

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh akustických úprav KD Žilov**

**vedoucí práce: ing. Martin Sýkora**

**autor: Ondřej Bech**

**2012**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej BECH**  
Osobní číslo: **E09B0104P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh akustických úprav KD Žilov**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zhodnoťte naměřené parametry prostorové akustiky v KD Žilov.
2. Navrhněte akustické úpravy vedoucí k optimalizaci doby dozvuku a subjektivního vjemu posluchače.
3. Při návrhu uvažujte zachování multifunkčního využití sálu a omezené finanční možnosti při realizaci úprav.




Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

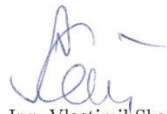
**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sýkora**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá prostorovou akustikou, konkrétně návrhem akustických úprav Kulturního domu v Žilově. První část je věnována rozboru základních pojmů prostorové akustiky. V následující části je provedena analýza naměřených a vypočítaných hodnot současného stavu. Práce dále obsahuje návrh akustických úprav, konkrétně doby dozvuku podle normy ČSN 73 0527 a také rozložení akustického pole. Při návrhu úprav bylo dbáno na co nejnižší výslednou cenu.

## **Klíčová slova**

Prostorová akustika, doba dozvuku, činitel zvukové pohltivosti, vlastní kmity, rozptylový prvek, Helmholtzův rezonátor

**Abstract**

The bachelor thesis deals with room acoustic, specifically with designing of acoustic adjustments in the culture centre Žilov. The First part is focused on analyses of basic terms in room acoustic. In the following part there is an analysis of measured and calculated values of the current state. The bachelor thesis also contains design of acoustic adjustments, specifically adjustments of reverberation time according to ČSN 73 0527 and also distribution of sound field. Adjustments are designed with regards to the lowest final price.

**Keywords**

Room acoustic, reverberation time, sound absorption coefficient, normal modes, diffraction object, Helmholtz resonator

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 29.5.2012

Ondřej Bech

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce ing. Martinu Sýkorovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Prostorová akustika</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Pojmy v prostorové akustice</b> .....	<b>11</b>
2.1 Činitel zvukové pohltivosti.....	11
2.2 Doba dozvuku.....	12
2.2.1 Doba dozvuku podle Sabina.....	12
2.2.2 Doba dozvuku podle Eyringa .....	13
2.2.3 Doba dozvuku podle Millingtona .....	14
2.3 Vlastní frekvence.....	14
2.3.1 Výpočet kritické frekvence.....	15
2.4 Prvky pro pohlcování zvuku.....	15
2.4.1 Akustické obklady.....	15
2.4.2 Helmholtzovi rezonátory a děrované desky .....	15
2.4.3 Kmitající desky a membrány .....	17
2.4.4 Difuzory.....	18
<b>3 Současný stav kulturního domu</b> .....	<b>18</b>
3.1 Normy.....	19
3.2 Měření doby dozvuku a rozložení pole .....	19
3.3 Ověření doby dozvuku teoretickým výpočtem.....	19
3.3.1 Příklad výpočtu doby dozvuku pro 800 Hz.....	20
3.4 Měření a výpočet vlastních kmitů.....	20
3.4.1 Výpočet kritické frekvence.....	23
3.5 Měření a simulace rozložení pole v sálu KD.....	23
3.5.1 Simulace reálné situace.....	25
3.6 Zhodnocení současných akustických parametrů .....	26
3.7 Přidání závěsů.....	27
<b>4 Návrh úprav</b> .....	<b>29</b>
4.1 Výpočet rezonátoru na 80 Hz .....	29
4.2 Členitá plocha pro úpravu doby dozvuku a rozložení pole .....	30
4.2.1 Porézní materiál na 2 kHz.....	31
4.2.2 Akustické prvky na 125 Hz .....	31
<b>5 Ověření návrhu akustických úprav</b> .....	<b>32</b>
5.1 Simulace v programu EASE.....	33
<b>Závěr</b> .....	<b>35</b>
<b>Použitá literatura</b> .....	<b>36</b>
<b>Přílohy</b> .....	<b>37</b>



## Seznam symbolů

$T_S$	doba dozvuku podle Sabina v [s],
$T_E$	doba dozvuku podle Eyringa [s]
$T_M$	doba dozvuku podle Millingtona [s]
$A$	celková pohltivost [-]
$V$	objem místnosti v [ $m^3$ ]
$S_i$	plocha dílčího materiálu [ $m^2$ ]
$\alpha_{si}$	činitel pohltivosti dílčího materiálu [-]
$m$	činitel útlumu ve vzduchu [ $m^{-1}$ ]
$c_0$	rychlost šíření zvuku ve vzduchu ( $340 \text{ ms}^{-1}$ )
$l_x, l_y, l_z$	rozměry uvažovaného prostoru [m]
$n_x, n_y, n_z$	0, 1, 2,... celá čísla a jejich kombinace
$S_0$	je plocha jednoho otvoru v [ $m^2$ ]
$V = S_1 d$	objem dutiny rezonátoru pro jeden otvor [ $m^3$ ]
$S_1$	průřez dutiny rezonátoru pro jeden otvor [ $m^2$ ]
$d$	hloubka vzduchového polštáře [m]
$l$	tloušťka desky s otvory nebo délka hrdla rezonátoru [m]
$2\Delta l$	koncová korekce [m]
$\varepsilon$	činitel děrování [-]
$S_o$	je plocha otvorů v desce [ $m^2$ ]
$S_c$	plocha celé desky [ $m^2$ ]
$M_s$	je měrná plošná hmotnost desky [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]

## **Úvod**

Cílem této práce je navržení akustických úprav, tedy zlepšení akustických vlastností Kulturního domu v Žilově.

Žilov je obec na severním Plzeňsku a zdejší kulturní dům je využíván k několika účelům, například pro vystoupení nejrůznějších hudebních skupin, jako scéna ochotnického divadla, pro schůze různých sdružení a spolků nebo pro sportovní aktivity a dětské zájmové kroužky.

Vzhledem k těmto skutečnostem musíme pro akustické úpravy vycházet z požadavků, které udává norma ČSN 73 0527- Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky, prostory pro kulturní účely, prostory ve školách, prostory pro veřejné účely.

Kulturní dům prošel rekonstrukcí v 70. letech a od té doby zde nedošlo k žádným zásadním úpravám.

## 1 Prostorová akustika

Prostorová akustika je vědní obor, který dnes nesouvisí a nezabývá se pouze prostory nahrávacích studií, prostor pro hudební produkci nebo přednáškových sálů, ale řeší i prostory, u kterých to nemusí být na první pohled úplně zřejmé. Jsou to třeba velké haly letišť nebo nádraží, kde je zapotřebí zvýšit srozumitelnost informačních hlášení. Dále to jsou výrobní haly, ve kterých je nutné snížit hluk vznikající při nejrůznějších výrobních procesech. Jako nástroje pro úpravy prostorové akustiky nám slouží různé prvky, které se dělí do několika skupin. První z nich jsou akustické obklady, které mají za úkol pohlcovat některé frekvence zvuku, obvykle to bývá poměrně široké pásmo kmitočtů. Pro úzké pásmo frekvencí se používají rezonanční prvky, které bývají obvykle laděny na jeden konkrétní kmitočet, který jsou schopny velmi efektivně ztlumit. Pro rozptýlení zvuku se používají takzvané difuzní prvky. Ty mají za úkol optimálně rozptýlit zvukové pole do celého prostoru a vytvořit tak difuzní zvukové pole. [1],[3]

## 2 Pojmy v prostorové akustice

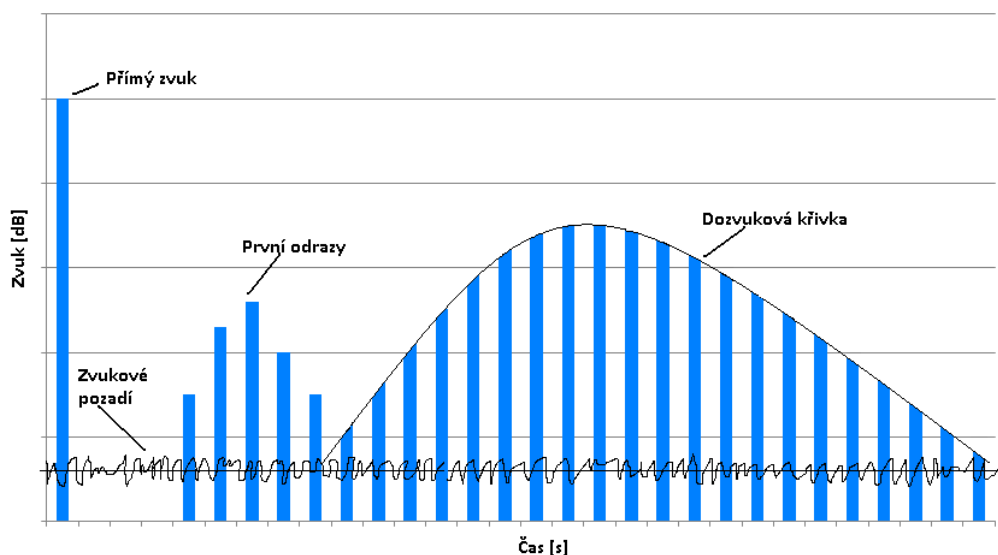
Prostorová akustika, jako každý vědní obor, obsahuje velké množství teoretických pojmů a předpokladů. K návrhu akustických úprav v této práci se omezíme pouze na pojmy nejdůležitější, jako jsou činitel zvukové pohltivosti, doba dozvuku, vlastní a kritický kmitočet, prvky pro pohlcování a rozptylování zvuku.

### 2.1 Činitel zvukové pohltivosti

Schopnost tělesa pohlcovat zvuk se nazývá činitel zvukové pohltivosti. Značí se  $\alpha$  a je to bezrozměrné číslo, které může nabývat hodnot v intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . U dokonale pohltivé stěny je  $\alpha=1$ , u stěny dokonale zvuk odrážející  $\alpha=0$ . Tyto dva extrémní případy však v reálných podmínkách nenastávají, proto se v praxi tato hodnota pohybuje mezi hodnotami 0 a 1. [1]

## 2.2 Doba dozvuku

Pokud je v daném prostoru zapnutý zdroj zvuku v ustáleném stavu, je jím stále doplňována energie, která je pohlcována stěnami. Pokud zdroj signálu v čase  $t$  vypneme, bude vlivem zvukové pohltivosti stěn energie zvuku v prostoru ubývat. Doba, za kterou klesne intenzita zvuku z hodnoty v čase  $t$  na hodnotu o 60 dB nižší, se nazývá doba dozvuku. Časový průběh doby dozvuku závisí na přímé vlně od zdroje zvuku a na odrazech od okolních stěn. [1], [2]



Obr.2.1 Idealizovaná akustická odezva místnosti [2]

Pro výpočet doby dozvuku bylo stanoveno několik vztahů, lišících se použitelností pro různé typy prostor.

### 2.2.1 Doba dozvuku podle Sabina

Tento vztah vyhovuje a také se používá pro prostory méně tlumené, protože u více tlumených prostor vzniká chyba. Teoreticky by při  $\alpha=1$  všech ploch byla výsledná doba dozvuku  $T_s=0$ , ovšem při této situaci by podle Sabinova vztahu byla doba dozvuku dána vztahem

$$T_s = \frac{0,164V}{S} \cdot [2]$$

$$T_s = \frac{0,164 \cdot V}{A + 4mV} \quad [s ; m^3 ; m^2] \quad (2.2)$$

$$\text{kde } A = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad [-], \quad (2.3)$$

$T_s$  doba dozvuku v [s],

$A$  celková pohltivost,

$V$  objem místnosti v [ $m^3$ ],

$S_i$  plocha dílčího materiálu [ $m^2$ ],

$\alpha_{si}$  činitel pohltivosti dílčího materiálu,

$m$  činitel útlumu ve vzduchu [ $m^{-1}$ ], který se uplatní u kmitočtů nad 2 kHz a u velkých prostor.

### 2.2.2 Doba dozvuku podle Eyringa

Pro účely veřejných prostor, kdy chceme vlastnosti daného místa přizpůsobit normě, se používá právě výpočet doby dozvuku podle Eyringa. Tento vztah je obsažen v normě ČSN 73 0573. [4]

$$T_E = \frac{0,164 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - A) + 4mV} \quad [s ; m^3 ; m^2 ; m^{-1}] \quad (2.4)$$

$$\text{kde } A = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad [-]$$

$T_E$  je doba dozvuku v [s],

$V$  objem místnosti v [ $m^3$ ],

$S$  celková plocha ohraničujících stěn [ $m^2$ ],

$\alpha_s$  střední činitel pohltivosti,

$m$  činitel útlumu ve vzduchu [ $m^{-1}$ ].

### 2.2.3 Doba dozvuku podle Millingtona

$$T_M = \frac{0,164 \cdot V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad [\text{s}; \text{m}^3; \text{m}^2; \text{m}^{-1}] \quad (2.5)$$

- kde  $T_M$  je doba dozvuku v [s],  
 $V$  objem místnosti v [ $\text{m}^3$ ],  
 $S_i$  plocha ohraničujících stěn [ $\text{m}^2$ ],  
 $\alpha_i$  činitel pohltivosti,  
 $m$  činitel útlumu ve vzduchu [ $\text{m}^{-1}$ ].

