

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh akustických úprav hudebního klubu**

**vedoucí práce: Ing. Jan Altman**

**2012**

**autor: Bc. Martin Mařík**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta elektrotechnická**  
**Akademický rok: 2011/2012**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin MAŘÍK**  
Osobní číslo: **E10N0212P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Návrh akustických úprav hudebního klubu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Prostudujte stávající řešení akustických úprav a ozvučení hudebního klubu House of Blues.
2. Změřte akustické parametry prostoru klubu.
3. Navrhněte možné zlepšení akustických parametrů včetně možných úprav ozvučení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**


Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Altman**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Tato práce se zabývá problematikou prostorové akustiky. V první části je uvedeno několik základních akustických pojmů a prvků. V dalších částech je práce zaměřena na návrh akustických úprav hudebního klubu House of Blues v Plzni včetně popisu měření. Popsán je také současný stav poslechového prostoru včetně analýzy stávajícího zvukového systému.

## **Klíčová slova**

prostorová akustika, doba dozvuku, vlastní frekvence, Helmholtzův rezonátor, difuzor, pohltivý materiál, ozvučovací systém

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the issue of room acoustics. First part contains basic terms and elements of room acoustics. In other parts is described design of room acoustic solution of music club House of Blues in Pilsen including measurement. The current state of listening space and sound system is also analyzed.

## **Key words**

room acoustics, reverberation time, room modes, Helmholtz resonator, diffraction object, absorptive material, sound system

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 7.5.2012

Martin Mařík

.....

## **Poděkování**

*Na tomto místě bych rád poděkoval rodičům a všem ostatním, kteří mě při psaní této práce jakkoliv podpořili. Zejména bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Altmanovi za cenné rady a připomínky, dále Ing. Oldřichu Turečkovi, Ph.D. za rady o ozvučovacích systémech a Daniele Krupičkové za kontrolu pravopisu.*

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ POJMY A VZTAHY .....</b>	<b>11</b>
1.1 ZVUK, ŠÍŘENÍ ZVUKU, RYCHLOST ZVUKU.....	11
1.2 AKUSTICKÝ TLAK, HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU .....	11
1.3 INTENZITA ZVUKU, AKUSTICKÝ VÝKON .....	12
1.4 PROSTOROVÁ AKUSTIKA.....	12
1.4.1 Pohltivost, odrazivost.....	13
1.4.2 Doba dozvuku .....	13
1.4.3 Vlastní frekvence.....	16
1.4.4 Akustické obklady, rezonanční a difuzní prvky.....	17
<b>2 SOUČASNÝ STAV POSLECHOVÉHO PROSTORU .....</b>	<b>20</b>
2.1 POPIS .....	20
2.2 VÝPOČET DOBY DOZVUKU.....	22
2.3 VÝPOČET KRITICKÉHO KMITOČTU .....	22
<b>3 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ PROSTORU .....</b>	<b>23</b>
3.1 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU .....	23
3.2 MĚŘENÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ.....	27
<b>4 NÁVRH AKUSTICKÝCH ÚPRAV PROSTORU.....</b>	<b>30</b>
4.1 POTLAČENÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ.....	30
4.2 ÚPRAVA DIFUZITY ZVUKOVÉHO POLE.....	31
4.3 ÚPRAVA DOBY DOZVUKU .....	34
4.4 NÁVRH UMÍSTĚNÍ A PARAMETRŮ OZVUČOVACÍHO SYSTÉMU .....	34
4.5 NÁVRH UMÍSTĚNÍ AKUSTICKÝCH PRVKŮ .....	38
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>



## Úvod

Problematika prostorové akustiky si stále více upevňuje svoje místo nejen v oblasti hudby, ale také architektury, stavebnictví a dalších odvětvích lidské činnosti. Jejím úkolem je vytvořit prostředí s vhodnými akustickými parametry a dosáhnout tak tzv. „akustické pohody“.

Zvuk, který vnímáme, má významný vliv na náš nervový systém. Je prokázáno, že lidé pracující v akusticky příjemném prostředí, mají vyšší produktivitu práce. Stejně tak je vyzkoušeno, že v akusticky vhodně upravených učebnách udrží studenti déle pozornost a dosahují lepších výsledků. Je tedy vhodné zabývat se prostorovou akustikou nejen v prostorech přímo určených pro hudbu, jakými jsou například různé koncertní sály, kinosály apod., ale i ve výrobních halách, nádražích, letištních halách, přednáškových sálech, posluchárnách atd. Právě v těchto prostorech většinou usilujeme o snížení hluku a zvýšení srozumitelnosti.

