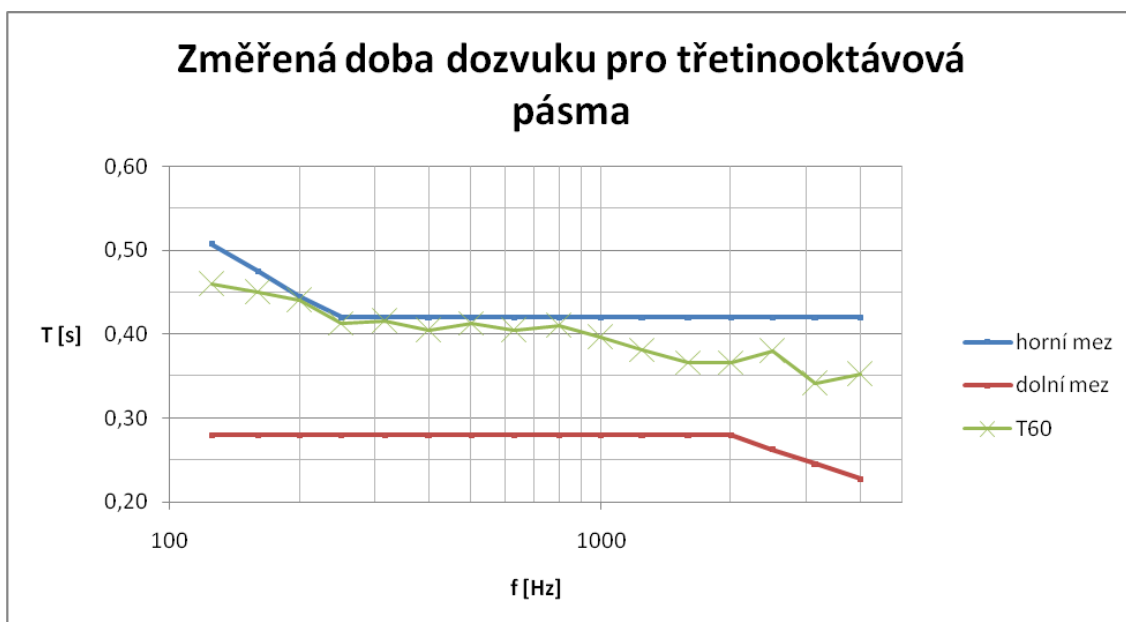
obr. 4.1: Rozmístění zdrojů a mikrofonů pro měření doby dozvuku

Jako zdroj zvuku bylo použito aktivního reproduktoru dB Technologies Opera Lyric 412 v kombinaci s aktivním subbasem dB Technologies Stage Opera 41-15. Měřicím mikrofonem byl mikrofon Beyerdynamic MM 1, umístěný ve výšce 1,5 m nad podlahou. Nejmenší vzdálenost zdroje a měřícího mikrofonu je 2,15 m, tato hodnota splňuje podmínku popsanou v [5], protože podle vztahu (1.8) má být vzdálenost větší než 2,055 m. Měřící mikrofon i zdroj byly připojeny k notebooku pomocí zvukové karty

Aubion X8, která je doporučována výrobcem měřícího softwaru, použitého pro zpracování této bakalářské práce, EASERA v1.2. Využitým signálem pro měření byl MLS signál, generovaný ze zmiňovaného softwaru. Protokol o měření je součástí příloh a je zpracovaný dle [5].

4.1 Vyhodnocení a interpretace výsledků měření

Graf na obr. 4.2 obsahuje vynesenu kmitočtovou závislost doby dozvuku pro třetinooktávová pásma. Hodnoty jsou importovány z programu EASERA, zprůměrovány ze všech šesti bodů měření a přehledně zpracovány v příloženém dokumentu vytvořeném s pomocí tabulkového editoru Microsoft Excel. Součástí dokumentu je také grafické znázornění doby dozvuku pro oktávová pásma a porovnání hodnot C_{80} .



obr. 4.2: Kmitočtová závislost změřené doby dozvuku

Je patrné, že změřená doba dozvuku se pohybuje pod horní hranicí přípustnou pro dobu dozvuku se střední hodnotou 0,35 s, která byla zvolena podle platné ČSN 73 0526 [3]. V porovnání se simulací doby dozvuku jsou hodnoty mírně vyšší, mimo nejnižší kmitočty, které jsou více vyrovnané a nepřesahují horní mezní hranici. Z toho důvodu, že není možné vložit do simulace všechny detaily prostoru a kmitočtová závislost činitele zvukové pohltivosti je u akustických prvků orientačně vypočítaná a nezměřená, je kladeno většího důrazu právě na změřené hodnoty. Součástí vytvořeného dokumentu se změřenými hodnotami jsou také výpočty střední hodnoty, rozptylu a směrodatné odchylky podle vztahů (1.9), (1.10) a (1.11).

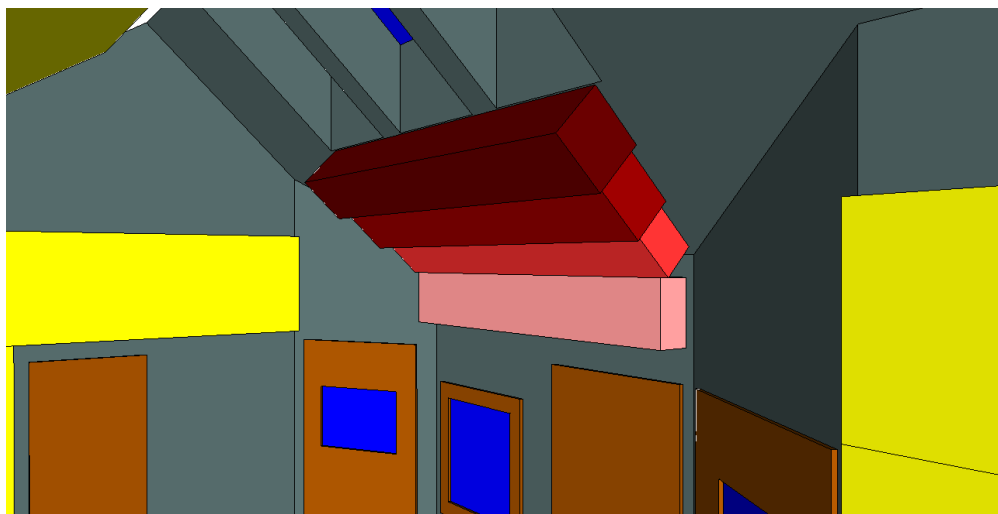
Jak je dále možné sledovat z grafu na **obr. 4.3**, kmitočtová závislost míry jasnosti je oproti nasimulovaným hodnotám také více vyrovnaná a pohybuje se v rozmezí 6 ± 2 dB, což jsou ideální hodnoty pro poslech moderní hudby. Ze stejných důvodů, které jsou uvedeny v předešlém odstavci, je větší význam přikládán změřeným hodnotám.