Tento vzorec se používá v případech, kdy celkový činitel pohltivosti ohraničujících stěn je vyšší než 0,8. V praxi se ukázalo, že při takto vysokých hodnotách činitele zvukové pohltivosti vzniká Podle Eyringova vzorce chyba. Ta je dána jeho předpokladem, že je od všech ploch stejné množství odrazů zvukových vln. Ve skutečnosti však množství odrazů záleží na velikosti daných ploch. Prostorů, kde  $\alpha > 0,8$  je pouze minimum, proto se tento vzorec používá velmi zřídka. [3],[1]

### 2.3 Vlastní frekvence

Vlastní frekvence jsou dány rozměry dané místnosti (výškou, šířkou, délkou). Pokud v místnosti větší než  $200 \text{ m}^2$  je zapnutý zdroj zvuku, pak frekvence rovnající se vlastním frekvencím daného prostoru budou mít větší amplitudu, než kmitočty ostatní. Záměrem tedy je dosáhnout co největšího počtu vlastních kmitů v celém slyšitelném pásmu, aby bylo dosaženo kvalitního přenosu zvuku.[3]

$$f_N = \frac{c_0}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [\text{Hz}; - - ; \text{m}] \quad (2.6)$$

- kde  $c_0$  rychlost šíření zvuku ve vzduchu ( $340 \text{ ms}^{-1}$ ),  
 $l_x, l_y, l_z$  rozměry uvažovaného prostoru [m],  
 $n_x, n_y, n_z$  0, 1, 2, ... celá čísla a jejich kombinace.

V oblasti nejnižších kmitočtů je zvukové pole v místnosti značně nevyrovnané, protože počet vlastních kmitů je nízký a kmity jsou nerovnoměrně rozloženy. Až od kmitočtu  $f_k$  nazývaného kritický kmitočet, se vytváří akustické pole s již určitými znaky rovnoměrného rozložení. [2]

### 2.3.1 Výpočet kritické frekvence

$$f_k = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz} ; \text{s} ; \text{m}^3] \quad (2.7)$$

kde  $T$  je průměrná doba dozvuku v místnosti v [s],

$V$  objem místnosti v [m<sup>3</sup>].

## 2.4 Prvky pro pohlcování zvuku

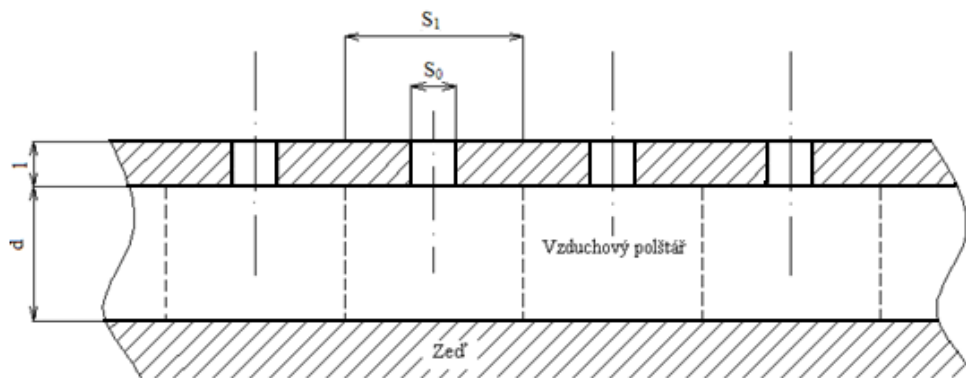
Prvky pro pohlcování zvuku je skupina materiálů a konstrukcí, které v daném pásmu kmitočtů přeměňují zvukovou energii, která na ně dopadá, na energii jinou, zpravidla tepelnou. To je základní nástroj pro návrhy akustických úprav. [2]

### 2.4.1 Akustické obklady

Jako nejčastěji používané prvky pro úpravy doby dozvuku v místnosti jsou používány různé akustické obklady. Jen na českém trhu se vyskytuje pestrá škála výrobců a materiálů. Tyto obklady mají vždy pevně daný průběh činitele zvukové pohltivosti udávaný výrobcem. Všechny tyto materiály fungují na principu přeměny zvukové energie na tepelnou. Největší činitel zvukové pohltivosti mají materiály porézní. [4]

### 2.4.2 Helmholtzovi rezonátory a děrované desky

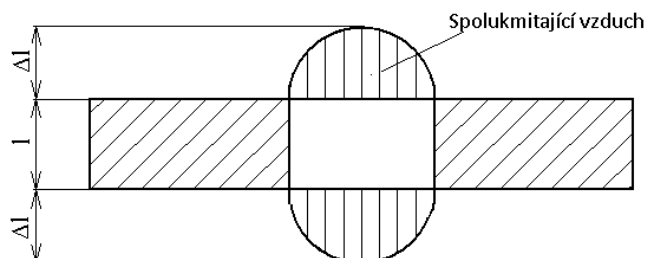
Helmholtzův rezonátor je tvořen děrovanou deskou pevně uchycenou v určité vzdálenosti od pevného podkladu (např. stěny). Ve vzniklém prostoru mezi stěnou a deskou se nachází porézní materiál, na jehož fyzikálních vlastnostech záleží, jestli bude rezonátor schopen například úplně ztlumit jeden konkrétní kmitočet nebo bude laděn na širší spektrum. [2]



Obr.2.8 Řez Helmholtzovým rezonátorem [2]

$$f_r = 55 \cdot \sqrt{\frac{S_0}{V \cdot (l + 2\Delta l)}} \quad [\text{Hz}, \text{m}^2, \text{m}^3, \text{m}] \quad (2.9)$$

- kde  $S_0$  je plocha jednoho otvoru v [m<sup>2</sup>],  
 $V = S_1 d$  objem dutiny rezonátoru pro jeden otvor [m<sup>3</sup>],  
 $S_1$  průřez dutiny rezonátoru pro jeden otvor [m<sup>2</sup>],  
 $d$  hloubka vzduchového polštáře [m],  
 $l$  tloušťka desky s otvory nebo délka hrdla rezonátoru [m],  
 $2\Delta l$  koncová korekce [m].



Obr.2.10 Spolukmitající vzduch v dutině Helmholtzova rezonátoru [2]

Koncová korekce  $2\Delta l$  zahrnuje působení hmotnosti zvuku spolukmitajícího vzduchu po obou stranách otvoru. Tato korekce je závislá na hustotě děrování desky  $\epsilon$ . [3]



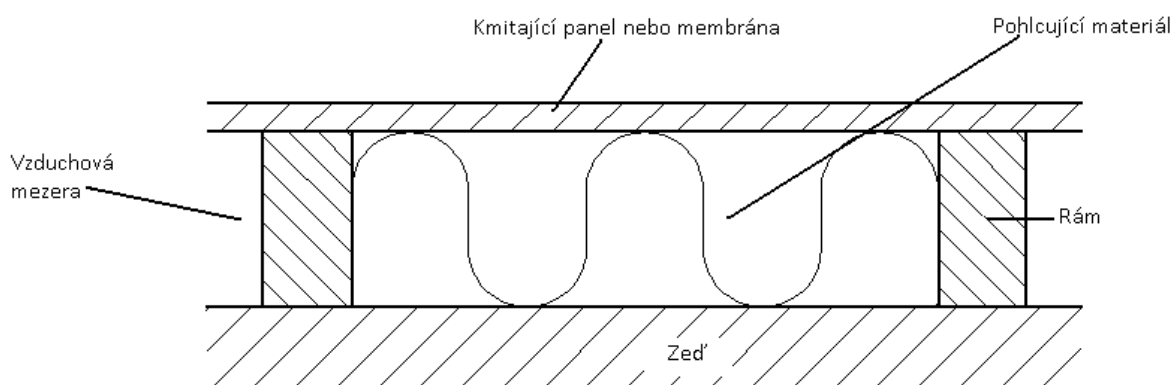
$$\varepsilon = \frac{S_0}{S_c} \cdot 100\% \quad [ -, m^2, m^2 ] \quad (2.11)$$

kde  $S_0$  je plocha otvorů v desce [m<sup>2</sup>],

$S_c$  plocha celé desky [m<sup>2</sup>].

### 2.4.3 Kmitající desky a membrány

Tento typ prvku pro pohlcování zvukové energie využívá složitější způsob její přeměny. Nejprve se zvuková energie přemění na mechanickou (rozkmitání desky či membrány), poté se její menší část přemění zpět na akustickou energii, která pokračuje dále za desku a její větší část se přemění na tepelnou energii z důvodů vnitřního tření v desce. Jako membrány se využívají různé typy folií upevněné v rámu, uvnitř něhož se vytvoří vzduchový polštář. Kmitající desky jsou zhotoveny z tenkých desek, (například sololit, překližka) které musejí být usazeny v pružných úchytech. V praxi se pružné uchycení řeší například uložením krajů desky do plsti, nebo pásů koženky. Místo vzduchového polštáře, jako je tomu u membrán, se u kmitajících desek používají porézní materiály, jejichž vlastnostmi lze stejně jako u Helmholtzových rezonátorů upravit průběh činitele zvukové pohltivosti. [1],[2],[4]



Obr.2.12 Řez kmitající deskou nebo membránou [2]

$$f_r = 60 \sqrt{\frac{1}{M_s \cdot d}} \quad [\text{Hz}, \text{kg/m}^2, \text{m}] \quad (2.13)$$

kde  $M_s$  je měrná plošná hmotnost desky,

$d$  výška vzduchového polštáře.

#### 2.4.4 Difuzory

Pomocí difuzorů (rozptylových prvků) lze v uzavřeném prostoru zrovnoměnit zvukové pole a zlepšit tak dojem posluchače. Tyto prvky mají za úkol odrazit vlny na ně dopadající zpět do prostoru a vytvořit tak zvukové pole, ve kterém budou vlny přicházející z různých směrů zastoupeny rovnoměrně. [3]

Difuzory jsou tvořeny různými tvary lomených jehlanů či vypouklých ploch, které musí být vhodně umístěny nebo uspořádány periodicky. Rozměry těchto prvků jsou dány délkou vlny zvuku, kterou mají efektivně rozptýlit. Difuzory plní svou funkci, pokud jsou jejich dílčí rozměry větší než délky vlny zvukového signálu. Moderním řešením rozptylu signálu jsou tzv. RPG difuzory. Ty fungují na principu akustické difrakční mřížky. V praxi je to několik vedle sebe uložených různě hlubokých šachet, ve kterých se zvuk odráží ode dna a vrací se zpět do prostoru. Tento systém má velkou účinnost.[2],[3]

### 3 Současný stav kulturního domu

Budova Kulturního domu v Žilově pochází z konce 19. století a skládá se ze tří spojených částí – sálu, přísálí a jeviště. Plocha celého objektu je přibližně 180 m<sup>2</sup>. Jak již bylo napsáno v úvodu, v 70. letech došlo k celkové rekonstrukci KD. Z této doby tedy pochází veškeré materiály a vybavení sálu. Na podlaze sálu a přísálí jsou položeny parkety, na podlaze jeviště pak zátěžový koberec. Stěny sálu a přísálí jsou obloženy do výšky přibližně 120 cm umakartovými deskami. Ty slouží jako ochrana proti poškození omítky při nejrůznějších akcích, které se v objektu konají. Dále je v objektu 8 oken, které jsou rozmístěny po obou stranách. V nejhorším stavu je v současné době strop. Ten je tvořen dřevěnými deskami, polepenými umakartem. Tyto jednotlivé desky jsou pak uchyceny v dřevěném rámu. Nad těmito deskami je izolační vata, která je však ve velmi špatném stavu. Tento problém, ale snad ještě více než s akustikou, souvisí s ekonomikou provozu v zimních měsících. Špatná izolace způsobuje značné ztráty tepla.

### 3.1 Normy

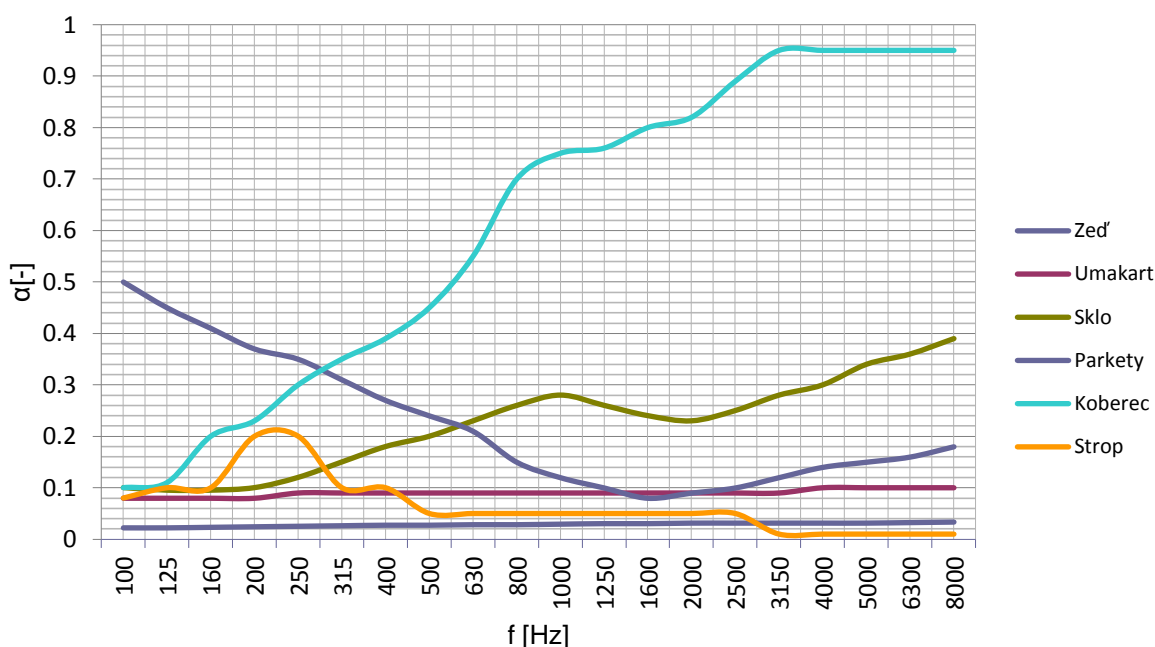
Pro definici zásad projektování a realizace prostorů pro kulturní účely, prostorů ve školách a prostorů pro veřejné účely slouží norma ČSN 73 0527. Podle této normy je KD Žilov víceúčelovým sálem. Z toho vyplývá požadavek na dobu dozvuku. Horní a dolní hranice doby dozvuku je zahrnuta v Obr.3.6.