V ideálním případě by měl být brán zřetel na akustické vlastnosti místností, již při samotném návrhu stavby. S tímto ohledem lze také významně snížit celkové finanční náklady na akustické úpravy. Právě kvůli finanční náročnosti bývá často akustická úprava zatracována označována za nepotřebnou. Existují přitom mnohá řešení, která významně zlepší akustické parametry místností a nejsou nijak finančně náročná.

Je také třeba uvést, že prostorová akustika není jen záležitostí projektantů a inženýrů, ale také designérů. Právě oni mají za úkol vsadit navrhované úpravy citlivě do uvažovaného prostoru tak, aby byl zachován dobrý estetický dojem. Kromě toho je nutné splnit také požadovaná protipožární kritéria a mnohdy i patřičnou mechanickou odolnost. Vhodný materiál by měl být vybrán také s ohledem na případnou údržbu a čištění, jenž se odvíjí např. od prašnosti prostředí, ve kterém se bude daný prvek nacházet.

## Seznam symbolů

$c_0$	rychlost zvuku ve vzduchu v [s]
$v$	teplota prostředí [°C]
$L_P$	hladina akustického tlaku [dB]
$P$	akustický tlak [Pa]
$P_{ref}$	referenční akustický tlak [Pa]
$W$	akustický výkon [W]
$I$	intenzita zvuku, akustická intenzita [ $W/m^2$ ]
$S_u$	uzavřená plocha [ $m^2$ ]
$W_{pohl}$	akustická energie pohlcená v ploše [J]
$W_{dop}$	akustická energie dopadající na plochu [J]
$W_{odr}$	akustická energie odražená od plochy [J]
$\alpha$	činitel zvukové pohltivosti [-]
$\beta$	činitel zvukové odrazivosti [-]
$T_S$	doba dozvuku podle Sabina [s]
$T_E$	doba dozvuku podle Eyringa [s]
$T_M$	doba dozvuku podle Millingtona [s]
$V$	objem místnosti [ $m^3$ ]
$S$	plocha stěn místnosti [ $m^2$ ]
$f_N$	vlastní frekvence [Hz]
$n_x, n_y, n_z$	celá čísla a jejich kombinace: 1, 2, 3, ... [-]
$l_x, l_y, l_z$	rozměry místnosti [m]
$f_K$	kritický kmitočet [Hz]
$T_R$	průměrná doba dozvuku místnosti [s]

# 1 Základní akustické pojmy a vztahy

## 1.1 Zvuk, šíření zvuku, rychlost zvuku

Zvuk chápeme jako mechanické kmitání částic. Částice kmitají okolo své rovnovážné polohy ve směru šíření zvuku od zdroje. Zvuk se může šířit v prostředí pevném, plynném i kapalném. Ve vakuu se zvuk nešíří. Slyšitelný rozsah frekvencí zvuku je udáván od 20 Hz do 20 kHz. Tyto hodnoty se však mohou u každého člověka lišit, jsou ovlivněny stářím, únavou, intenzitou zvuku atd.

Zvukové vlny se šíří od zdroje všemi směry. Rychlost šíření zvuku se mění s prostředím, ve kterém se zvuk šíří. Nejčastěji uvažovaným prostředím je vzduch. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je přibližně 340 m/s, přesně lze určit podle vztahu (1).

$$c_0 = 331,8 + 0,602 \cdot v \quad [\text{m/s}; \text{°C}] \quad (1)$$

kde:  $c_0$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s]  
 $v$  teplota okolí [°C]

Kromě rychlosti zvuku používáme také veličinu „akustická rychlost“, která odpovídá rychlosti kmitání částic. Její velikost je určena vlastnostmi prostředí a je konstantní.

## 1.2 Akustický tlak, hladina akustického tlaku

Akustický tlak  $p$  je skalární veličina popisující změny hustoty prostředí. Nejnižší akustický tlak, který je schopné lidské ucho vnímat, se nazývá práh slyšení. (podle normy  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa při frekvenci 1 kHz) Práh bolesti se pak nazývá úroveň akustického tlaku, kterou ještě lidský sluch vydrží. (přibližně  $10^2$  Pa).

Aby bylo počítání s akustickým tlakem jednodušší, používá se tzv. hladinové vyjádření s logaritmickou stupnicí. Prahu slyšitelnosti odpovídá hladina 0 dB a prahu bolesti přibližně 130 dB. Dvojnásobný nárůst akustického tlaku pak na logaritmické stupnici odpovídá nárůstu hladiny akustického tlaku o 3 dB. Hladinu akustického tlaku lze spočítat podle vztahu (2).