obr. 4.3: Změřená kmitočtová závislost C_{80}

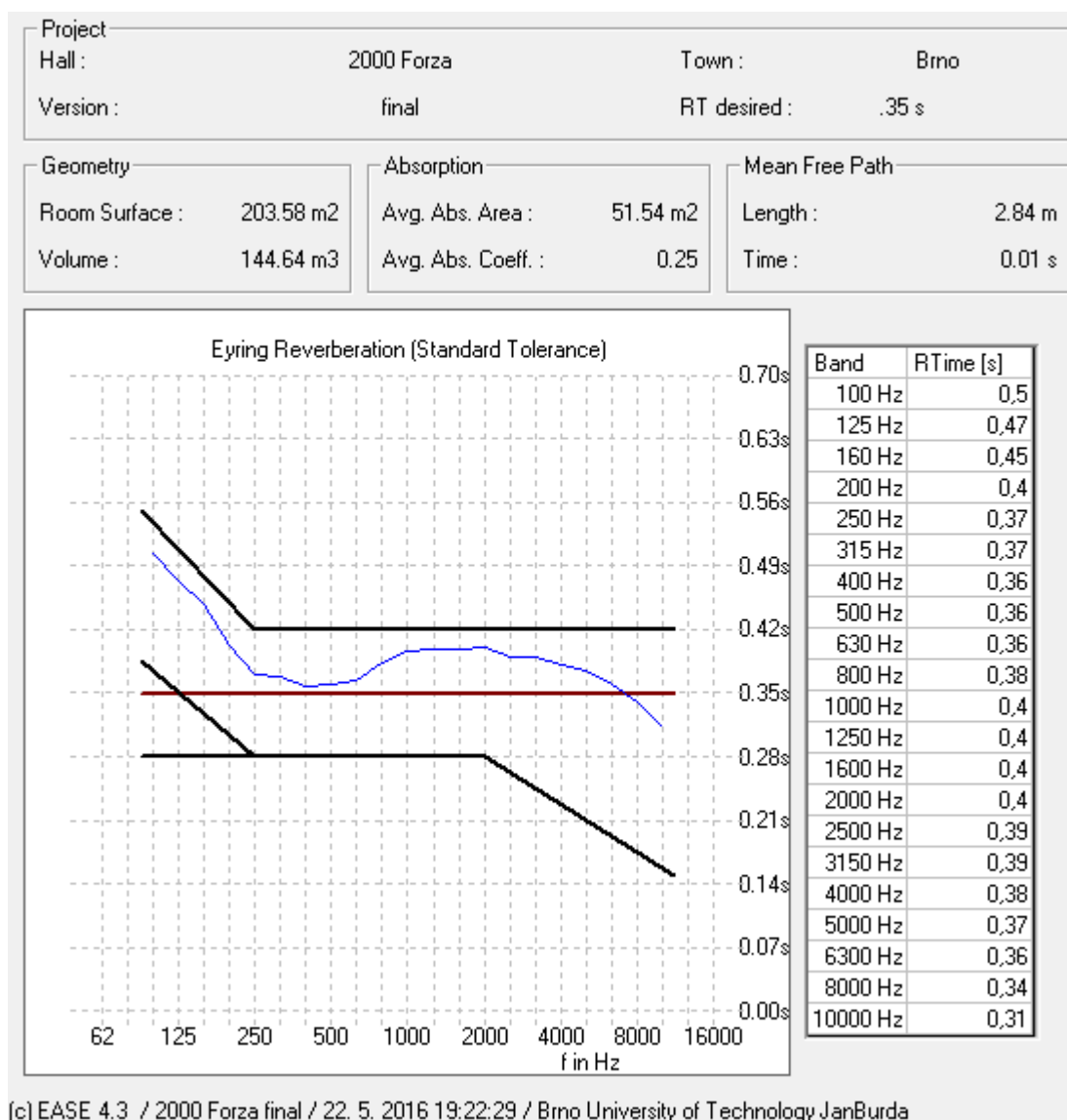
4.2 Návrh dodatečného řešení

Aby bylo dosaženo ještě vyrovnanější doby dozvuku na všech kmitočtech, je navrženo dodatečné řešení v podobě Helmholtzových rezonátorů s rezonančními frekvencemi 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz a 120 Hz. Jejich návrh a výpočty jsou uvedeny ve vytvořeném dokumentu, který je součástí přílohy. Takto navržené rezonátory jsou pro simulaci umístěny do volného prostoru nad vchodové dveře (ilustruje **obr. 4.4**). Zde je možné využít prostoru pro umístění rezonátorů s nejnižšími rezonančními frekvencemi, které vyžadují pro svoji konstrukci větší rozměry, především hloubku.



obr. 4.4: Návrh dodatečného akustického řešení

Simulace doby dozvuku v programu EASE po takto provedené úpravě potvrzuje snížení dozvuku na nejnižších kmitočtech (ilustruje **obr. 4.5**) a dá se očekávat, že po měření by doba dozvuku byla vyrovnaná. Takové řešení bude předloženo a konzultováno s investorem.



obr. 4.5: Simulovaná doba dozvuku po dodatečných úpravách

5 ZÁVĚR

Tato práce si za cíl stanovila rozbor zadaného prostoru z pohledu akustika a následný návrh úprav. Pro pochopení problematiky prostorové akustiky, práce obsahuje dostatečně rozsáhlou kapitolu zabývající se potřebnou teorií.

Součástí práce je vytvoření 3D modelu prostoru, který je možné importovat do programu EASE a v něm tento prostor analyzovat z pohledu akustických vlastností. V programu byla zjištěna doba dozvuku a provedeno několik simulací objektivních kritérií pro posuzování prostorové akustiky.

Na základě získaných dat bylo navrženo akustické řešení prostoru pro optimalizaci doby dozvuku a poslechových podmínek pro vícekanálový poslech 5+1. Řešení obsahuje návrh akustických obkladů pracujících na rezonančním principu a to konkrétně návrh kmitajícího panelu s f_r 130 Hz a dutinového rezonátoru s f_r 90 Hz, které jsou vhodné pro tlumení nízkých frekvencí. Řešení je rozšířeno také o akustické stěny, které efektivně pohlcují zvuk na středních a vyšších frekvencích. Takto upravený prostor byl znovu analyzován a simulace ukázaly, že prostor bude mít optimální akustické vlastnosti dle ČSN 73 0526.

Po realizaci bylo provedeno měření doby dozvuku metodou integrované impulsové odezvy s inženýrskou metodou přesnosti. Měření je platné dle ČSN EN ISO 3382-2 a podle této normy byl také vyhotoven protokol o měření. Naměřené hodnoty se od simulace liší v řádu setin sekundy, na nejnižších frekvencích téměř o jednu desetinu sekundy. To může být způsobeno zejména orientační kmitočtovou závislostí koeficientu pohltivosti navržených akustických obkladů, která byla použita pro simulace. Z toho důvodu je kladen větší důraz na změřené hodnoty. I když je kmitočtová závislost doby dozvuku na nízkých kmitočtech v přípustných mezích, pro dosažení větší vyrovnanosti je navrženo dodatečné řešení v podobě štěrbinových dutinových rezonátorů s rezonančními frekvencemi 60 Hz, 80 Hz, 100 Hz a 120 Hz. Takový návrh bude konzultován s investorem a v případě dohody bude v dohledné době také realizován.

Bakalářská práce byla splněna ve všech bodech zadání. Závěrečným měřením je možné posoudit přínos simulačních programů pro návrh nových, či úpravu stávajících prostorů, které mají své využití pro přednes, snímání, zpracování či kontrolu mluveného slova a hudby.