### 3.2 Měření doby dozvuku a rozložení pole

Měření doby dozvuku a rozložení akustického pole provedli v kulturním domě pracovníci Katedry technologií a měření FEL ZČU. V této práci jsou použity výsledky těchto měření a slouží hlavně k ověření výsledků teoretických výpočtů. Naměřené hodnoty doby dozvuku jsou znázorněny na Obr.3.10, naměřené hodnoty rozložení pole jsou na příloženém CD.

### 3.3 Ověření doby dozvuku teoretickým výpočtem

Pro výpočet doby dozvuku byl použit program MS Excel. Soubor „Akusticke\_upravy.xls“ se všemi výpočty je přiložen k práci. V objektu kulturního domu jsou použity materiály s činiteli zvukové pohltivosti uvedené na Obr.3.1.



Obr.3.1 Závislost činitele zvukové pohltivosti jednotlivých materiálů na frekvenci [2],[4]

Pro výpočet doby dozvuku byl použit vztah (2.4) doba dozvuku podle Eyringa. Tento vztah je udán také v normě ČSN EN 73 0527.

### 3.3.1 Příklad výpočtu doby dozvuku pro 800 Hz

Tab.3.2 Přehled materiálů použitých ve výpočtu

	$S_i$ [m <sup>2</sup> ]	$\alpha_i$ [-]
Zed'	230.1	0.028
Umakart	72	0.09
Sklo	16.7	0.26
Parkety	132.5	0.15
Koberec	48.8	0.7
Strop	136.4	0.05

Objem místnosti  $V=668,8\text{m}^3$

$$A = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i = \frac{1}{634,7} \cdot \left( (230,1 \cdot 0,028) + (72 \cdot 0,09) + (16,7 \cdot 0,26) + (132,5 \cdot 0,15) + (48,8 \cdot 0,7) + (136,4 \cdot 0,05) \right) = 0,121$$

$$T_E = \frac{0,164 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - A) + 4mV} = \frac{0,164 \cdot 668,8}{-634,7 \cdot \ln(1 - 0,121) + (4 \cdot 0 \cdot 668,8)} = 1,3409 \text{ s}$$

kde:  $T_E$  je doba dozvuku v [s],

$V$  objem místnosti v [m<sup>3</sup>],

$S$  celková plocha ohraničujících stěn [m<sup>2</sup>],

$\alpha_i$  střední činitel pohltivosti,

$S_i$  plocha daného materiálu,

$m$  činitel útlumu ve vzduchu [m<sup>-1</sup>],

$A$  celková pohltivost.

Doby dozvuku na ostatních kmitočtech jsou vypočítány v příloženém souboru „Akusticke\_upravy.xls“.

### 3.4 Měření a výpočet vlastních kmitů

Díky poměrně složitému tvaru objektu kulturního domu, který se skládá ze tří navzájem propojených částí, je prakticky velmi složité teoreticky vypočítat vlastní kmity. Vzorec 5 je použitelný pouze pro místnosti s pravidelným půdorysem (nejlépe čtverec či obdélník). V této práci jsou spočítány vlastní kmity pouze pro sál kulturního domu. Vlastní kmity na vypočítaných frekvencích se v sále určitě vyskytují, ovšem dále vznikají v celém objektu další

vlastní kmity dané tvarem místnosti. Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3, vlastní kmity jsou dány rozměry místnosti a jsou způsobeny odrazy zvukových vln od stěn místnosti.

**Příklad výpočtu jednoho vlastního kmitu:**

$$f_N = \frac{c_o}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} = \frac{340}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{0}{8,93}\right)^2 + \left(\frac{1}{10,4}\right)^2 + \left(\frac{1}{4,05}\right)^2} = 45,05 \text{ Hz}$$

Tab.3.3 První vypočtené vlastní kmity

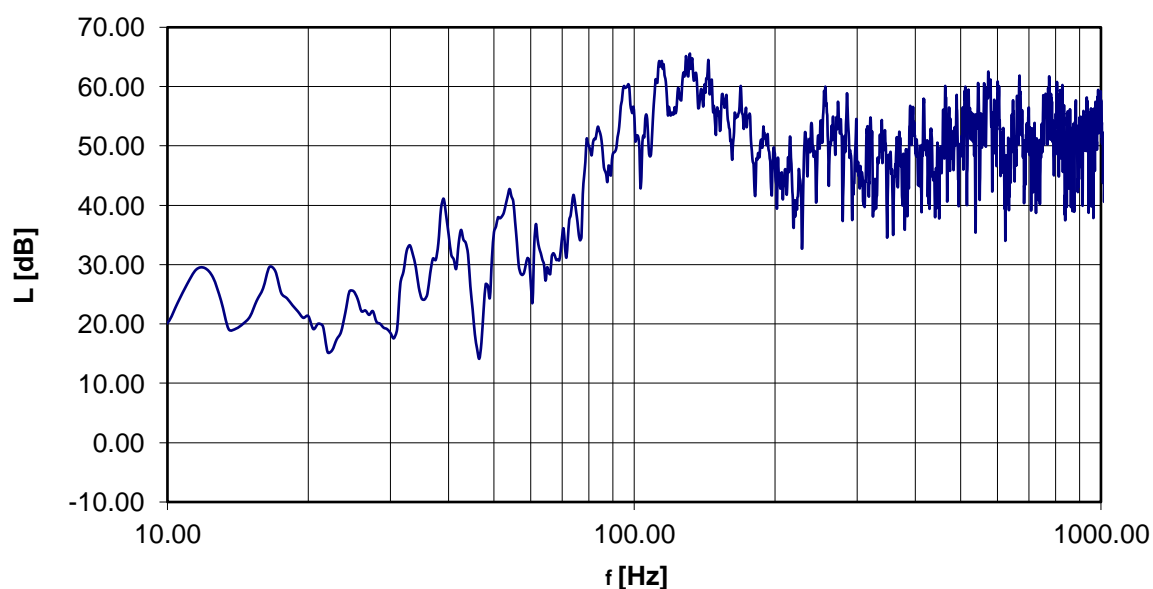
$n_x$	$n_y$	$n_z$	$f_{sálu}$ [Hz]
0	0	0	0.00
0	1	0	16.35
1	0	0	19.04
1	1	0	25.09
0	2	0	32.69
1	2	0	37.83
2	0	0	38.07
2	1	0	41.43
0	0	1	41.98
0	1	1	45.05
1	0	1	46.09
1	1	1	48.90
0	3	0	49.04
2	2	0	50.18
1	3	0	52.60
0	2	1	53.20
1	2	1	56.51
2	0	1	56.67
3	0	0	57.11
2	1	1	58.98
3	1	0	59.40
2	3	0	62.08
0	3	1	64.55
0	4	0	65.38
2	2	1	65.42
3	2	0	65.81
1	3	1	67.30
1	4	0	68.10
3	0	1	70.88
3	1	1	72.74
2	3	1	74.94
3	3	0	75.28
2	4	0	75.66
4	0	0	76.15
0	4	1	77.70
4	1	0	77.88

Ostatní vypočtené vlastní kmity jsou v příloženém souboru Akusticke\_upravy.xls

Tab.3.4 Vypočtené frekvence v jednotlivých kmitočtových pásmech

fstř [Hz]	Pásmo frekv.[Hz]	Počet frekv.
20	18-22,5	1
25	22,5 – 28	1
31	28-35,5	1
40	35,5-45	4
50	45-56	7
63	56-71	13
80	71-90	21
100	90-112	38
125	112-140	68
160	140-180	95
200	180-225	85
250	225-280	93
310	280-355	83

Vlastní kmity byli dále také změřeny spolu s rozložením pole pracovníky Katedry aplikované elektroniky a telekomunikací FEL ZČU.



Obr.3.5 Graf naměřených vlastních kmitů objektu

### 3.4.1 Výpočet kritické frekvence

Pro výpočet kritické frekvence byl použit vztah 2.7. V programu MS Excel byla vypočítána průměrná doba dozvuku  $T_p=1,108s$

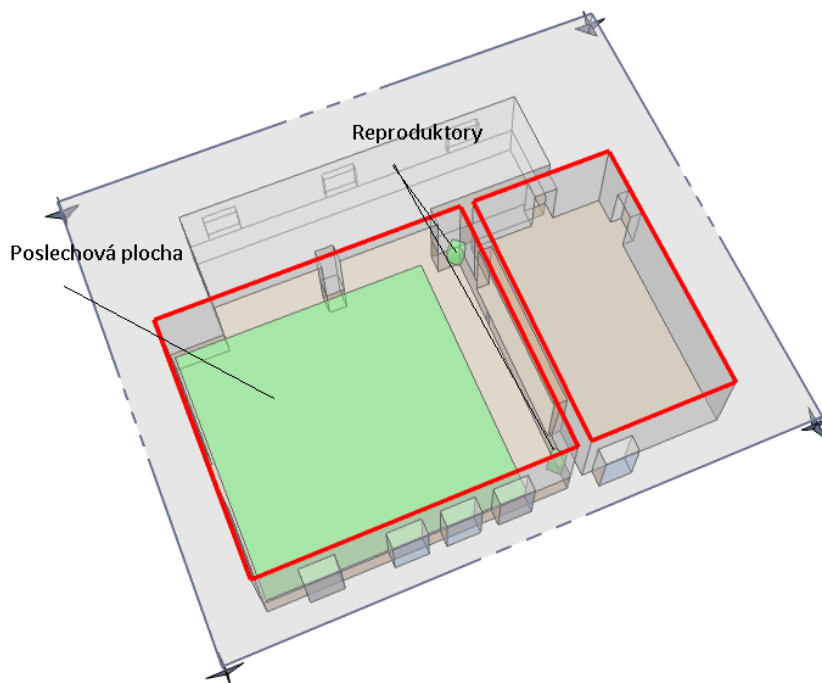
$$f_k = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{1,108}{668,8}} = 81,4Hz$$

Od hodnoty přibližně 80Hz začíná mít pole v místnosti známky rovnoměrného rozložení.

### 3.5 Měření a simulace rozložení pole v sálu KD

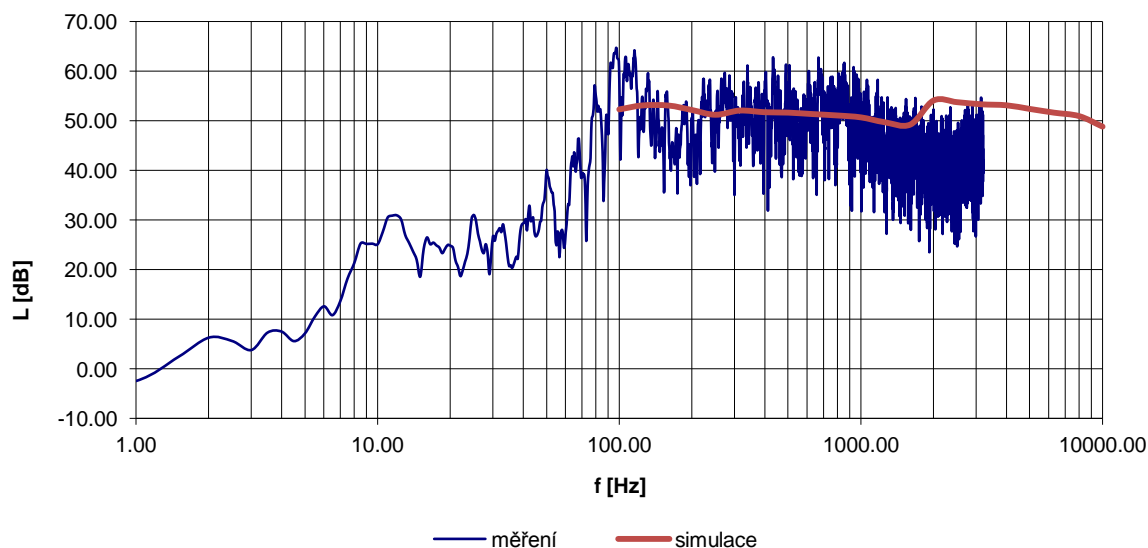
Jak již bylo dříve zmíněno, pracovníci Katedry technologií a měření FEL ZČU provedli v kulturním domě měření doby dozvuku, měření vlastních kmitů místnosti a také měření rozložení pole v sále kulturního domu Žilov. Měření bylo provedeno pro 20 bodů v místnosti a dále pro místa, kde se obvykle nachází zvukař a osvětlovač. Z těchto naměřených charakteristik v jednotlivých bodech lze sestavit mapu místnosti, ze které je patrné celkové rozložení pole v sálu. Dále bylo měření provedeno pro dva různé typy reproduktorů, s každým v několika různých pozicích. Pro tuto práci je však důležité pouze umístění reproduktorů v pozicích na Obr. 3.6, ve kterých se reproduktory nachází při běžném provozu KD. Konkrétně se jedná o dvoupásmové reprosoustavy QSC HPR122i.

Pro doplnění měření byla provedena také simulace akustických parametrů v programu EASE, jehož licenci vlastní elektrotechnická fakulta. Model objektu byl vytvořen v programu SketchUp. Jako poslechová plocha pro simulaci byla použita plocha rovnoběžná s podlahou sálu ve výšce 130 cm. To je přibližně výška sedícího dospělého člověka.