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P}{P_{ref}} \quad [\text{dB}; \text{Pa}; \text{Pa}] \quad (2)$$

kde:  $L_p$  je hladina akustického tlaku [dB]  
 $P$  akustický tlak, který převádíme [Pa]  
 $P_{ref}$  referenční akustický tlak (zpravidla práh slyšení  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa) [Pa]

### 1.3 Intenzita zvuku, akustický výkon

Dalšími jednotkami je intenzita zvuku a akustický výkon. Intenzita zvuku je definována jako zvuková energie prošlá za 1 s jednotkovou plochou kolmou na směr šíření zvuku. Akustický výkon je důležitou jednotkou při hodnocení zdroje zvuku. Je definován jako intenzita zvuku, která projde uzavřenou plochou, v níž je umístěn zdroj zvuku.

$$W = \iint_S \vec{I} \cdot d\vec{S}_u \quad [\text{W}] \quad (3)$$

kde:  $W$  je akustický výkon [W]  
 $I$  intenzita zvuku [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
 $S_u$  uzavřená plocha [ $\text{m}^2$ ]

### 1.4 Prostorová akustika

Prostorová akustika je speciální odvětví akustiky, které se zabývá šířením zvuku v uzavřených prostorech. Snahou je dosáhnout v uvažovaném prostředí tzv. „akustické pohody“. Tento termín popisuje stav, při kterém je doba dozvuku, hlukové pozadí a srozumitelnost řeči optimálně vyvážena a vyhovuje fyziologickým potřebám člověka. Akustické vlastnosti uzavřeného prostoru lze ovlivnit tvarem a rozměry prostoru, použitými materiály a předměty umístěnými uvnitř.

### 1.4.1 Pohltivost, odrazivost

Při dopadu zvukové vlny na překážku nastává několik situací. Část zvukové energie projde skrz překážku, část se odrazí zpět do prostoru a část je pohlcena překážkou a přemění se na teplo. Při všech těchto dějích platí zákon zachování energie. V určitém případě může také nastat ohyb neboli difrakce, podobně jako je tomu u světla. Právě pohltivost a odrazivost je z hlediska prostorové akustiky důležitým parametrem každého materiálu. Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  vyjadřuje poměr pohlcené energie a dopadající energie.

$$\alpha = \frac{W_{pohl}}{W_{dop}} = 1 - \frac{W_{odr}}{W_{dop}} \quad [-; J; J] \quad (4)$$

kde  $\alpha$  je činitel zvukové pohltivosti [-]  
 $W_{pohl}$  akustická energie pohlcená v ploše [J]  
 $W_{dop}$  akustická energie dopadající na plochu [J]  
 $W_{odr}$  akustická energie odražená od plochy [J]

Při  $\alpha = 0$  by se všechna dopadající energie odrazila, naopak při  $\alpha = 1$  by se všechna dopadající energie přeměnila na teplo. Tyto krajní případy nemohou ve skutečnosti nastat a reálné materiály se jim pouze přibližují. Činitel akustické pohltivosti se měří v dozvukové komoře nebo pomocí interferometru.

V některé literatuře (např. [1]) se můžeme setkat také s termínem činitel akustické odrazivosti  $\beta$ . Platí pak vztah (5).

$$\alpha = 1 - |\beta|^2 \quad [-; -] \quad (5)$$

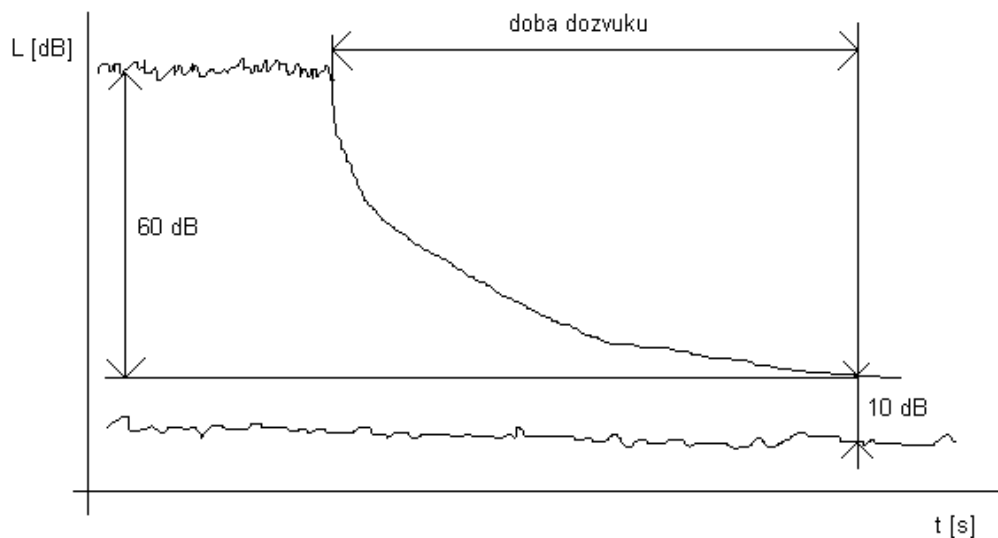
kde  $\alpha$  je činitel zvukové pohltivosti [-]  
 $\beta$  činitel zvukové odrazivosti [-]