LITERATURA

- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980, 242 s.
- [2] ČSN 73 0525: *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, 1998, 20 s.
- [3] ČSN 73 0526: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku*. Praha: Český normalizační institut, 1998, 12 s.
- [4] ČSN 73 0527: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. Praha: Český normalizační institut, 2005, 16 s.
- [5] ČSN EN ISO 3382-2: *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 20s.
- [6] *Akustické listy: Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů* [online]. 2005, 11(5) [cit. 2015-12-10]. ISSN 1212-4702. Dostupné z: <http://www.czakustika.cz/listy/casopis/11-3.pdf>
- [7] EVEREST, F a Ken C POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. 5th ed. /. New York: McGraw-Hill, 2009, xviii, 510 p. ISBN 0071603328.
- [8] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Praha: Výzkumný ústav zvukové, obrazové a reprodukční techniky, 1971, 256, [1] s.
- [9] COX, Trevor J a Peter D'ANTONIO. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2009, xvii, 476 p. ISBN 0203893050.
- [10] Air properties. *The Engineering Toolbox*. [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html
- [11] Speed of Sound in Air. *The Engineering Toolbox*. [online]. [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/air-speed-sound-d_603.html
- [12] ČECHURA, Jiří. *Stavební fyzika 10: akustika stavebních konstrukcí*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1997, 173 s. ISBN 80-01-01593-9.
- [13] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 1998, 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [14] Kalkulačka - Velkoplošné materiály. *DREVARI* [online]. [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://www.drevari.cz/calc-large-volume-weight.php>
- [15] Akusto™ Wall A. *Ecophon* [online]. Hyllinge [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.ecophon.com/cz/vyrobky/Vertik-ln--instalace/Akusto/Akusto--Wall-A/>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$2\Delta l$	koncová korekce délky otvoru
AL_{cons}	parametr ztráty srozumitelnosti souhlásek
a	střední hodnota
c_0	rychlost šíření zvuku ve vzduchu
C_7	parametr míry přímého zvuku
C_{50}	parametr míry zřetelnosti
C_{80}	parametr míry jasnosti
c_a	akustická poddajnost
d	výška vzduchového polštáře
D	rozptyl
D_{50}	parametr zřetelnosti
D_o	průměr otvoru
EDT	Early Decay Time, počáteční doba dozvuku
ε	činitel děrování
f	frekvence
f_k	kritický kmitočet
f_r	rezonanční kmitočet
G	parametr síly zvuku
H	parametr míry dozívání
HR	Helmholtzův rezonátor
K_I	korekční činitel
KP	kmitající panel
l	délka otvoru
L	celková délka všech hran
m_a	akustická hmotnost
M_S	měrná plošná hmotnost
n	index, celé číslo
$N(f)$	počet vlastních kmitů
r'	poloměr dozvuku
R_a	akustický odpor
R_S	akustický odpor materiálu

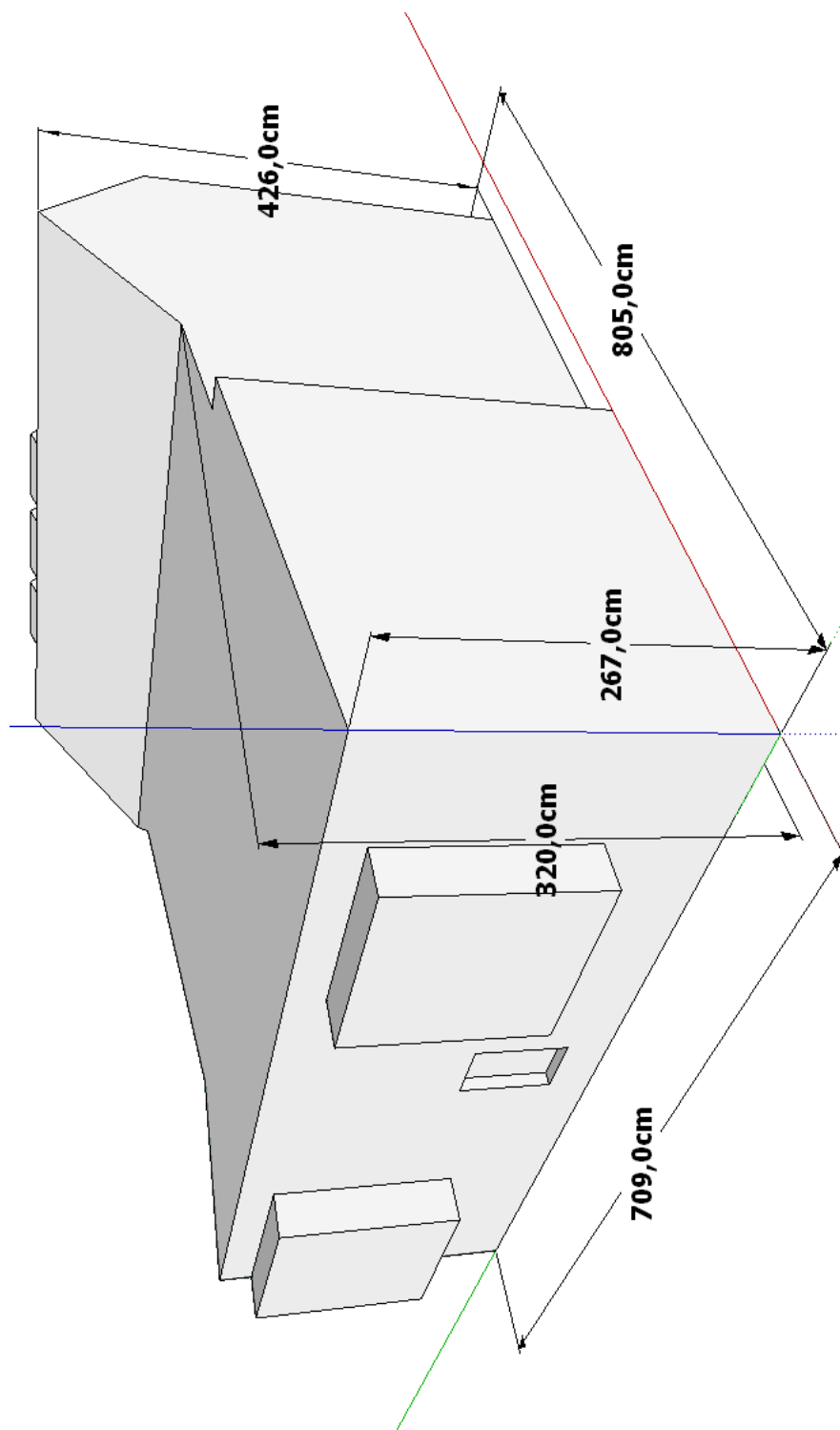
RT	Reverberation Time, doba dozvuku
r_{zp}	vzdálenost posluchače od zdroje
S	plocha
S_o	plocha otvoru
S_d	plocha vzduchového polštáře
t_s	Center Time, čas těžiště impulsové odezvy
T_{60}	standardní doba dozvuku
T_E	doba dozvuku podle Eyringa
T_M	doba dozvuku podle Millingtona
T_S	doba dozvuku podle Sabina
V	objem
W	energie zvukové vlny
Z_0	akustická impedance vzduchu
α	koeficient pohltivosti, úhel
β	úhel
Υ	úhel
σ	směrodatná odchylka
ρ	hustota vzduchu