Obr.3.6 Poslechová plocha v modelu

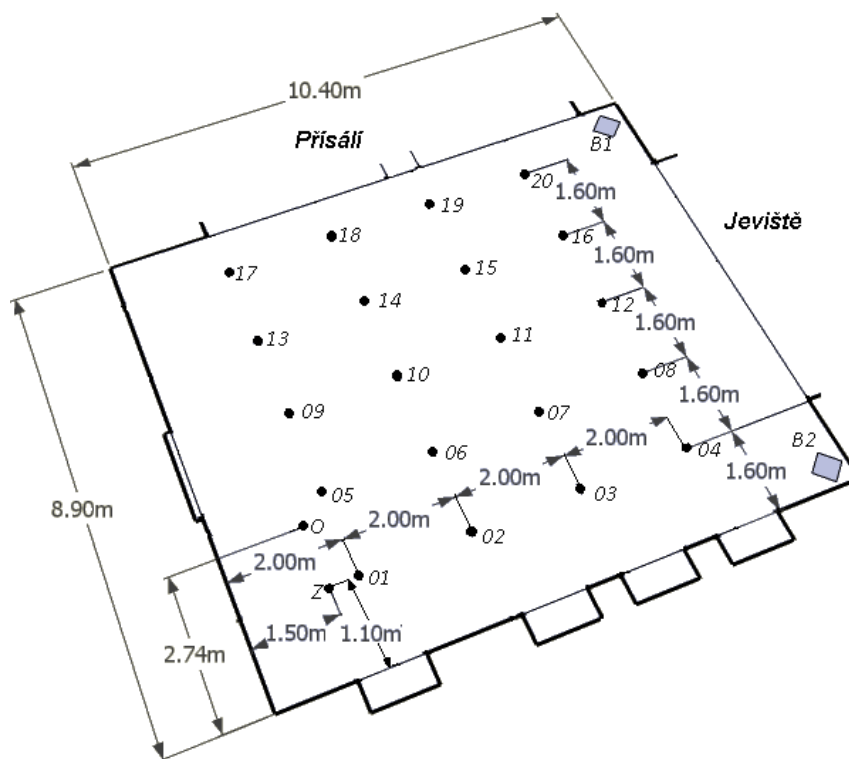
V programu EASE nelze provést simulaci stejně jako měření, tedy spojitě v celém frekvenčním pásmu od 1 Hz do 4000 Hz. Simulace je tedy provedena v 1/3 oktávových pásmech od 100 Hz do 8 kHz. Simulací lze získat dva druhy výsledků. Pro porovnání s měřením byly použity frekvenční závislosti akustického tlaku v jednotlivých bodech, stejných jako při měření. Simulace byla provedena pouze pro dvě umístění reproduktorů, viz Obr. 3.6. Jako zdroj zvuku byly použity stejné reproduktory jako při měření (QSC HPR122i), s parametry z knihovny EASE.



Obr.3.7 Rozložení pole v bodě 01, reproduktor v pozici B1



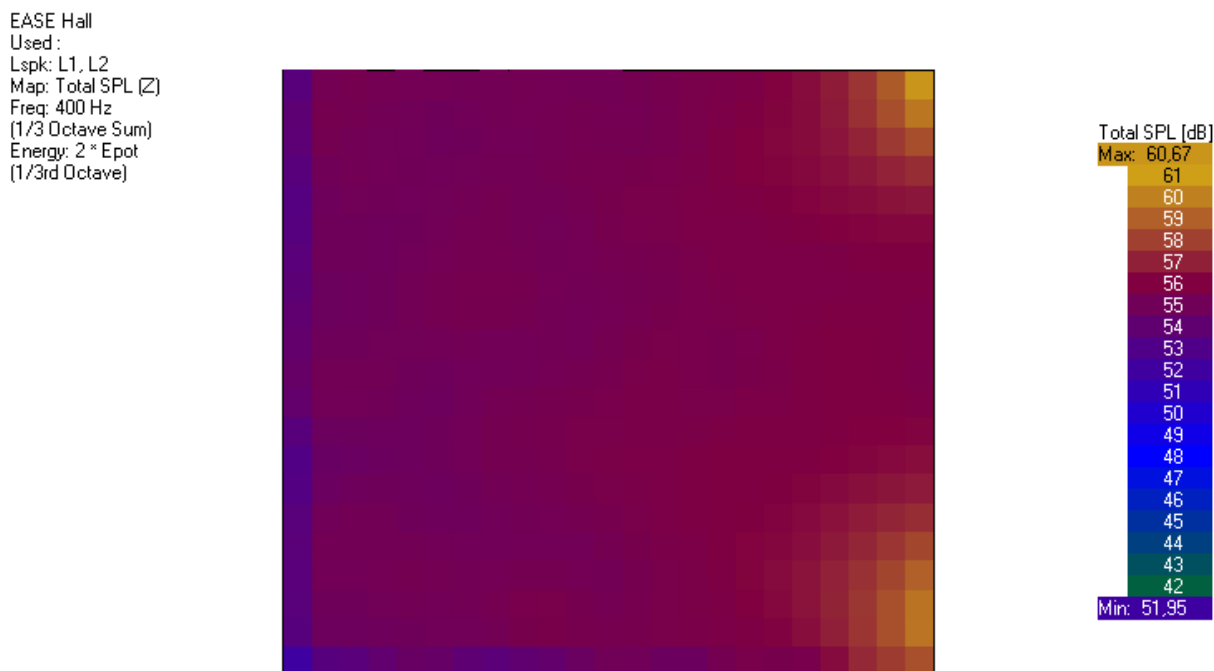
Z porovnání naměřených a vypočítaných hodnot je patrné, že EASE nedokáže zohlednit lokální minima a maxima, zřetelná z výsledku měření. Dále je z grafu zřejmé, že reálná reprosoustava má jiné parametry než jsou uloženy v knihovně EASE. Podle EASE má vysokotónový reproduktor vyšší citlivost než středobasový. To je patrné i z naměřených hodnot, ovšem dělicí kmitočet výhybky v soustavě je kolem přibližně 2 kHz. Reálně je tento kmitočet posunut výše.



Obr.3.8 Rozmístění měřících bodů v poslechové ploše

### 3.5.1 Simulace reálné situace

Dále, na rozdíl od výsledků simulace kvůli srovnání s měřením, tedy frekvenční závislosti akustického tlaku v jednotlivých bodech, je možné v programu EASE dostat celkové rozložení akustického tlaku na poslechové ploše pro jednotlivé frekvence (od 100 Hz do 8 kHz v 1/3 oktávových pásmech). Pro tuto simulaci bylo použito reálné rozestavení reproduktorů, tedy reprosoustavy QSC HPR122i v pozicích B1 a B2. Jak již bylo dříve uvedeno, v těchto pozicích se reprosoustavy nachází při reálném provozu.



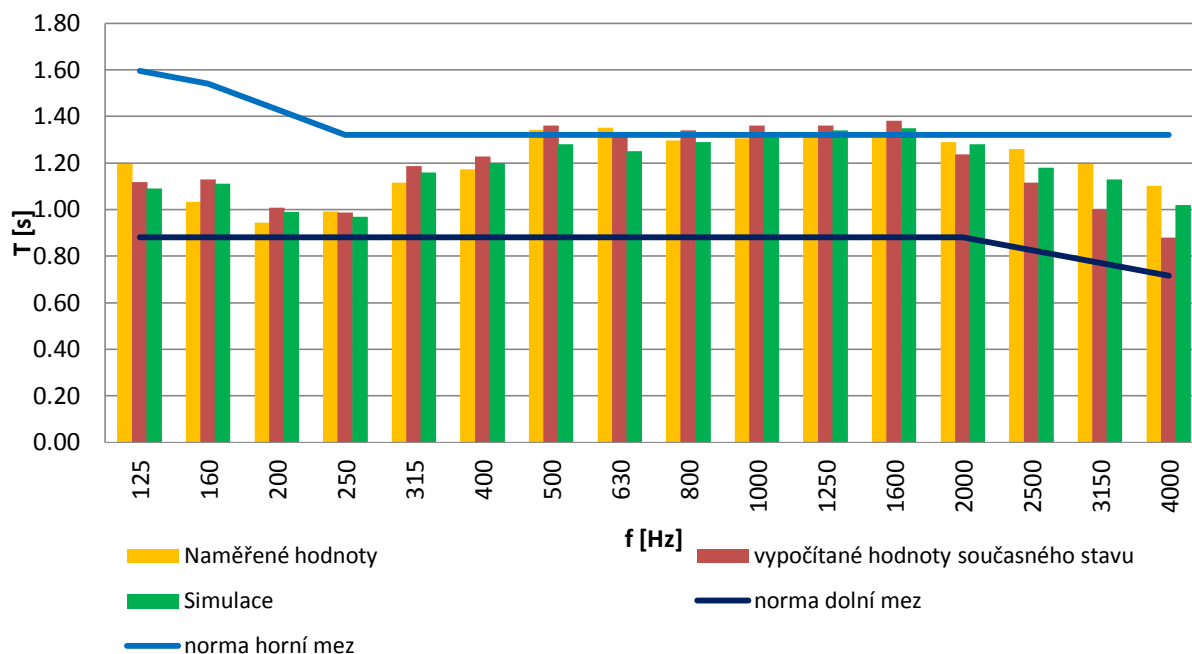
(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 8.3.2012 12:03:28 / University of West Bohemia Jiri Stifter

*Obr.3.9 Rozložení akustického tlaku při 400 Hz*

Z takto vykreslené mapy poslechového prostoru je mnohem lépe zřejmé, jaký je v daném místě akustický tlak. Naopak, ale výhodou mapy složené z naměřených charakteristik v jednotlivých bodech oproti této mapě je, že je z ní patrné i rozložení pole na nízkých frekvencích a jsou tam více zohledněny vlastní kmity místnosti. Mapy poslechového prostoru pro ostatní 1/3 oktávové kmitočty jsou na přiloženém CD. Simulace byla provedena na poměrně nízké úrovni akustického tlaku z důvodů možnosti srovnání výsledků s měřením. Při měření bílým šumem nelze dosáhnout vysokého akustického tlaku.

### 3.6 Zhodnocení současných akustických parametrů

Hodnoty doby dozvuku získané výpočtem, měřením i simulací se poměrně shodují (viz. Obr.3.10). Na nízkých kmitočtech (kolem 200 Hz) se projevuje zvláštní průběh činitele zvukové pohltivosti stropní konstrukce. Ten se na této frekvenci patrně chová jako rezonátor. Na středních kmitočtech pak doba dozvuku lehce přesahuje hranici danou normou. Zde bude tedy nutná lehká korekce. Na vyšších středních kmitočtech je lehké přesáhnutí normy způsobené úplným vyprázdněním sálu. V případě zaplnění sálu lidmi se doba na vyšších středních kmitočtech zkrátí.



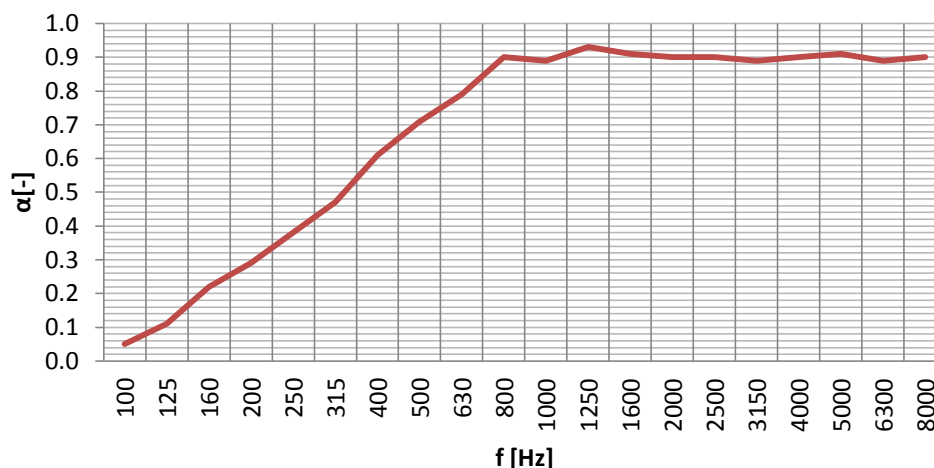
Obr.3.10 Doba dozvuku na jednotlivých kmitočtech včetně normy

Dále, jak je patrné z grafu vlastních kmitů, amplituda přibližně 80 Hz velmi přesahuje hodnoty amplitud frekvencí ostatních. Bude tedy nutné tuto frekvenci ztlumit.

Podle jednotlivých map rozložení akustického tlaku na poslechové ploše, je toto pole poměrně vyrovnané. Nejméně vyrovnané je pole na vysokých kmitočtech, přibližně od 4 kHz.

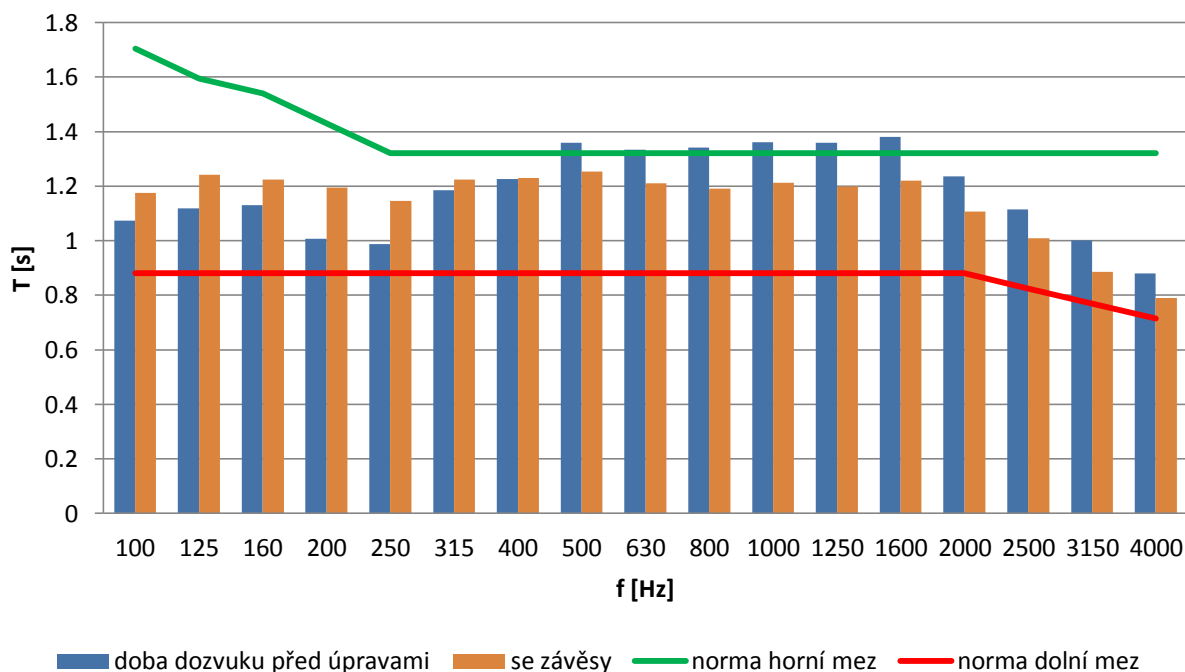
### 3.7 Přidání závěsů

V průběhu řešení akustických úprav byly obci zakoupeny sametové závěsy, kterými jsou nyní zakryta 4 okna nacházející se v hlavním sále. Závěsy mají řasení 150 % a střední plošnou hmotnost  $310 \text{ g/m}^2$ . Tyto závěsy se běžně používají v interiérech například divadel, kulturních domů nebo obytných prostorů. Velmi snadno lze měnit jejich plochu, fungují tedy jako velmi jednoduchý a účinný prvek pro změny v prostorové akustice.