### 1.4.2 Doba dozvuku

Jedním z důležitých akustických parametrů každého uzavřeného prostoru je doba dozvuku. Dozvuk je zvuk, který se šíří prostorem po vypnutí zdroje zvuku. Doba dozvuku je

pak definována jako čas, za který klesne hustota energie nebo hladina ustálené hodnoty akustické energie po vypnutí zdroje o 60 dB, tj.  $10^{-6}$  původní hodnoty. Dobu dozvuku můžeme změřit nebo spočítat.

Při měření se doba dozvuku určuje z hladiny, která je o 10 dB vyšší, než je hlukové pozadí měřeného prostoru. Pokud není možné splnit podmínku, aby hladina zvuku před vypnutím zdroje měla požadovaný odstup 60 dB, můžeme měřit při odstupě 30 dB a dobu dozvuku pak počítat jako dvojnásobek naměřených hodnot.



**Obr. 1** Doba dozvuku

Pro mluvené slovo se doporučuje doba dozvuku 0,2 až 0,5 sekundy, zatímco pro hudbu až 0,8 sekundy. Cílem akustických úprav je, aby byla doba dozvuku přibližně stejná na všech frekvencích. [2]

Při výpočtu doby dozvuku máme k dispozici několik odvozených vztahů, jejichž užití se liší podle typu prostoru.

#### Doba dozvuku podle Sabina:

$$T_s = 0,164 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad [\text{s}; \text{m}^3; \text{m}^2] \quad (5)$$

kde pro plochy o různých hodnotách činitele zvukové pohltivosti platí:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad [-] \quad (6)$$

$T_S$	je doba dozvuku [s]
$V$	objem místnosti [ $m^3$ ]
$\alpha$	činitel celkové pohltivosti místnosti [-]
$S$	plocha stěn místnosti [ $m^2$ ]

Tento vztah se používá hlavně pro prostory s malým činitelem zvukové pohltivosti, tj. spíše pro méně tlumené prostory.

#### Doba dozvuku podle Eyringa:

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \cdot \ln(1-\alpha)} \quad [s; m^3; m^2] \quad (7)$$

kde pro plochy o různých hodnotách činitele zvukové pohltivosti platí:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad [-]$$

$T_E$	je doba dozvuku [s]
$V$	objem místnosti [ $m^3$ ]
$\alpha$	činitel celkové pohltivosti místnosti [-]
$S$	plocha stěn místnosti [ $m^2$ ]

Tento vztah lépe vyhovuje i pro prostory více tlumené.

#### Doba dozvuku podle Millingtona:

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1-\alpha_i)} \quad [s; m^3; m^2] \quad (8)$$

kde	$T_M$	je doba dozvuku [s]
	$V$	objem místnosti [ $m^3$ ]
	$\alpha_i$	činitel pohltivosti jednotlivých povrchů [-]
	$S_i$	plocha jednotlivých povrchů [ $m^2$ ]

### 1.4.3 Vlastní frekvence

Vlastní kmity významně ovlivňují každý uzavřený prostor. Jedná se o stojaté vlnění, které vznikne, pokud je vlnová délka shodná s rozměrem místnosti. Tím vzniknou v prostoru místa s velmi malou intenzitou zvuku (uzly) a místa s velmi velkou intenzitou (kmitny). Tím je tedy v určitých místech zesilována frekvence o stejné vlnové délce jako délka místnosti, dochází k rezonanci. Tento jev se nazývá vlastní frekvence místnosti. Zároveň je zesilován i dvojnásobek, trojnásobek a další násobky této frekvence, avšak ne v takové míře. Pro každý rozměr místnosti můžeme najít vlastní frekvence. Nejhorším případem je pak místnost tvaru krychle nebo kvádrů, který má jednu stranu rovnou násobku druhé. [6]

Pro dobrý přenos zvuku a poslech by bylo ideální, aby nejnižší vlastní frekvence ležela hluboko pod uvažovaným frekvenčním pásmem. To je však splnitelné až u místností větších než 200 m<sup>3</sup>. Určením vhodných rozměrů pro pravoúhlou místnost se zabývá literatura o prostorové akustice. (např. [1], [2])

V minulosti se objevovaly názory, že vlastní kmity lze omezit vhodným tvarem místnosti. Experimentovalo se s různými tvary, avšak praxe ukázala, že počet vlastních kmitů závisí pouze na objemu místnosti. Změnou tvaru místnosti dojde pouze k posunu ve spektru a zkomplikuje se výpočet.