SEZNAM PŘÍLOH

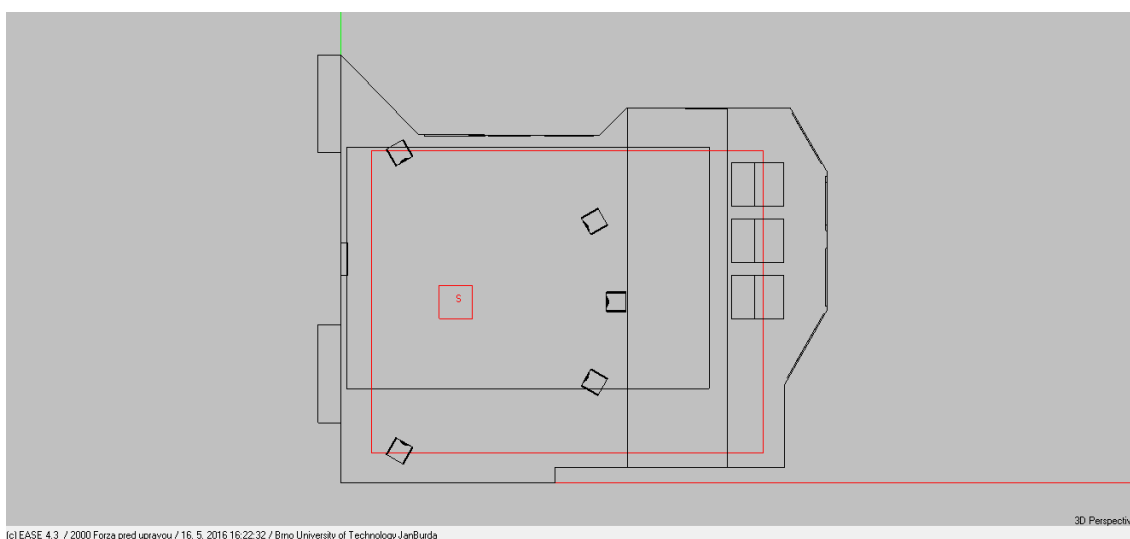
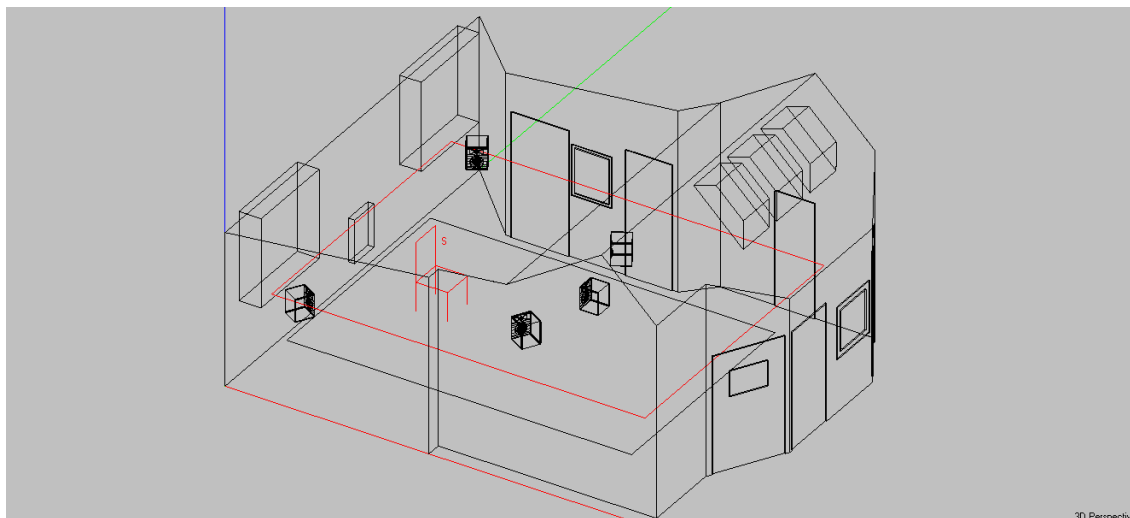
A	Náhled a rozměry místnosti	39
A.1	Stručný přehled o rozměrech místnosti	39
A.2	Náhledy prostoru po importu do EASE před úpravou.....	40
A.3	Náhledy prostoru po importu do EASE po úpravě.....	41
B	Vytvořené materiály pro simulace	42
B.1	Sádkartonová deska	42
B.2	Parkety	43
B.3	Koberec	44
B.4	Dřevovláknitá deska měkká.....	45
B.5	Sklo	46
B.6	Akustická stěna	47
B.7	Kmitající panel s f_r 130 Hz	48
B.8	Helmholtzův rezonátor s f_r 90 Hz	49
B.9	Helmholtzův rezonátor s f_r 60 Hz	50
B.10	Helmholtzův rezonátor s f_r 80 Hz	51
B.11	Helmholtzův rezonátor s f_r 100 Hz	52
B.12	Helmholtzův rezonátor s f_r 120 Hz	53
C	Grafy simulací před úpravou	54
C.1	Kmitočtová závislost C_{80}	54
C.2	Hodnoty AL_{cons}	54
D	grafy simulací po úpravě	55
D.1	Kmitočtová závislost C_{80}	55
D.2	Hodnoty AL_{cons}	55
E	Přílohy na CD	56
E.1	Modely prostoru v programu Google SketchUp.....	56
E.2	Projekt programu EASE s vytvořenými materiály	56
E.3	Dokumenty s výpočty a výkresy KP a HR	56
E.4	Data a protokol o měření doby dozvuku.....	56

A NÁHLED A ROZMĚRY MÍSTNOSTI

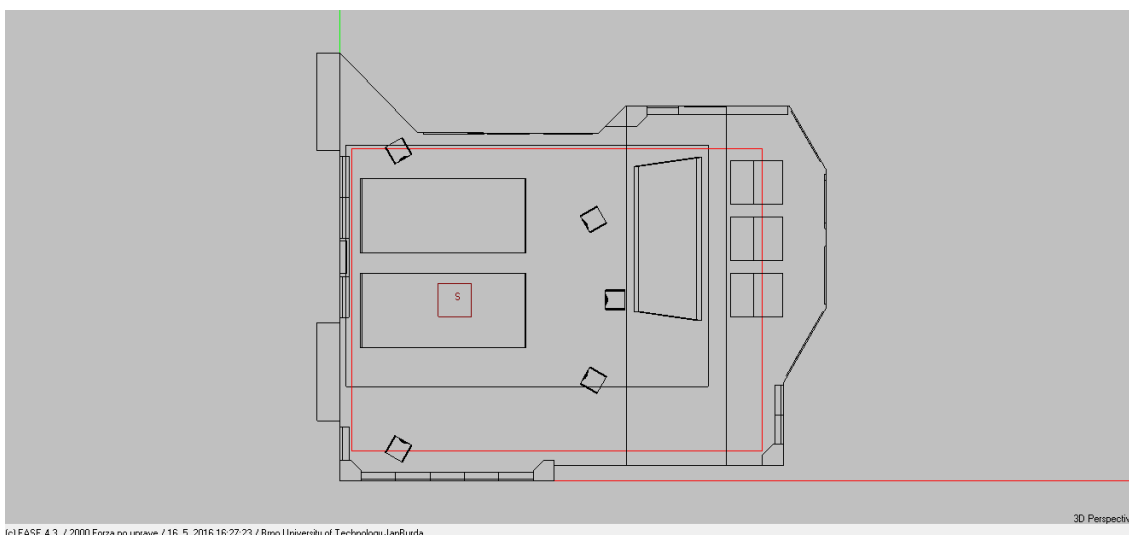
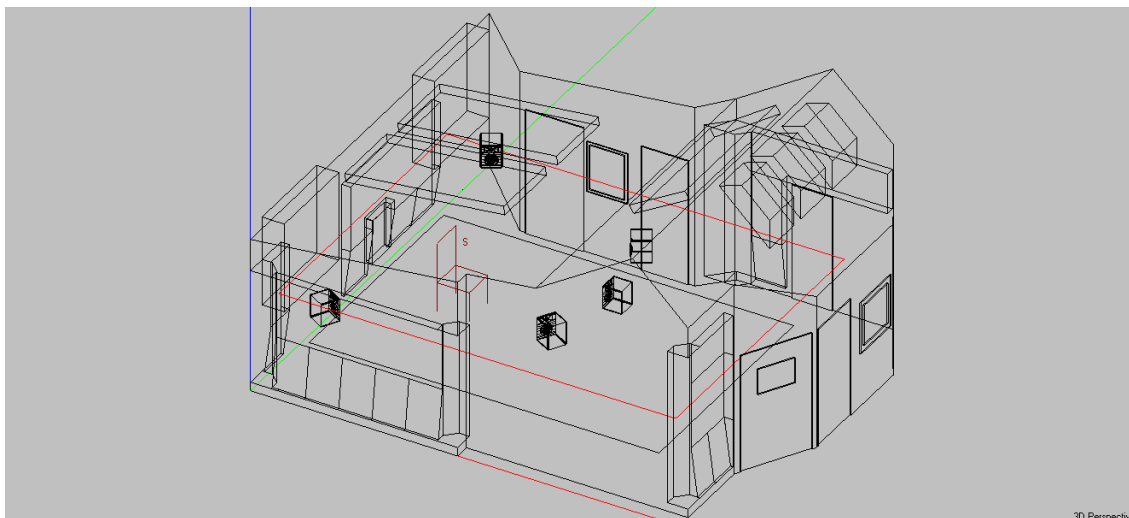
A.1 Stručný přehled o rozměrech místnosti