Obr.3.11 Závislost činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  sametu  $310\text{g/m}^2$  na frekvenci.[6]

Vzhledem k poměrně vysokým hodnotám činitele zvukové pohltivosti těchto závěsů na středních a vyšších kmitočtech, došlo jejich instalací ke zkrácení doby dozvuku na těchto frekvencích.



Obr.3.12 Doba dozvuku po přidání závěsů

Tyto závěsy byly také dokresleny do modelu v programu SketchUp a bylo s nimi nasimulováno rozložení akustického tlaku na poslechové ploše. Poslechová plocha i oba reproduktory byly použity stejné a na stejných místech jako při simulaci stávajícího stavu před úpravami.



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 4.5.2012 13:39:30 / University of West Bohemia Jiri Stifter

*Obr.3.13 Rozložení akustického tlaku při 400 Hz po přidání závěsů*

Rozložení akustického pole po nainstalování závěsů zůstalo prakticky totožné jako při simulaci provedené bez této přidané pohltivé plochy. To je patrné při porovnání Obr.3.9 a Obr.3.13. Mapy rozložení pole na ostatních kmitočtech po přidání závěsů jsou na přiloženém CD.

## 4 Návrh úprav

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, částí nejvíce potřebující rekonstrukci, je strop objektu v sále a nad jevištěm. Jako nejrozumnější varianta po akustické i finanční stránce se jeví zaizolování stropu pomocí foukané izolace climatizer. Dražší, ale zřejmě kvalitnější řešení by byla aplikace polyuretanové pěny (PUR). Tyto izolace by měly zabránit úniku tepla, také ještě dále zpevnit jednotlivé desky ve stropní konstrukci a tím pádem vyrovnat průběh činitele zvukové pohltivosti. To bude mít vliv na prodloužení doby dozvuku na nízkých kmitočtech.

### 4.1 Výpočet rezonátoru na 80 Hz

Dále bude nutné ztlumit vlastní frekvence kolem 80 Hz, jejichž amplituda je větší než amplituda ostatních frekvencí (viz Obr.3.5). Na této frekvenci se i podle teoretického výpočtu nachází největší množství vlastních kmitů, než začne pole jevit známky rovnoměrného

rozložení. V objektu není moc vhodných míst, kam lze umístit rezonátor, a proto bylo po dohodě rozhodnuto, že se použijí rezonátory do dvou rohů v hlavním sále, které jsou naproti jevišti.

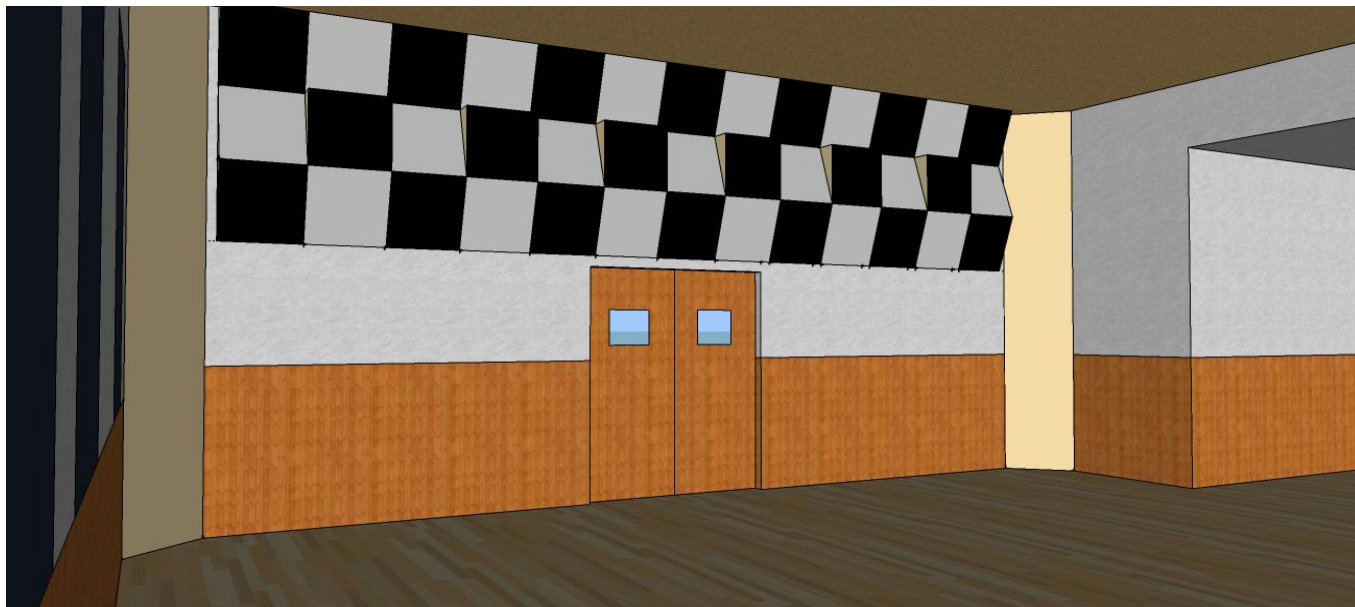


Obr.4.1 Rezonátor na 80 Hz

Výpočet rezonátoru byl proveden v příloženém souboru „Akusticke\_upravys.xls“. Může být vyroben z překližky o tloušťce 18 mm. Výška rezonátoru je 1 metr, šířka štěrbin 12 mm a délky odvěsen podstavné hrany 0,5 m. Z těchto rezonátorů pak lze vytvořit svislé pásy od země až ke stropu v obou rozích sálu. Výkres jednoho rezonátoru je stejně jako výkresy ostatních navržených akustických prvků uveden v příloze.

#### 4.2 Členitá plocha pro úpravu doby dozvuku a rozložení pole

Jedinou vhodnou plochou, kam lze umístit akustické prvky, zůstává stěna nad vchodovými dveřmi do sálu. Na tuto plochu byla tedy navržena jednoduchá konstrukce se dvěma typy rezonátorů. Podle [2] je dobrým typem periodické struktury pro rozptýlení zvuku pravidelné uspořádání desek s různou akustickou impedancí, tedy s různými činiteli zvukové pohltivosti.



Obr.4.2 Model konstrukce rezonátorů

#### 4.2.1 Porézní materiál na 2 kHz

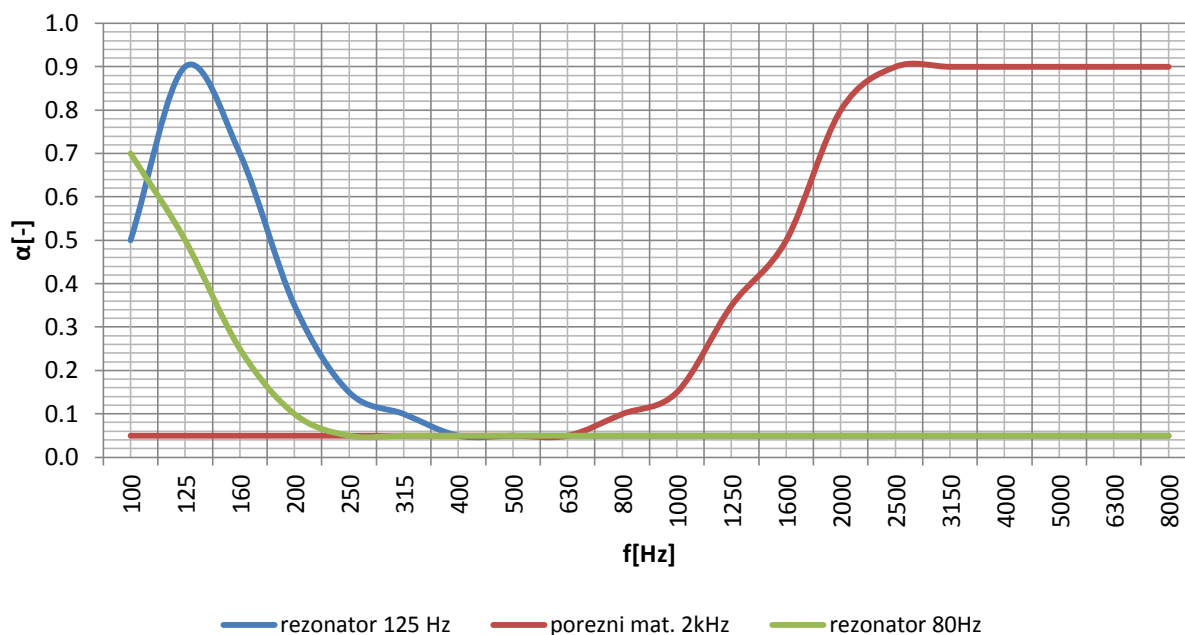
Na Obr.4.2 je vidět výsledný vzhled navržené konstrukce. První akustický prvek nacházející se v konstrukci je pevná deska s vrstvou přibližně 25 mm porézního materiálu. Tato deska je na obrázku nakreslena bílou barvou. Desek se v konstrukci nachází celkem 19 kusů, rozměr jedné desky je 60x60 cm, což je také rozměr standardních průmyslově vyráběných akustických obkladů. Pevná deska může být například překližka 22 mm. Jako porézní materiál může být použit například molitan nebo vrstva climatizeru. Takto vyrobená deska bude mít nejvyšší činitel zvukové pohltivosti přibližně ve 2000 Hz. Celý průběh činitele zvukové pohltivosti je na Obr. 4.3.

#### 4.2.2 Akustické prvky na 125 Hz

Jako druhý prvek v konstrukci je rezonátor naladěný na 125 Hz. Tento kmitočet je podle Obr.3.12 potřeba lehce ztlumit. Navíc rezonátor naladěný na tento kmitočet odpovídá podmínce, aby se v konstrukci střídaly dva prvky s různým průběhem  $\alpha_{(f)}$ . Výpočet tohoto rezonátoru je proveden v souboru „Akusticke\_upravy.xls“, a to pro dva typy rezonátorů.

První z nich je Helmholtzův rezonátor. Rozměr je opět 60x60 cm. Poloměr jednoho otvoru byl zvolen 5 mm, tloušťka desky 18 mm a počet děr v jedné desce 49. Podle vztahu 2.6 pak vychází výška vzduchového polštáře 85 mm.

Druhý typ rezonátoru je kmitající deska. Rozměr jedné desky musí být také 60x60 cm. Jako kmitající desku lze nejnázne použít sololak, jehož měrná plošná hmotnost je  $3,4 \text{ kg/m}^3$ . Výška vzduchového polštáře pak bude podle vztahu 2.13  $d=68 \text{ mm}$ .



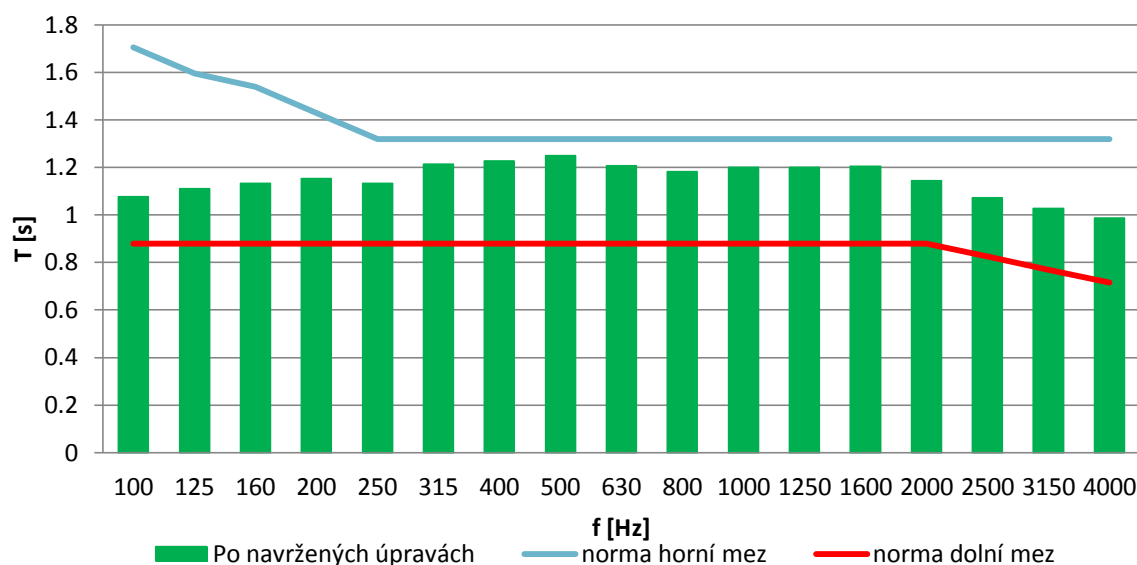
Obr.4.3 Průběh činitele zvukové pohltivosti navržených prvků [2]

Oba tyto typy rezonátorů musejí být vyrobeny v podobě jakýchsi kazet. Při umístění v nerovné ploše by jinak rezonátory neměli vždy stejné vlastnosti. Jako deska pro základnu je vhodná překližka tloušťky 22 mm.