Vztah pro výpočet vlastní frekvence:

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad [\text{Hz}; \text{m/s}; -, \text{m}] \quad (9)$$

kde	$f_N$	je vlastní frekvence [Hz]
	$c_0$	rychlost zvuku ve vzduchu [m/s]
	$n_x, n_y, n_z$	celá čísla a jejich kombinace: 1, 2, 3, ... [-]
	$l_x, l_y, l_z$	rozměry místnosti [m]

Podle hodnoty čísel  $n_x, n_y, n_z$  dělíme vlastní frekvence do tří skupin:

- kmity osové – vzniknou, jsou-li dvě čísla z  $n_x, n_y$  nebo  $n_z$  rovna nule. Tyto vlny se pak šíří rovnoběžně s jednou z os místnosti a odrážejí se pouze od protilehlých stěn.
- kmity tangenciální – vzniknou, je-li jedno z čísel  $n_x, n_y$  nebo  $n_z$  rovno nule. Tato vlna se odráží od čtyř stěn v místnosti



- c) kmity kosé – vzniknou, jestliže se žádné z čísel  $n_x$ ,  $n_y$  nebo  $n_z$  nerovná nule. Vlna se odráží od všech stěn. [1]

Protože v oblasti nízkých frekvencí je spektrum vlastních kmitů poměrně nevyrovnané, je třeba najít frekvenci, od které je již spektrum vlastních kmitů vyrovnané. Tuto frekvenci nazýváme kritický kmitočet a obvykle se pohybuje od 120 do 300 Hz.

$$f_K = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T_R}{V}} \quad [\text{Hz}; \text{s}; \text{m}^3] \quad (10)$$

kde  $f_K$  je kritický kmitočet [Hz]  
 $T_R$  průměrná doba dozvuku místnosti [s]  
 $V$  objem místnosti [ $\text{m}^3$ ]

#### 1.4.4 Akustické obklady, rezonanční a difuzní prvky

Pro vytvoření vhodných akustických podmínek v uzavřeném prostoru je nutné dosáhnout optimální doby dozvuku, omezit nežádoucí vlastní frekvence a vytvořit dostatečně difuzní pole. K tomuto účelu slouží akustické obklady pro pohlcování zvuku, rezonanční prvky a difuzory. Při pohlcování energie dochází k nevratné přeměně zvukové energie na energii jinou, obvykle tepelnou vznikající třením. Dále pak přeměny energie vznikají poklesem akustického tlaku a pružnou deformací těles.

##### Akustické obklady

Akustické obklady jsou obkladové materiály sloužící k pohlcení zvuku a přeměně na teplo. Jsou to nejčastěji používané materiály v prostorové akustice. Jedná se o porézní materiály, které mají ve svém objemu malé dutinky vyplněné vzduchem. Objem dutinek k celkovému objemu materiálu může být 80 až 99 %. [1] Tyto materiály však nelze zaměňovat s materiály sloužící ke zvukové izolaci, neboť mají velmi často nízký stupeň vzduchové neprůzvučnosti.

V současné době existuje mnoho výrobců akustických obkladů. U každého výrobku by měl výrobce uvést pro jaké frekvence je určen.



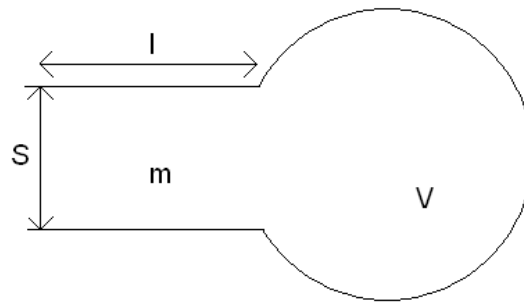
**Obr. 2** Akustický materiál od firmy SONING <zdroj: soning.cz>

### **Obklady založené na rezonančním principu**

Jedná se o obklady, které se chovají jako kmitající membrány nebo desky. Kmitající desky jsou obvykle připevněny přes poddajný materiál ke zdi, obvykle guma. Při dopadu zvukové vlny je deska uvedena do vynucených kmitů, zvuková energie se tedy přemění na mechanickou. Pro pohlcení zvuku je třeba rezonátor zatlumit tak, aby došlo k přeměně na teplo. Kmitající desky jsou účinné pro frekvence zhruba od 20 Hz do 150 Hz.