A.2 Náhledy prostoru po importu do EASE před úpravou

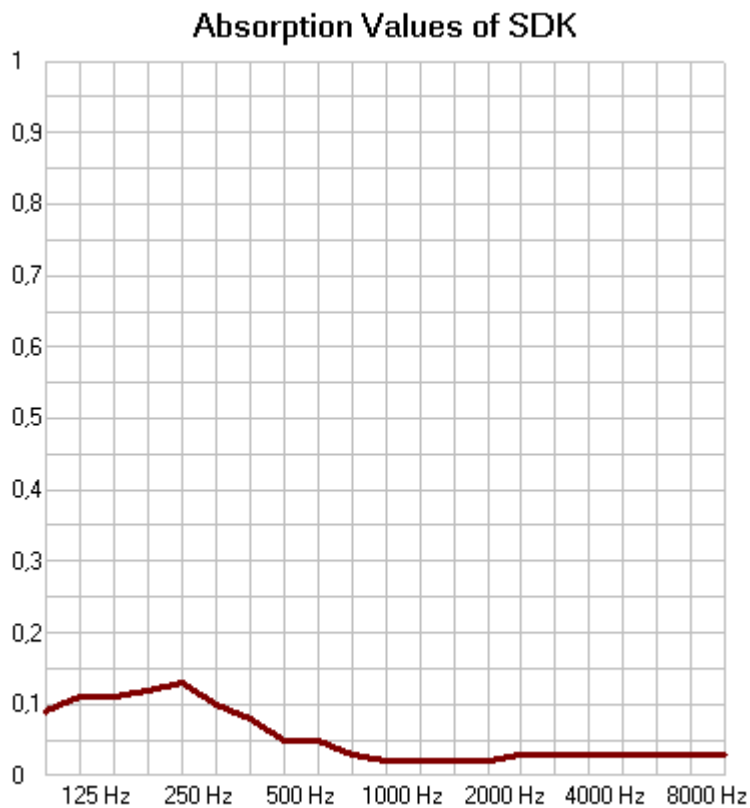


A.3 Náhledy prostoru po importu do EASE po úpravě



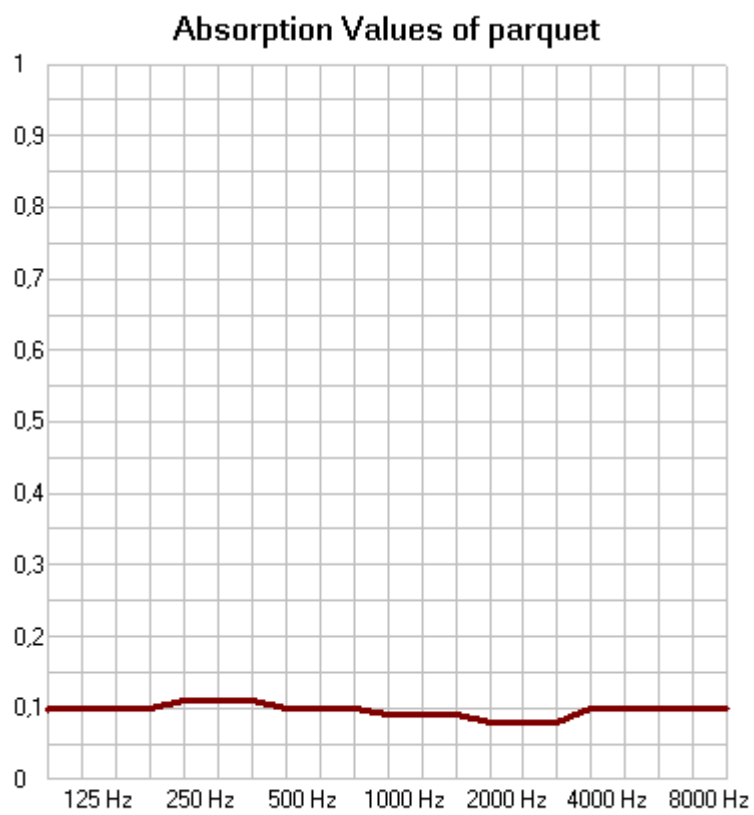
B VYTVOŘENÉ MATERIÁLY PRO SIMULACE

B.1 Sádronkartonová deska



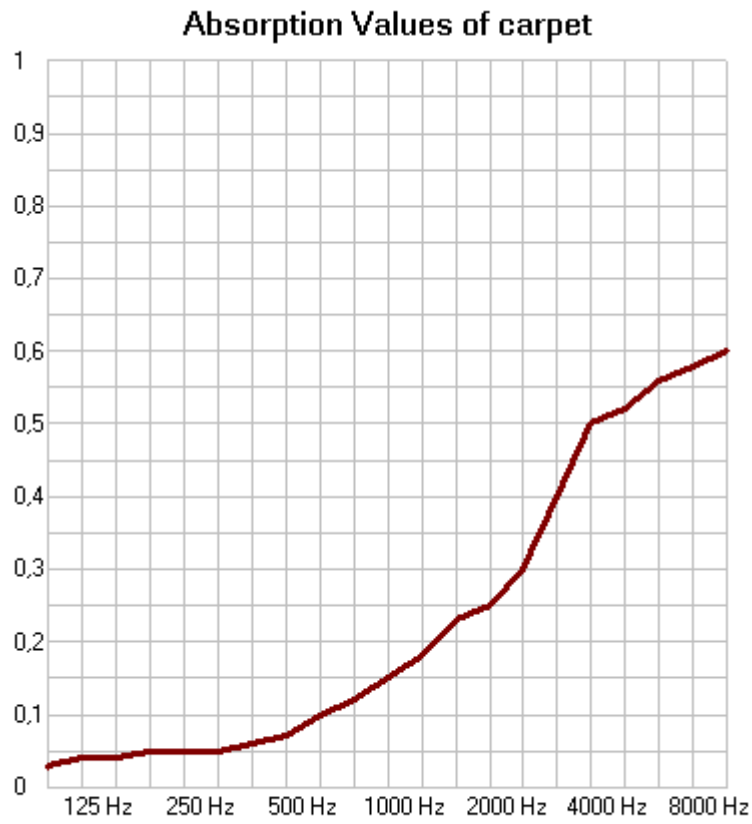
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10. 12. 2015 14:35:43 / Brno University of Technol

B.2 Parkety



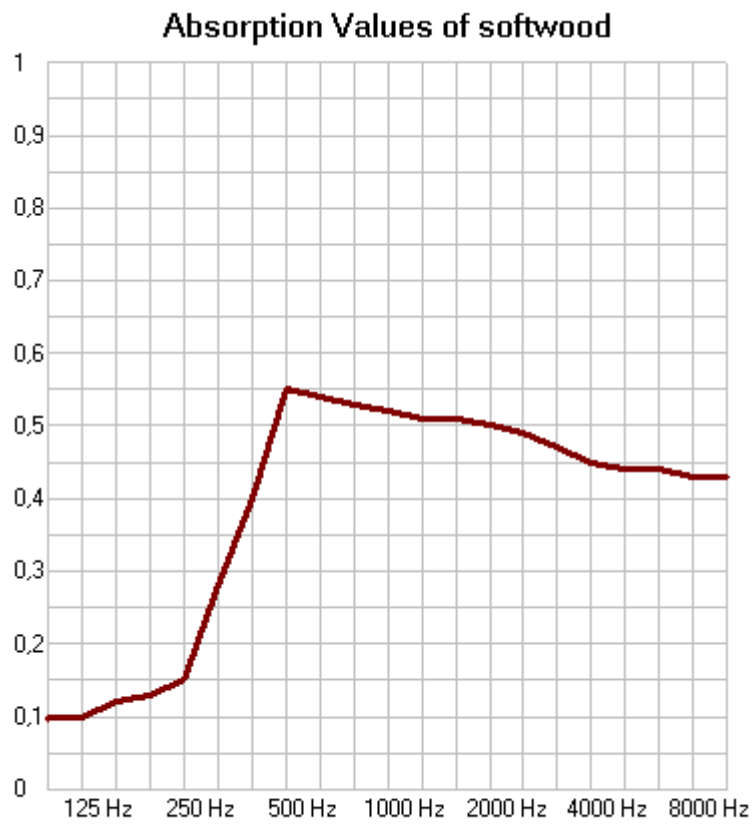
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10. 12. 2015 14:37:11 / Brno University of Technol