## 5 Ověření návrhu akustických úprav

Na závěr práce bylo provedeno ověření funkčnosti vypočítaných a navržených akustických úprav a to simulací v programu EASE a také teoretickým výpočtem provedeným v příloženém souboru „Akusticke\_upravy.xls“. V teoretickém výpočtu byla vypočítána doba dozvuku podle Eyringa i s přidávanými plochami akustických prvků.





Obr.5.1 Doba dozvuku po navržených úpravách.

## 5.1 Simulace v programu EASE

Nejefektivnější způsob ověření akustických úprav před jejich realizací je simulace v počítačovém programu. V programu EASE byl již v této práci simulován současný stav rozložení pole a doby dozvuku v kulturním domě. Do 3D modelu v programu SketchUp byly tedy dokresleny rohové rezonátory tlumící vlastní kmity sálu kolem 80 Hz a dále také přidána zakřivená plocha s periodicky se střídajícími akustickými prvky, viz Obr.4.2. Tato simulace byla na rozdíl od simulace současného stavu uvedené v kapitole 3 provedena s maximálním akustickým tlakem, který jsou schopny reproduktory QSC HPR122i podle knihovny EASE dodat.



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:09:54 / University of West Bohemia Jiri Stifter

*Obr.5.2 Mapa akustického tlaku na poslechové ploše po úpravách, 400Hz*

Na Obr.5.2 je zřejmé, že akustické úpravy přispějí k lepšímu, rovnoměrnějšímu rozložení akustického tlaku. Zejména na okrajích poslechové plochy a v rozích místnosti se rozložení pole zrovnoměrní. Rozložení pole na ostatních jednotlivých kmitočtech po navržených úpravách zobrazeny v příloze.

## Závěr

Během této bakalářské práce byly postupně splněny všechny body zadání. Naměřená doba dozvuku byla ověřena výpočtem a také simulací, naměřené hodnoty rozložení pole byly také ověřeny simulací. Z těchto hodnot vyplynula potřeba zkrátit dobu dozvuku na některých kmitočtech tak, aby odpovídala normě ČSN 73 0527, konkrétně požadavkům pro víceúčelové sály.

Během práce byly na okna sálu kulturního domu zakoupeny ještě sametové závěsy, které bylo tedy také nutné zahrnout do výpočtů a simulace. Po přepočítání výsledné doby dozvuku a provedení simulace se ukázalo, že instalace závěsů pomohla celkové akustice. I přes tuto skutečnost bylo však nutné navrhnout ještě další akustické úpravy.

První akustickou úpravou by měla být instalace rezonátorů laděných na 80 Hz. Dále byla navržena konstrukce pro zlepšení difuzity akustického pole a také částečnému zatlumení frekvence 125 Hz a pak také vysokých frekvencí od 2 kHz výše. Tato konstrukce se tedy sestává ze dvou akustických prvků. Před instalací těchto prvků by bylo vhodné je změřit v dozvukové komoře, zda jejich reálné parametry odpovídají přesně vypočítaným.

Je samozřejmé, že by při návrhu úprav bylo nejjednodušší vycházet a počítat s instalací průmyslově vyráběných akustických prvků. To však nebylo cílem této práce a proto byl při návrhu akustických úprav v první řadě brán ohled na celkovou cenu všech prvků a konstrukcí. Veškeré materiály použité pro akustické úpravy jsou snadno dostupné a jejich zpracování je možné v běžné truhlárně. Navíc je lze všechny poměrně snadno natřít barvou a přizpůsobit tedy jejich design požadavkům uživatelů KD.

## Použitá literatura

- [1] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL, 1982.
- [2] VAVERKA, Jiří. a kol. *Stavební fyzika 1: urbanistická stavení a prostorová akustika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1998.
- [3] ALTMAN, Jan. *Návrh akustických úprav poslechové místnosti*. Diplomová práce. Plzeň: ZČU v Plzni, 2010.
- [4] KRŇÁK, Milan. *Akustické obklady*. Zájmový náklad Výzkumného ústavu zvukové, obrazové a reprodukční techniky. Praha: STK, 1971.
- [5] ČSN 73 0527. *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely*. Praha 6: Český normalizační institut, Březen 2005.
- [6] SONING. *Katalog akustických prvků*. Praha, 2011. ISBN 978-80-7331-316-6

## Přílohy

**Příloha 1** Navržená konstrukce, pohled z boku

**Příloha 2** Výkres navrženého Helmholtzova rezonátoru na 125Hz

**Příloha 3** Výkres navržené kmitající desky na 125Hz

**Příloha 4** Výkres navrženého porézního materiálu na 2kHz

**Příloha 5** Výkres navrženého rohového rezonátoru na 80Hz

**Příloha 6** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=100\text{Hz}$

**Příloha 7** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=125\text{Hz}$

**Příloha 8** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=160\text{Hz}$

**Příloha 9** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=200\text{Hz}$

**Příloha 10** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=250\text{Hz}$

**Příloha 11** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=315\text{Hz}$

**Příloha 12** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=400\text{Hz}$

**Příloha 13** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=500\text{Hz}$

**Příloha 14** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=630\text{Hz}$

**Příloha 15** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=800\text{Hz}$

**Příloha 16** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=1000\text{Hz}$

**Příloha 17** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=1250\text{Hz}$

**Příloha 18** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=1600\text{Hz}$

**Příloha 19** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=2000\text{Hz}$

**Příloha 20** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=2500\text{Hz}$

**Příloha 21** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=3150\text{Hz}$

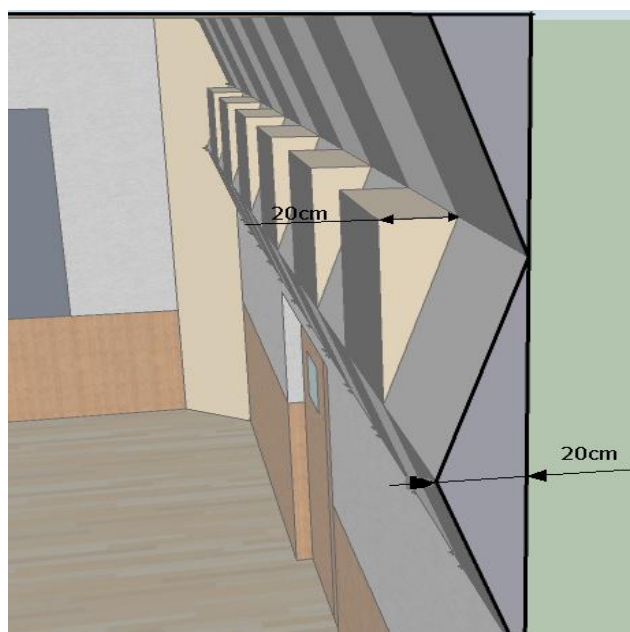
**Příloha 22** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=4000\text{Hz}$

**Příloha 23** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=5000\text{Hz}$

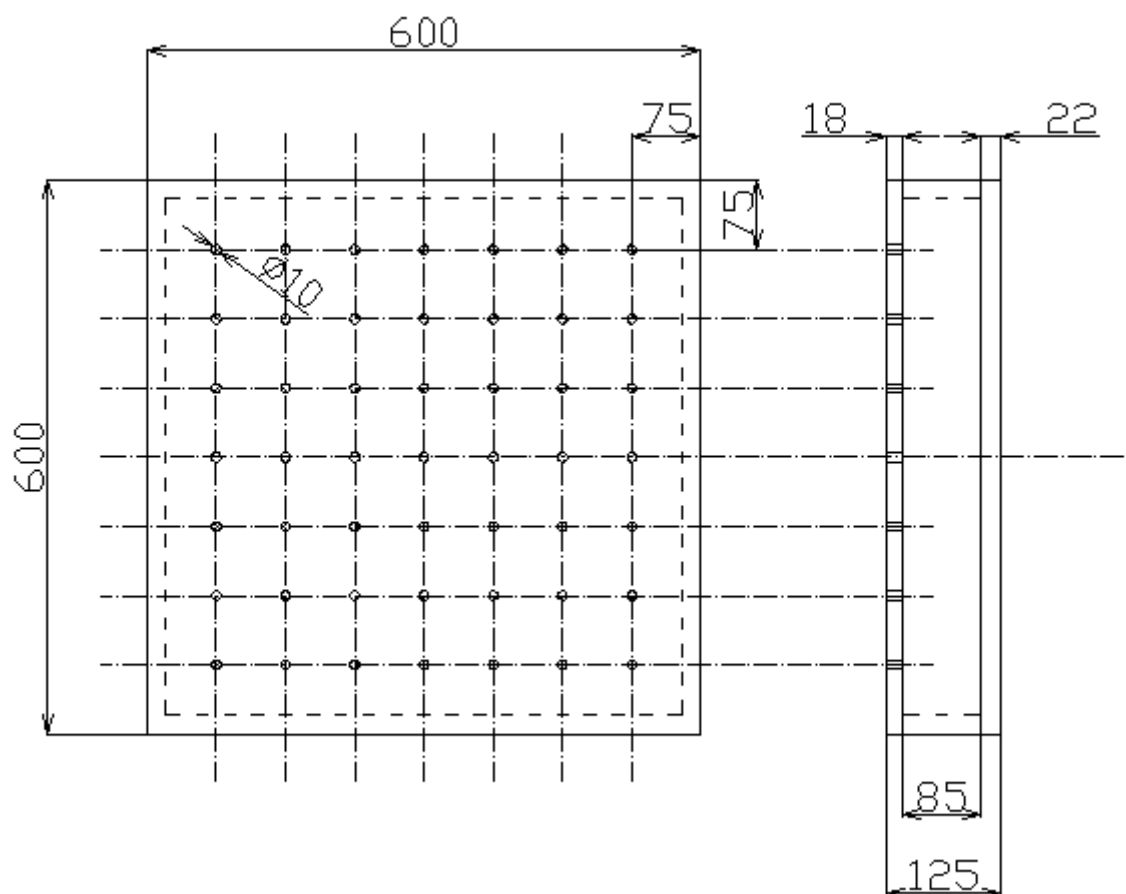
**Příloha 24** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=6300\text{Hz}$

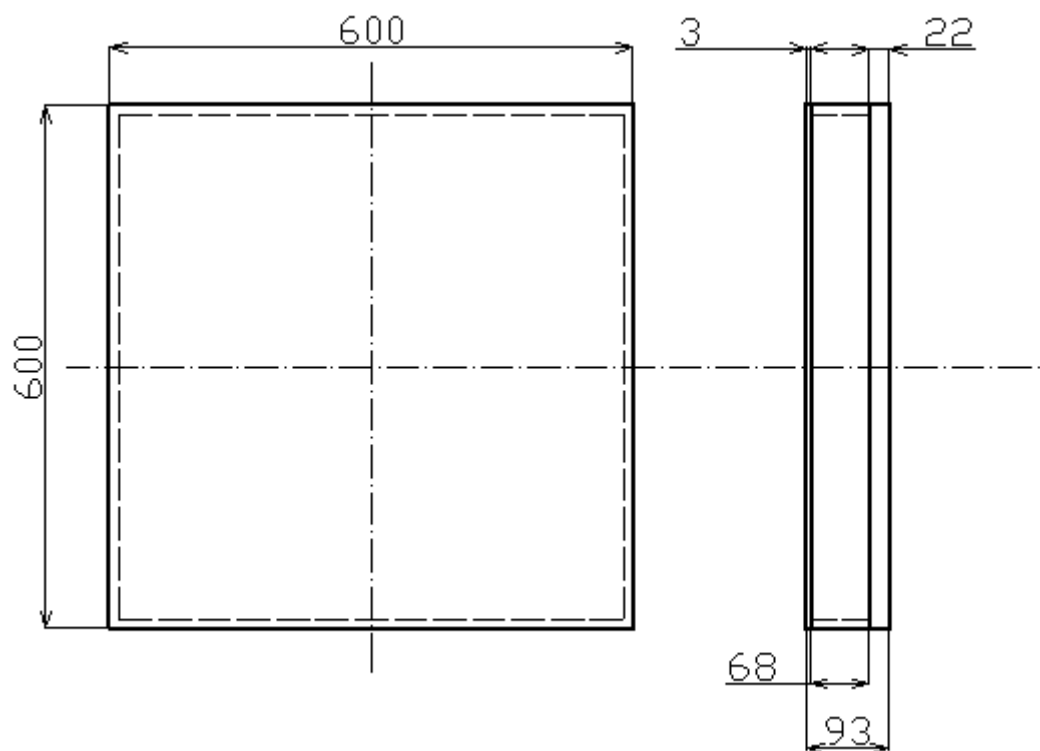
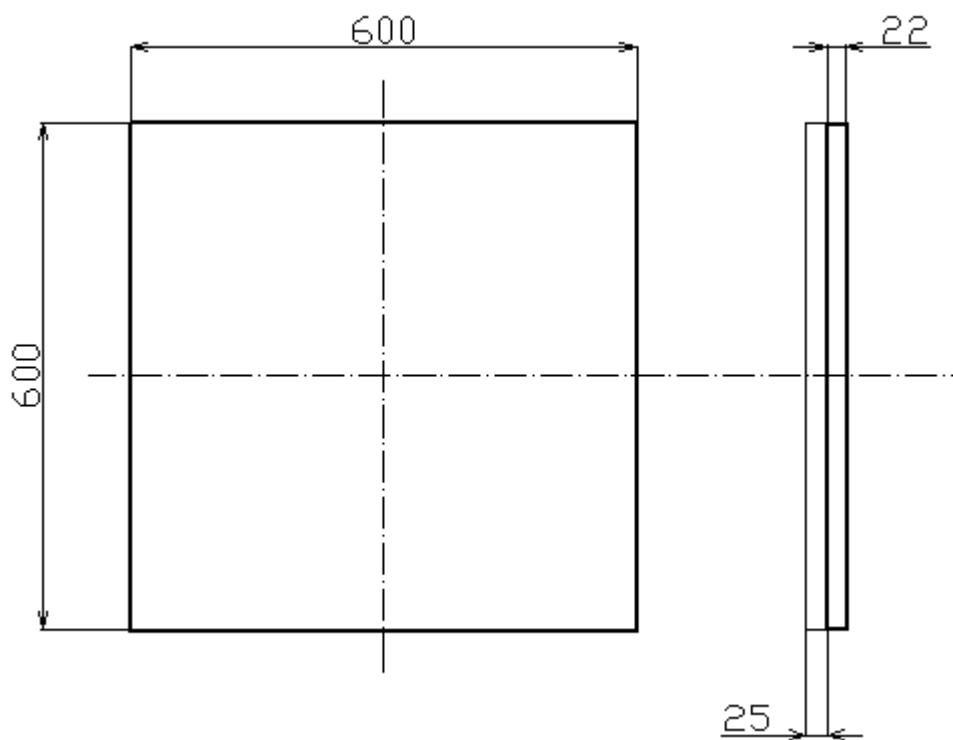
**Příloha 25** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=8000\text{Hz}$