Kmitající membrány jsou tenké desky nebo fólie umístěné v určité vzdálenosti od stěny. Prostor mezi membránou a stěnou je vyplněn porézním materiálem, který tlumí celou soustavu. Tyto systémy se používají pro útlum frekvencí od 100 Hz až do přibližně 300 Hz.

Speciálním případem rezonančního systému je Helmholtzův rezonátor. Jedná se o děrované nebo štěrbinové desky umístěné buď jednotlivě, nebo sdruženě. Výhodou je velký frekvenční rozsah, přibližně od 50 Hz do 3 kHz. Frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti rezonátoru závisí na vlastnostech tlumícího materiálu a ukotvení systému. Umístění tlumícího materiálu ovlivňuje také šířku pásma. Jako Helmholtzův rezonátor se chová například i dvoukřídlá skříňka se štěrbinou uprostřed. Princip pohlcování zvuku spočívá v přeměně akustické energie na teplo vlivem vícenásobných odrazů uvnitř dutiny rezonátoru. V dutině je vzduch o určitém objemu  $V$ , v hrdle je sloupec vzduchu o hmotnosti  $m$ , který slouží jako píšť.



**Obr. 3** Schematické zobrazení Helmholtzova rezonátoru

Vztah pro výpočet rezonanční frekvence jednoduchého rezonátoru pak vypadá takto:

$$f_R = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \quad [\text{Hz}; \text{m/s}; \text{m}^2; \text{m}; \text{m}^3] \quad (11)$$

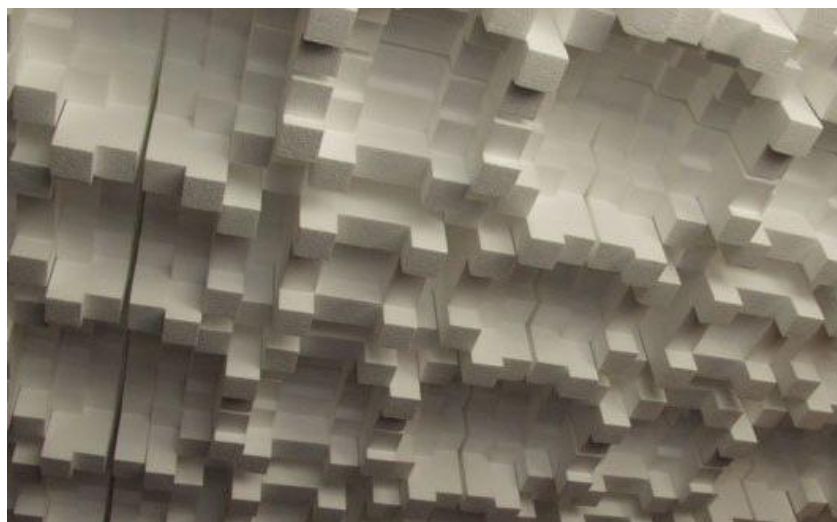
kde	$f_R$	je rezonanční frekvence [Hz]
	$c_0$	rychlost světla ve vzduchu [m/s]
	$S$	plocha otvoru [m <sup>2</sup> ]
	$l$	délka otvoru [m]
	$V$	objem dutiny [m <sup>3</sup> ]

V případě reálného rezonátoru je vztah pro výpočet rezonanční frekvence složitější. Je potřeba zohlednit vliv děrování.

## Difuzory

Difuzory jsou rozptylové prvky, které mají za úkol vytvořit difuzní pole, tj. pole náhodných odrazů. Zabraňují vzniku stojatého vlnění. Difuzory mohou být sestaveny z malých krychlí, kvádrů nebo jehlanů náhodně vhodně uspořádaných tak, aby povrch byl co nejvíce nerovný. K odrazu dochází, když je rozměr prvku větší nebo stejný než vlnová délka dopadající vlny. Příklad jednoduchého difuzoru je na obr. 4.

Dnes se velmi často používá tzv. RPG difuzor. (Reflection Phase Grating) Jedná se o difuzor, který je tvořen soustavou vhodně širokých a hlubokých otvorů. Dosahuje vynikající účinnosti.