B.3 Koberec



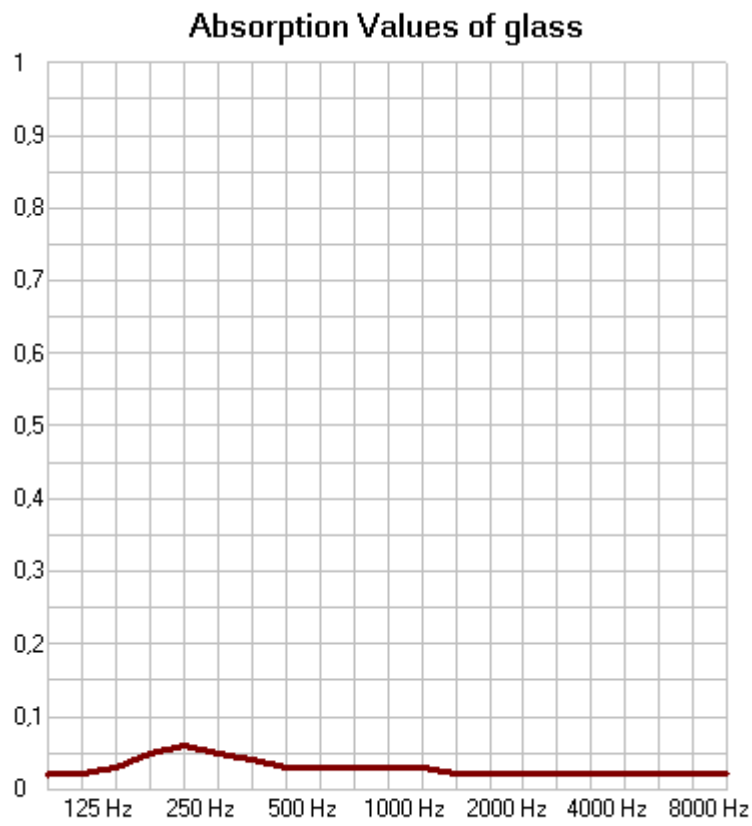
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 16. 5. 2016 13:54:48 / Brno University of Technology

B.4 Dřevovláknitá deska měkká



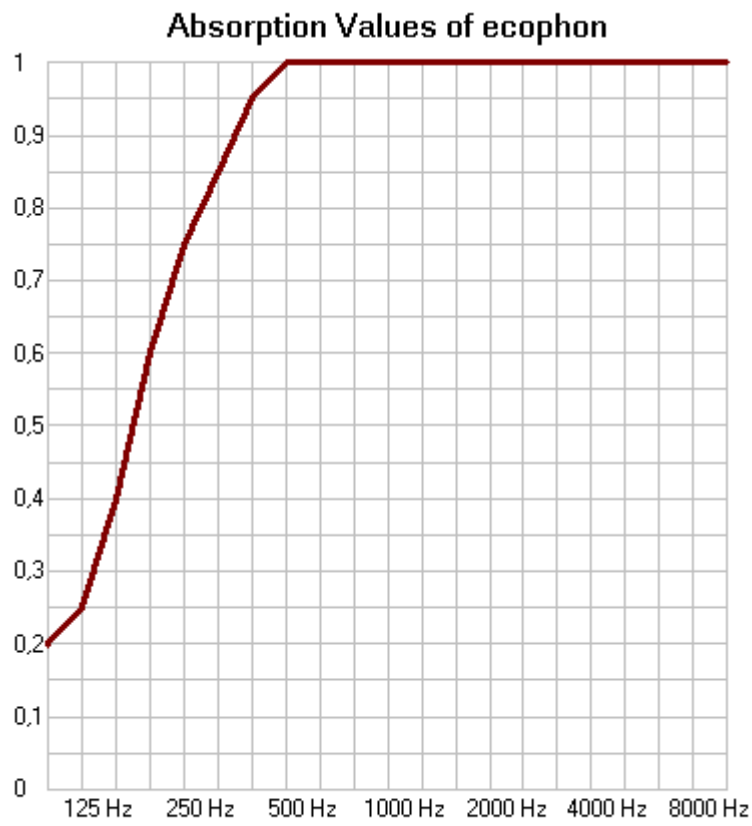
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10. 12. 2015 20:57:50 / Brno University of Technol

B.5 Sklo



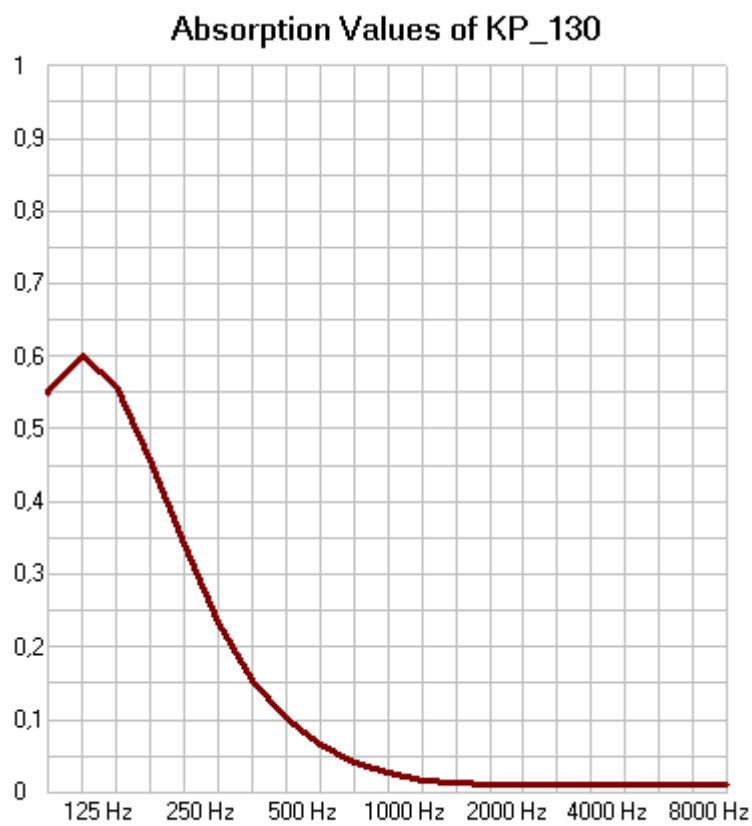
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10. 12. 2015 20:45:23 / Brno University of Technol