**Příloha 1** Navržená konstrukce, pohled z boku

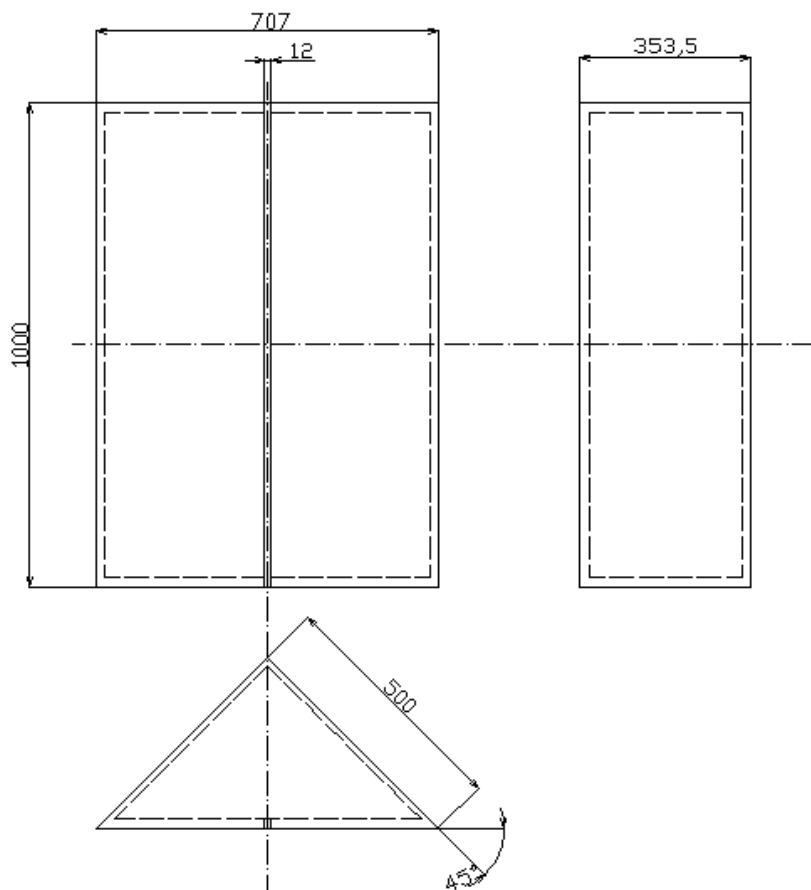


**Příloha 2** Výkres navrženého Helmholtzova rezonátoru na 125Hz



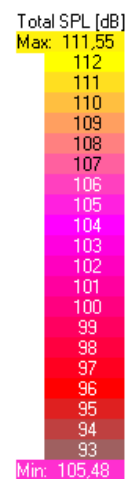
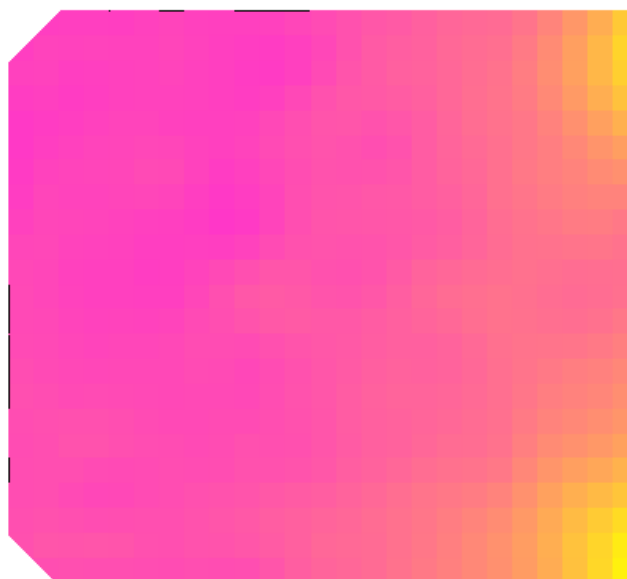
**Příloha 3** Výkres navržené kmitající desky na 125Hz**Příloha 4** Výkres navrženého porézního materiálu na 2kHz

**Příloha 5** Výkres navrženého rohového rezonátoru na 80Hz



**Příloha 6** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=100\text{Hz}$

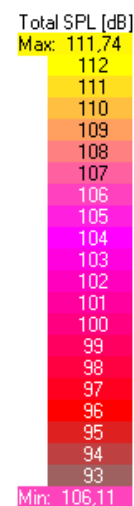
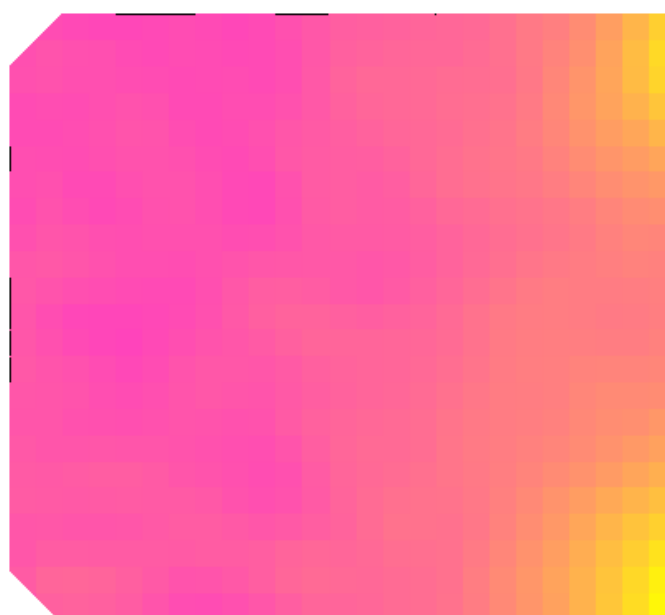
EASE Hall  
 Used:  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 100 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)





**Příloha 7** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=125\text{Hz}$

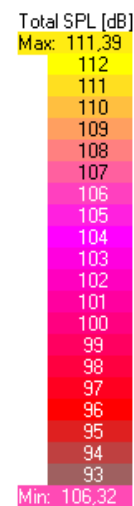
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 125 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:08:07 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 8** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=160\text{Hz}$

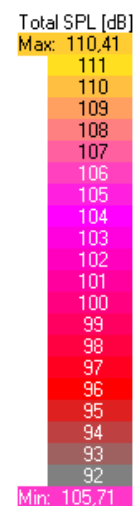
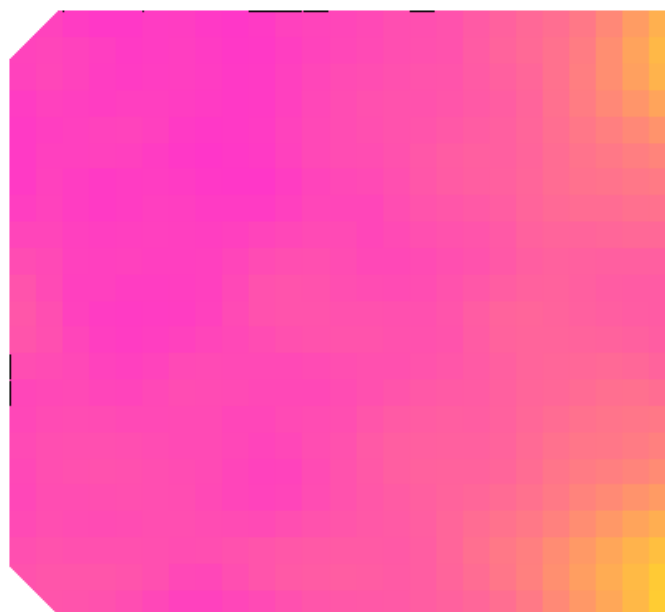
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 160 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:08:26 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 9** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=200\text{Hz}$

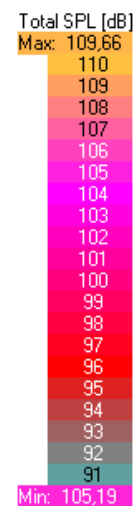
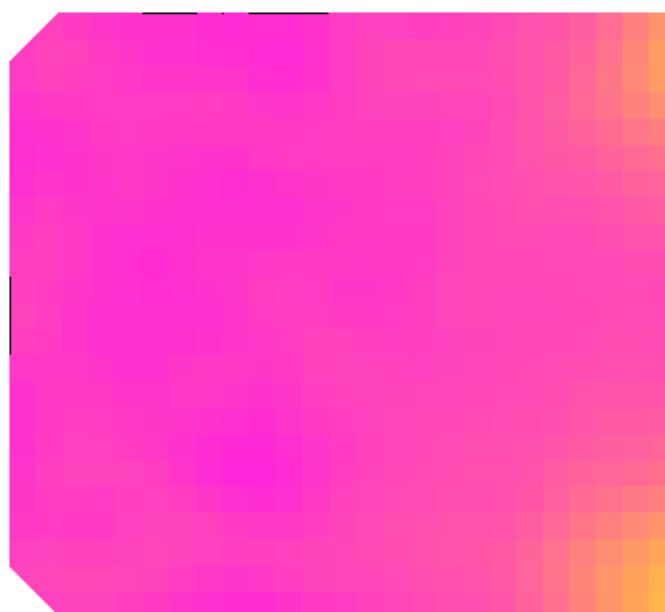
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 200 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:08:43 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 10** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=250\text{Hz}$

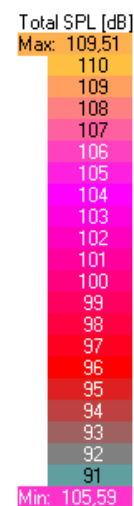
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 250 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:09:18 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 11** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=315\text{Hz}$

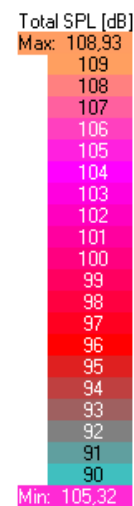
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 315 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:09:41 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 12** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=400\text{Hz}$

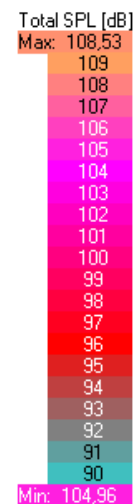
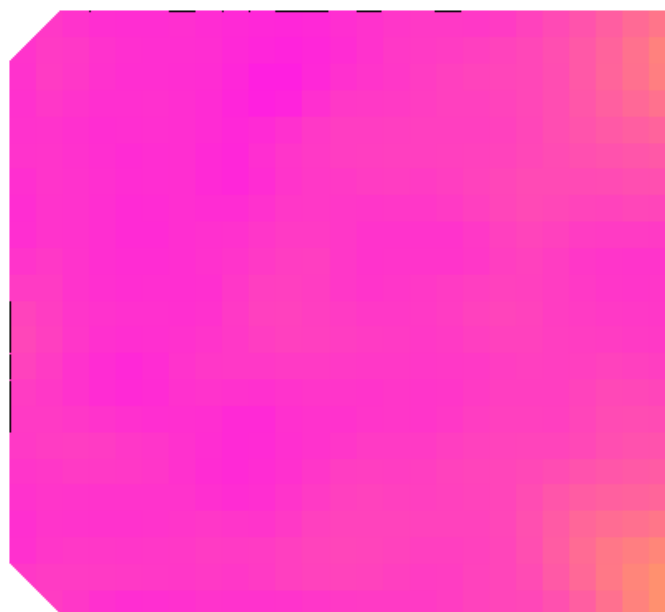
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 400 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:09:54 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 13** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=500\text{Hz}$

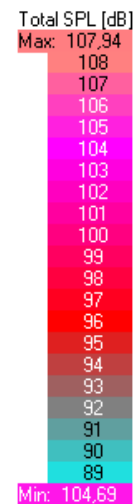
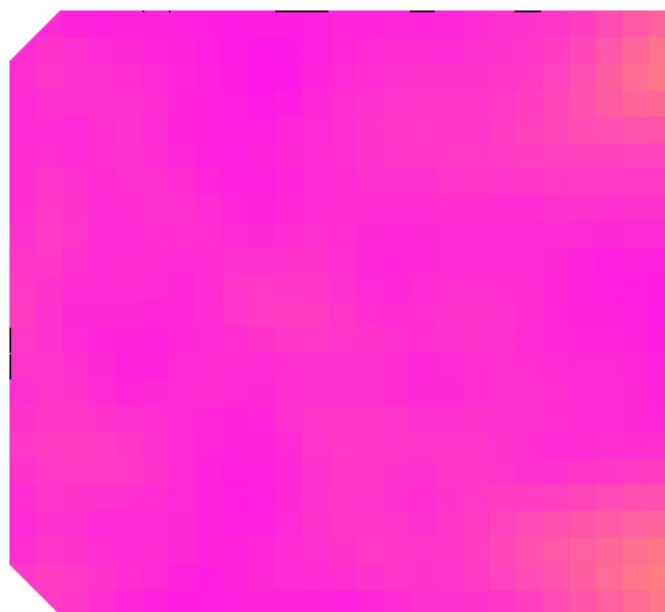
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 500 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:10:06 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 14** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=630\text{Hz}$