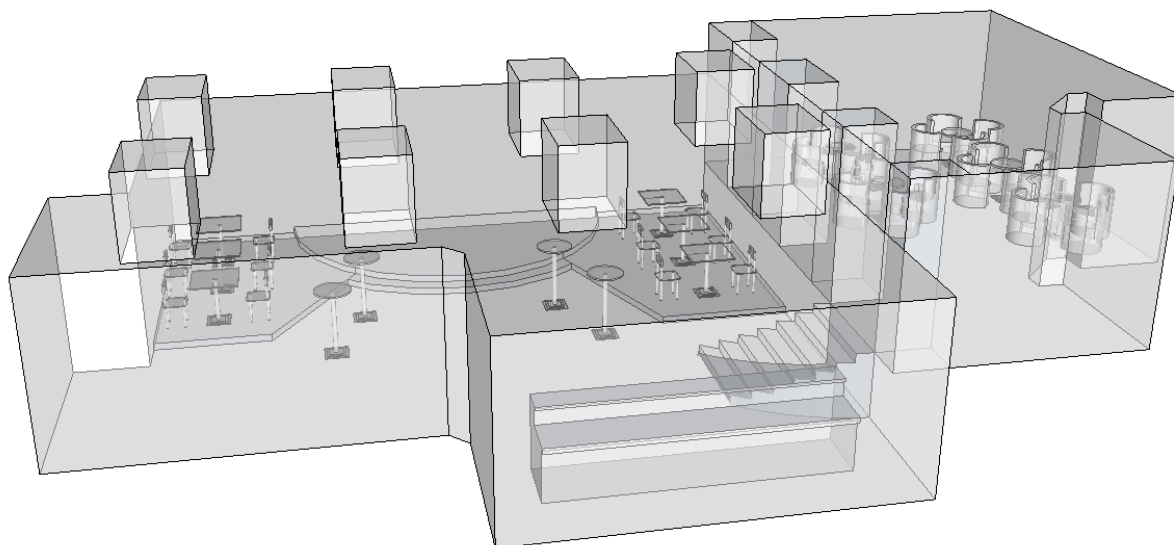
**Obr. 4** Řešení stropního difuzoru < zdroj adostudio.cz >

## 2 Současný stav poslechového prostoru

### 2.1 Popis

Upravovaný prostor se nachází v hudebním klubu House of blues v Plzni v Černické ulici. Cílem této diplomové práce je navrhnout zlepšení akustických parametrů místnosti a vytvořit tak příjemné poslechové podmínky pro diváky i účinkující. Místnost sloužící pro produkci živé hudby má objem 431,9 m<sup>3</sup>. Provedení prostoru je přibliženo modelem místnosti na obr. 5.

Podlaha je z větší části tvořena dlažbou, pódium je dřevěné. Strop je zhotoven ze sádkartonových podhledů a je v něm 8 vrchlíků, které slouží také pro přívod denního světla. Stěny jsou klasicky omítnuté. Polovinu stěny naproti podiu pokrývá zrcadlo. Ozvučovací systém je umístěn po stranách pódia přibližně 2 m od zadní stěny. Další částí objektu je přístavba, která se nachází nad schodištěm. Pro tento prostor není požadováno zvláštních akustických úprav. Bude sloužit spíše jako klidová zóna a nenachází se v něm ani ozvučovací soustava.