B.6 Akustická stěna



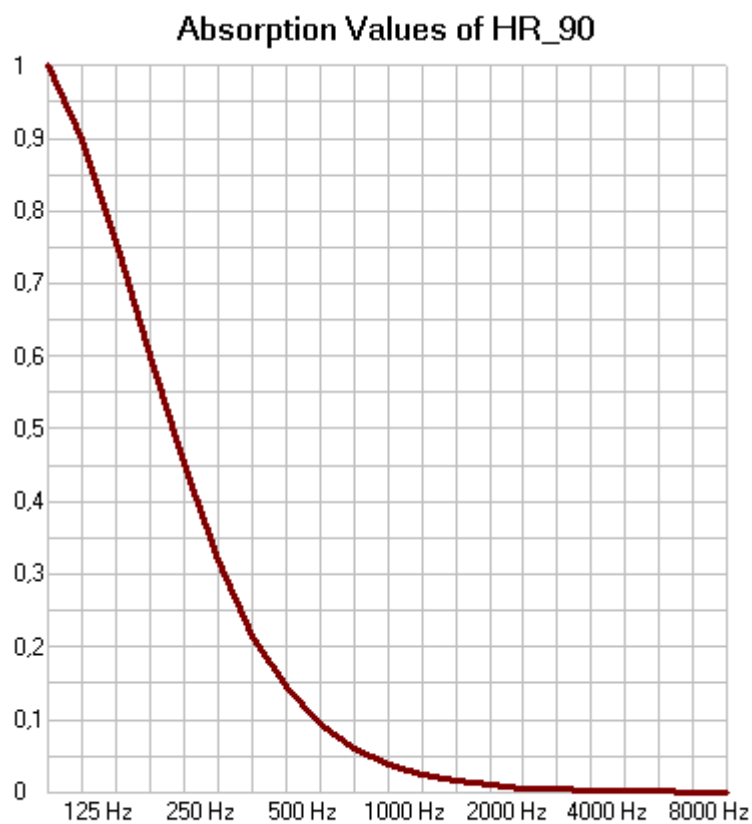
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 16. 5. 2016 13:57:03 / Brno University of Technology

B.7 Kmitající panel s f_r 130 Hz



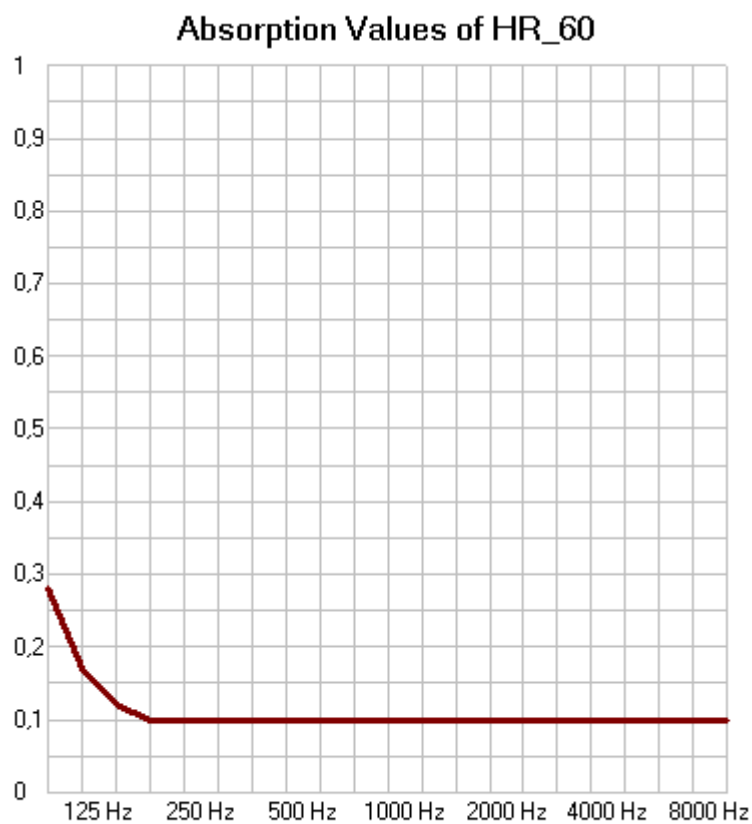
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 23. 5. 2016 16:38:42 / Brno University of Technology

B.8 Helmholtzův rezonátor s f_r 90 Hz



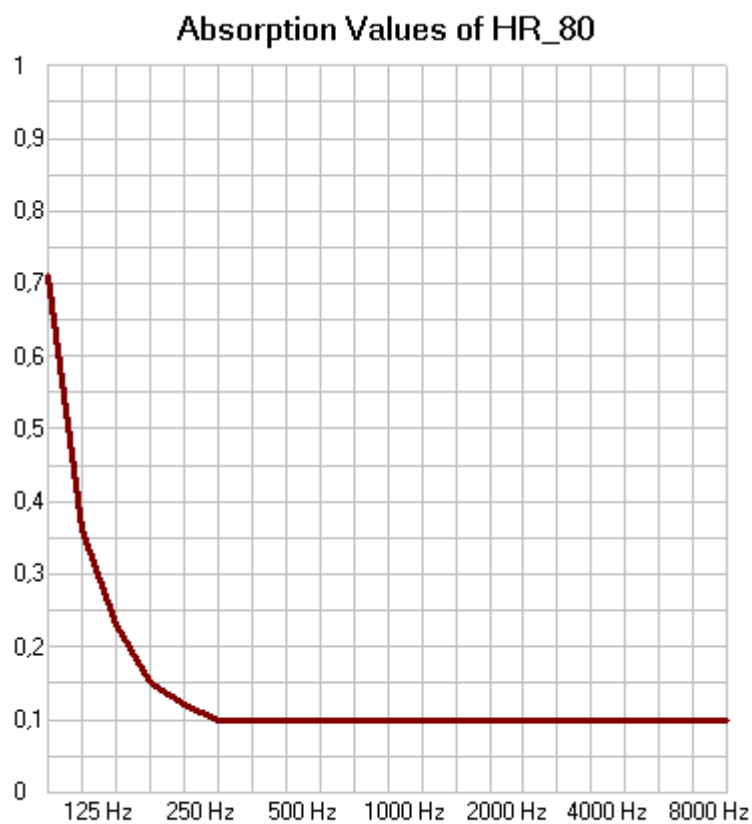
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 16. 5. 2016 13:57:52 / Brno University of Technology

B.9 Helmholtzův rezonátor s f_r 60 Hz



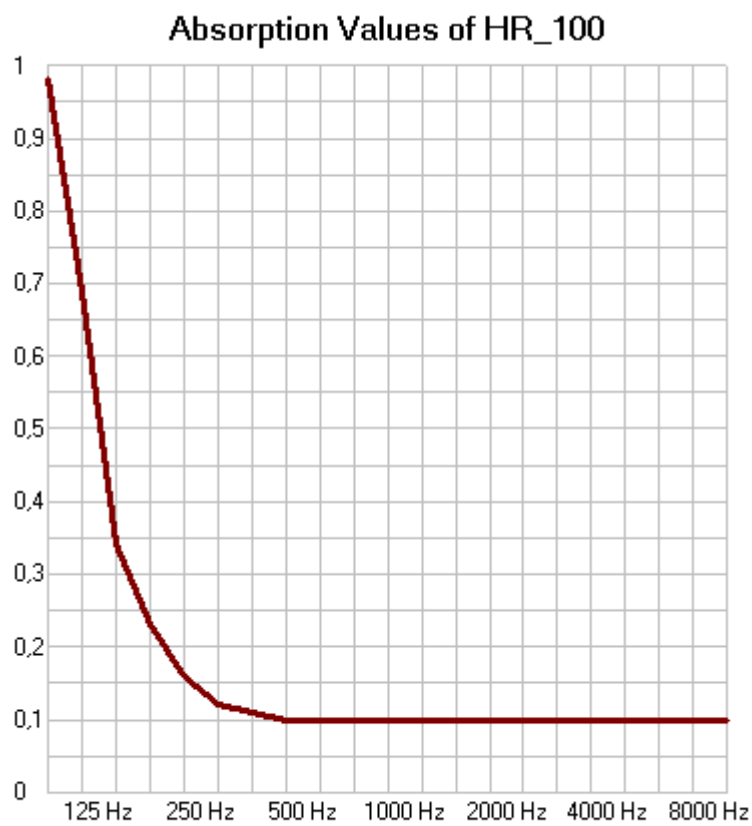
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 23. 5. 2016 16:35:26 / Brno University of Technology