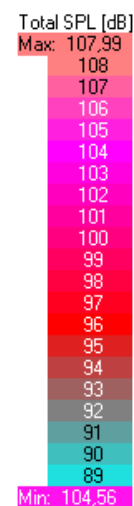
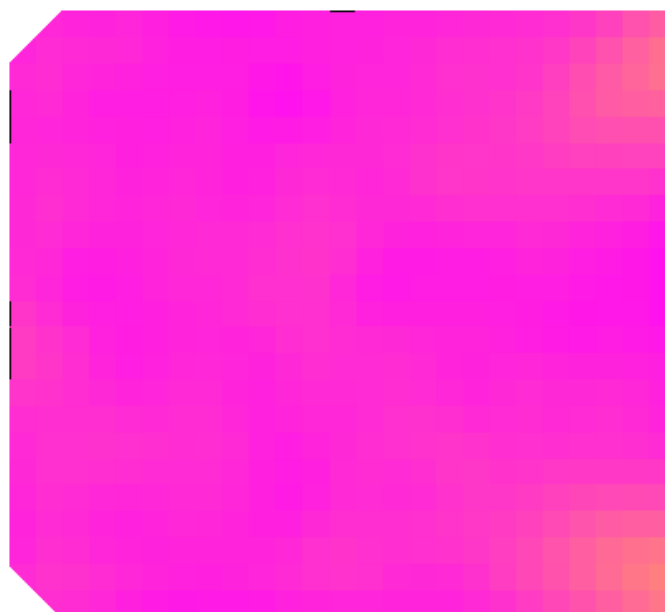
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 630 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:10:20 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 15** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=800\text{Hz}$

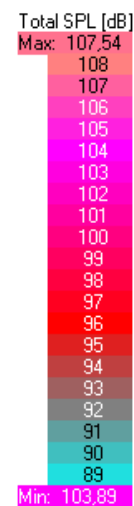
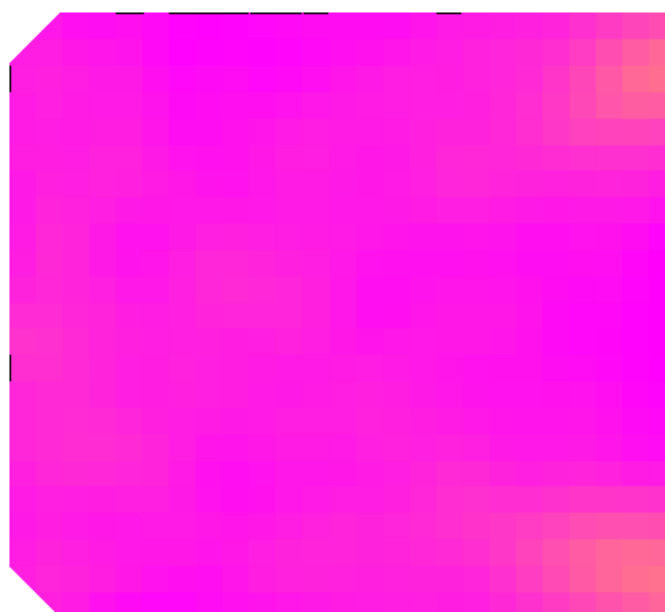
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 800 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:10:30 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 16** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=1000\text{Hz}$

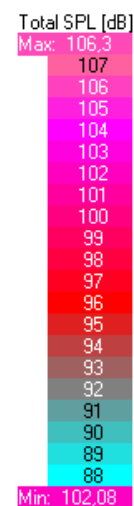
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 1000 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:10:46 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 17** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=1250\text{Hz}$

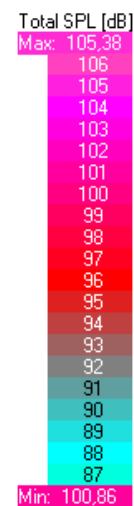
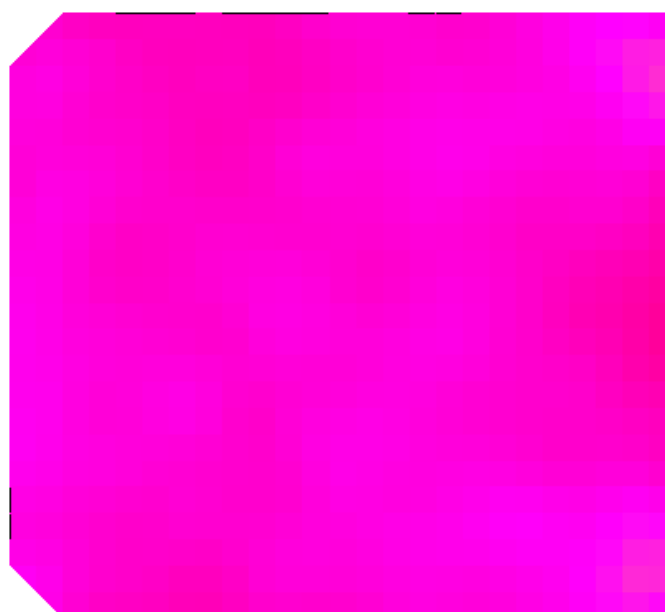
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 1250 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:10:57 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 18** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=1600\text{Hz}$

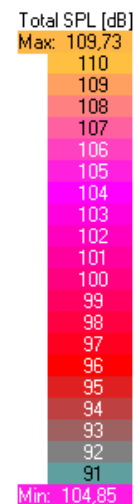
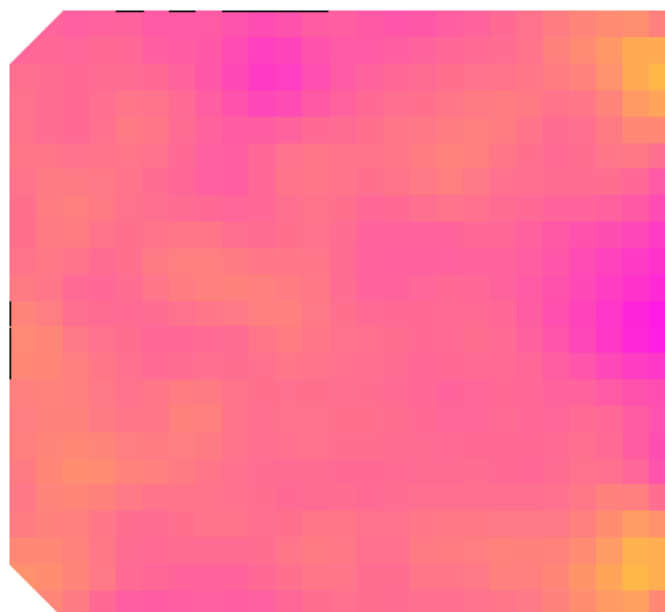
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 1600 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:11:15 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 19** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=2000\text{Hz}$

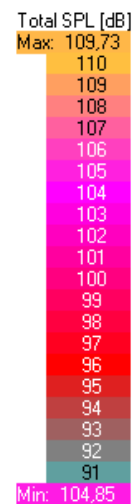
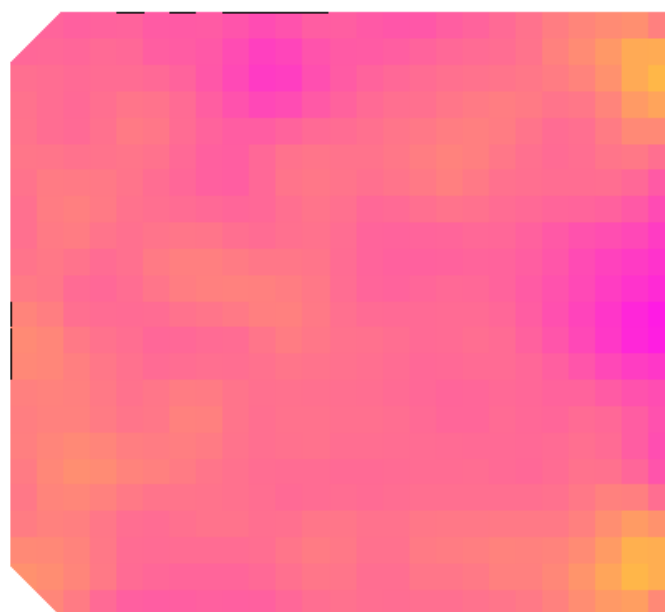
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 2000 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:11:39 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 20** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=2500\text{Hz}$

EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 2500 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:11:39 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 21** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=3150\text{Hz}$

EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 3150 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:12:04 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 22** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=4000\text{Hz}$

EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 4000 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)

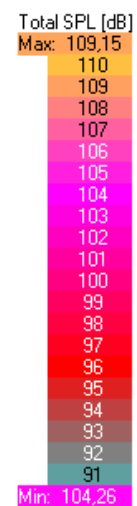
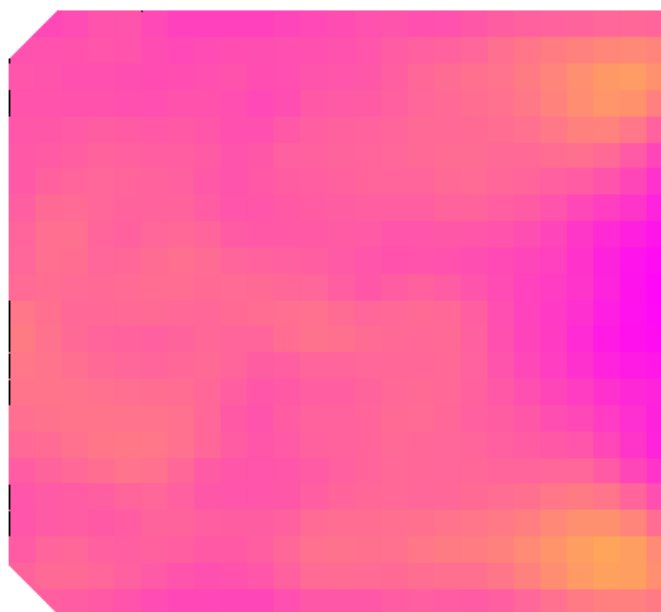


(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:12:19 / University of West Bohemia Jiri Stifter



**Příloha 23** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=5000\text{Hz}$

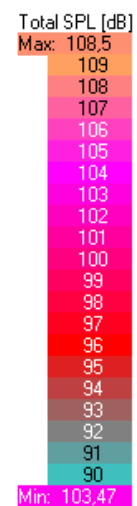
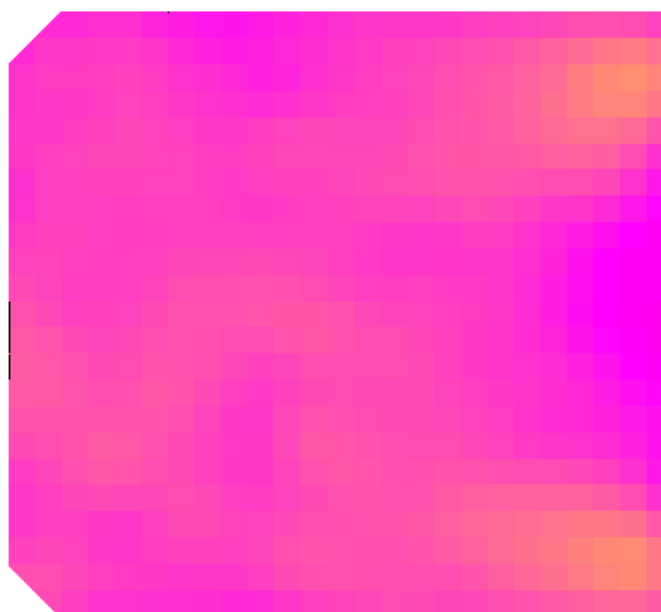
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 5000 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:12:29 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 24** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=6300\text{Hz}$

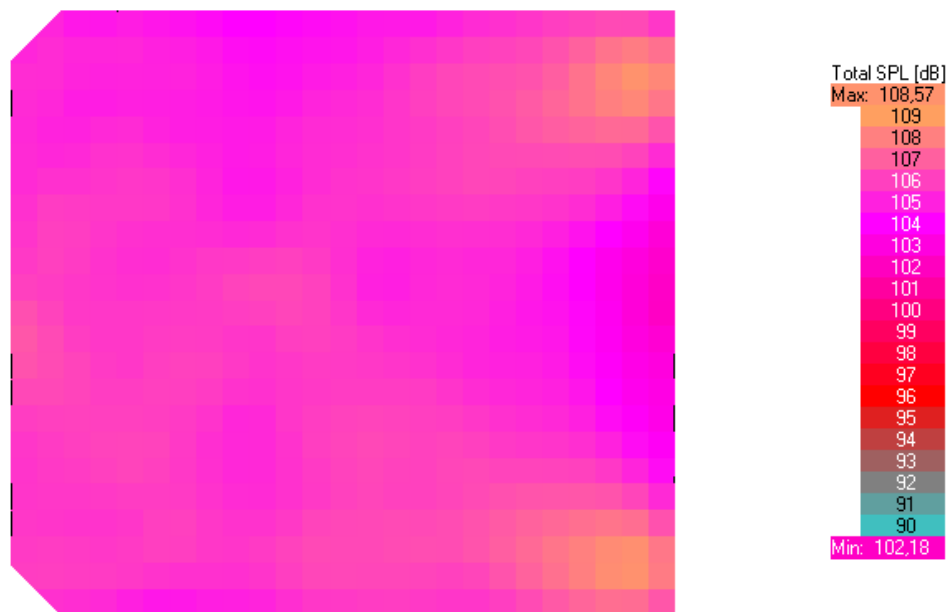
EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 6300 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:12:40 / University of West Bohemia Jiri Stifter

**Příloha 25** Rozložení pole na poslechové ploše po navržených úpravách,  $f=8000\text{Hz}$

EASE Hall  
 Used :  
 Lspk: L1, L2  
 Map: Total SPL (Z)  
 Freq: 8000 Hz  
 (1/3 Octave Sum)  
 Energy: 2 \* Epot  
 (1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 10.5.2012 14:12:51 / University of West Bohemia Jiri Stifter