B.10 Helmholtzův rezonátor s f_r 80 Hz



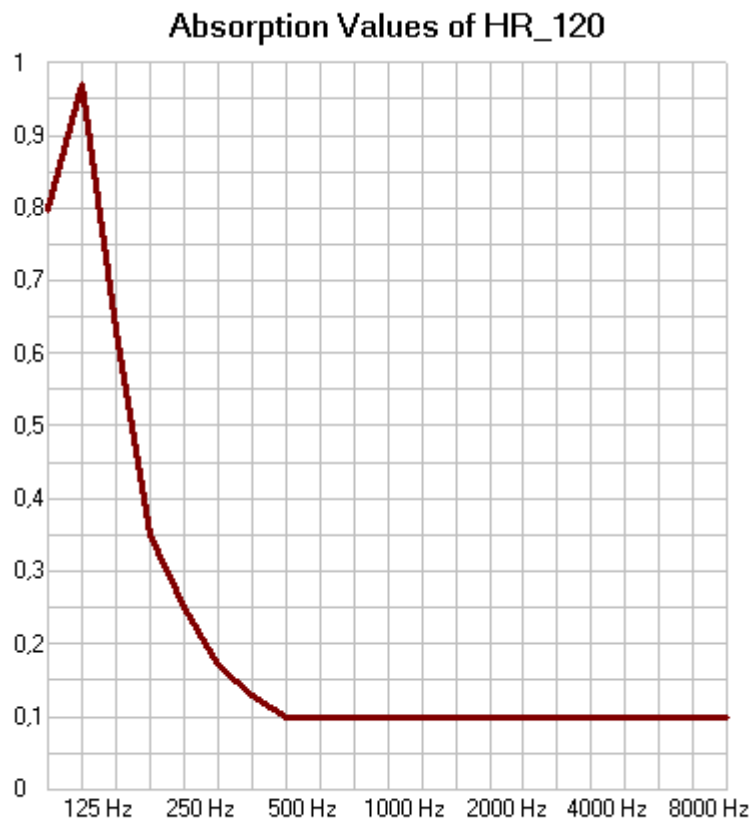
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 23. 5. 2016 16:35:53 / Brno University of Technology

B.11 Helmholtzův rezonátor s f_r 100 Hz



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 23. 5. 2016 16:36:07 / Brno University of Technology

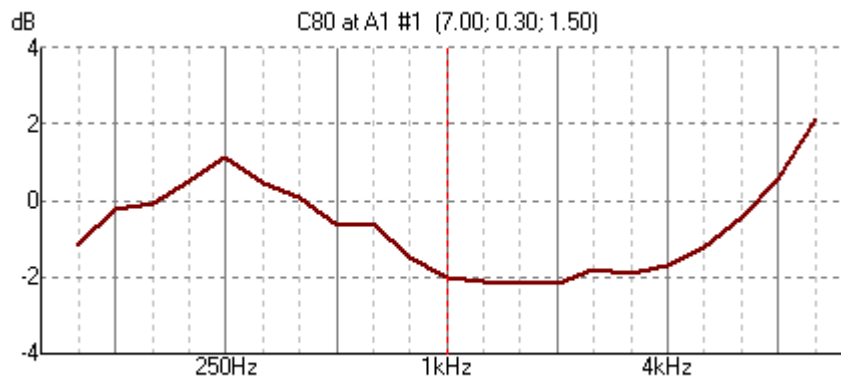
B.12 Helmholtzův rezonátor s f_r 120 Hz



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 23. 5. 2016 16:36:37 / Brno University of Technology

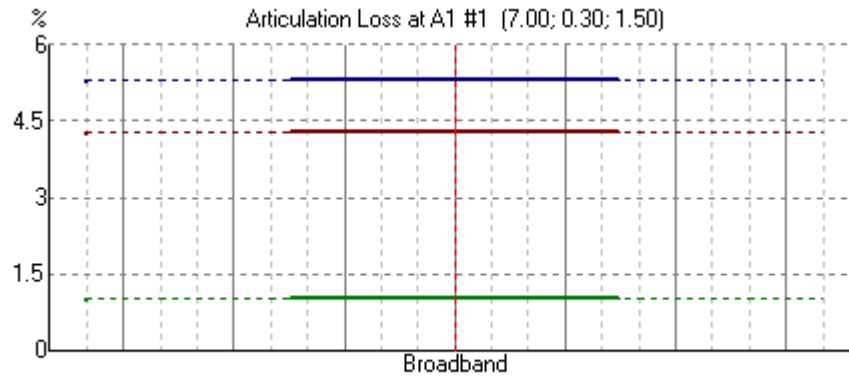
C GRAFY SIMULACÍ PŘED ÚPRAVOU

C.1 Kmitočtová závislost C_{80}



(c) EASE 4.3 / 2000 Forza pred upravou / 16. 5. 2016 17:45:34 / Brno University of Technolog

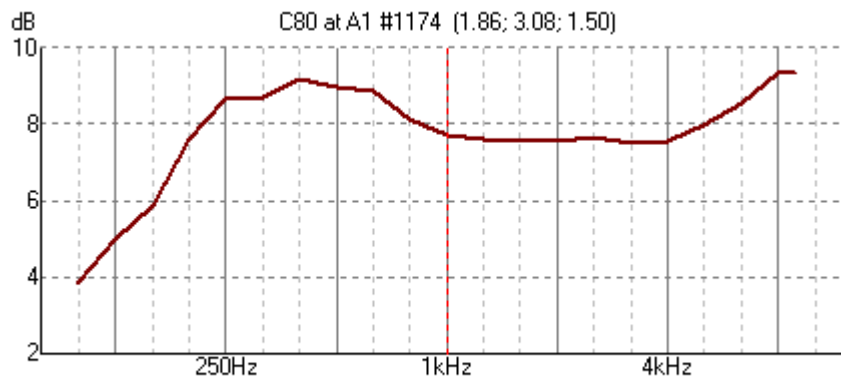
C.2 Hodnoty AL_{cons}



(c) EASE 4.3 / 2000 Forza pred upravou / 16. 5. 2016 17:40:52 / Brno University of Technolog

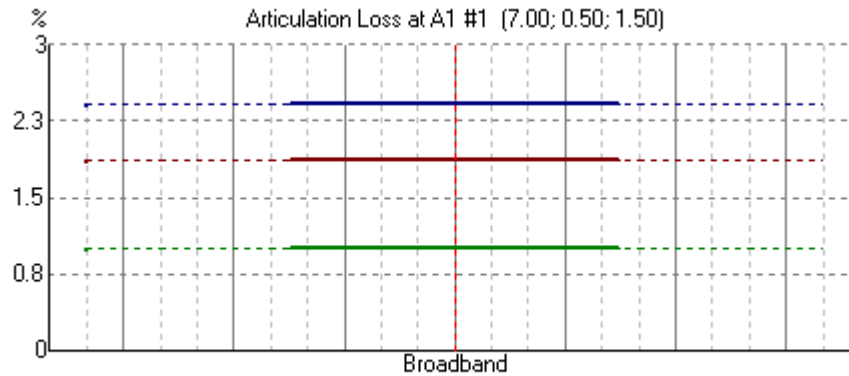
D GRAFY SIMULACÍ PO ÚPRAVĚ

D.1 Kmitočtová závislost C_{80}



(c) EASE 4.3 / 2000 Forza po uprave / 16. 5. 2016 18:22:45 / Brno University of Technology Jk

D.2 Hodnoty AL_{cons}



(c) EASE 4.3 / 2000 Forza po uprave / 16. 5. 2016 18:07:37 / Brno University of Technology Jk

E PŘÍLOHY NA CD

E.1 Modely prostoru v programu Google SketchUp

E.2 Projekt programu EASE s vytvořenými materiály

E.3 Dokumenty s výpočty a výkresy KP a HR

E.4 Data a protokol o měření doby dozvuku