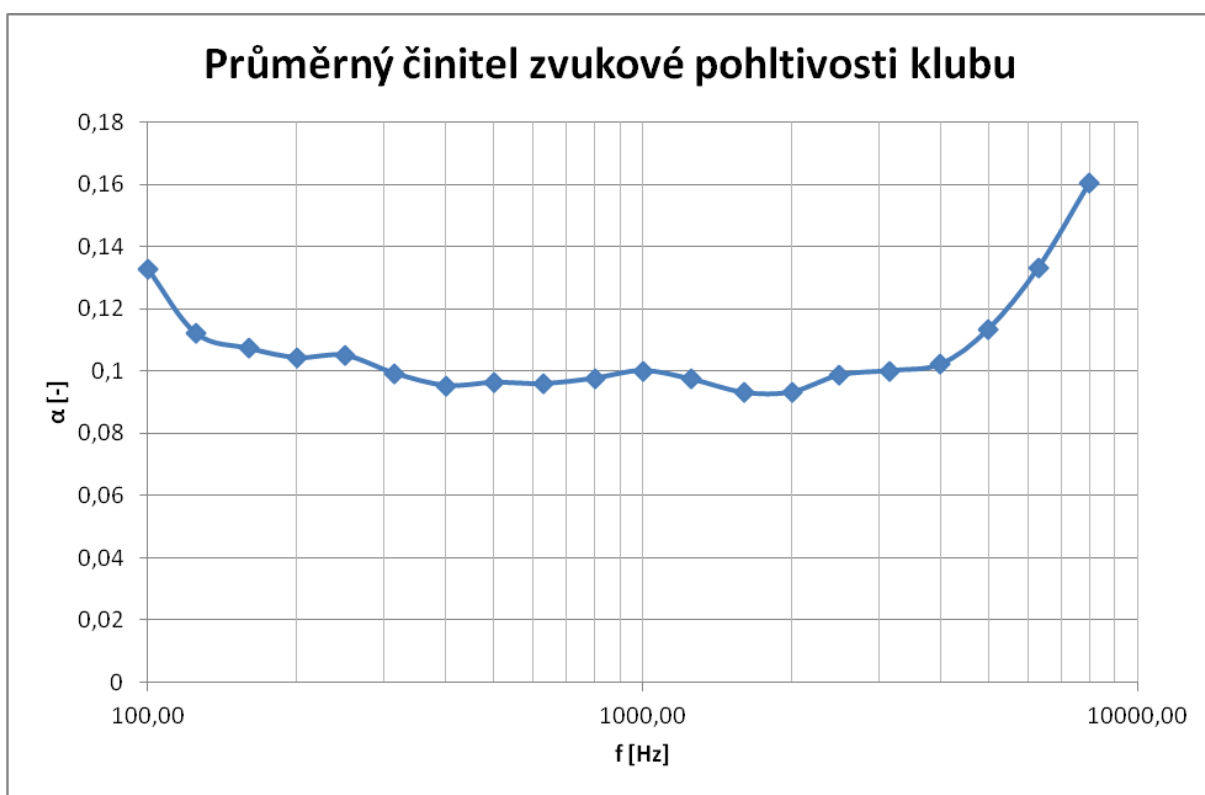
**Obr. 5** Model poslechového prostoru

Pro akustické úpravy lze využít stěnu za pódiem, boční stěny, strop a stropní vrchlíky. Zrcadlová stěna, bar a schodiště musí zůstat v původním stavu.

Podnětem pro zpracování této diplomové práce byla skutečnost, že majitel vyslovil ochotu zlepšit akustické vlastnosti klubu a zajistit tím hudebníkům i posluchačům kvalitnější poslechové podmínky. V současnosti si řada vystupujících umělců stěžuje na nedostatečné zatlumení prostoru, které je patrné zejména při malém počtu posluchačů. Od zrcadlové stěny vznikají nepříjemné odrazy, které jsou často doprovázeny zpětnou vazbou u mikrofonů. Velkým problémem jsou také vlastní frekvence místnosti, které způsobují, že hráči na basové kytary se na podiu neslyší, zatímco posluchači jsou vystaveni často nepříjemným zvukovým hladinám těchto nástrojů. Za zmínku také stojí ozvučovací systém, jehož kvalita již neodpovídá současným trendům. Zejména změřené frekvenční charakteristiky obou reprobeden (kap. 4.4 a přílohy) jsou velice nevyrovnané a nemůže být tak zajištěn kvalitní poslech.

## 2.2 Výpočet doby dozvuku

Pro výpočet doby dozvuku je použit Eyringův vztah. Tento vztah se používá pro prostory středně ztlumené. Jelikož se v uvedeném prostoru nachází velmi mnoho materiálů a povrchů, u kterých je prakticky nemožné zjistit hodnotu činitele pohltivosti, byl výpočet proveden opačným způsobem. Z naměřené doby dozvuku byl stanoven průměrný činitel pohltivosti. Výpočet je proveden v příloženém souboru MS Excel. Vypočtené hodnoty v grafu (obr. 6) odpovídají průměrnému činiteli pohltivosti vylidněného klubu.



Obr. 6 Vypočítaný činitel pohltivosti daného prostoru

## 2.3 Výpočet kritického kmitočtu

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.4.3 o vlastních frekvencích, je vhodné vypočítat pro každou upravovanou místnost hodnotu tzv. kritického kmitočtu. Výpočet je proveden podle vztahu (10). Za průměrnou dobu dozvuku byla dosazena průměrná doba z obou měření pro

každé frekvenční pásmo a z toho průměrná hodnota doby dozvuku pro celé uvažované spektrum (tj. 125 Hz – 8kHz). Hodnoty jsou uvedeny v příloženém souboru MS Excel.

$$f_K = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T_R}{V}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{1,12}{431,9}} = 101,85 \text{ Hz} \quad (12)$$

kde  $T_R$  je průměrná doba dozvuku [s]  
 $V$  objem místnosti [ $\text{m}^3$ ]

### 3 Měření akustických parametrů prostoru

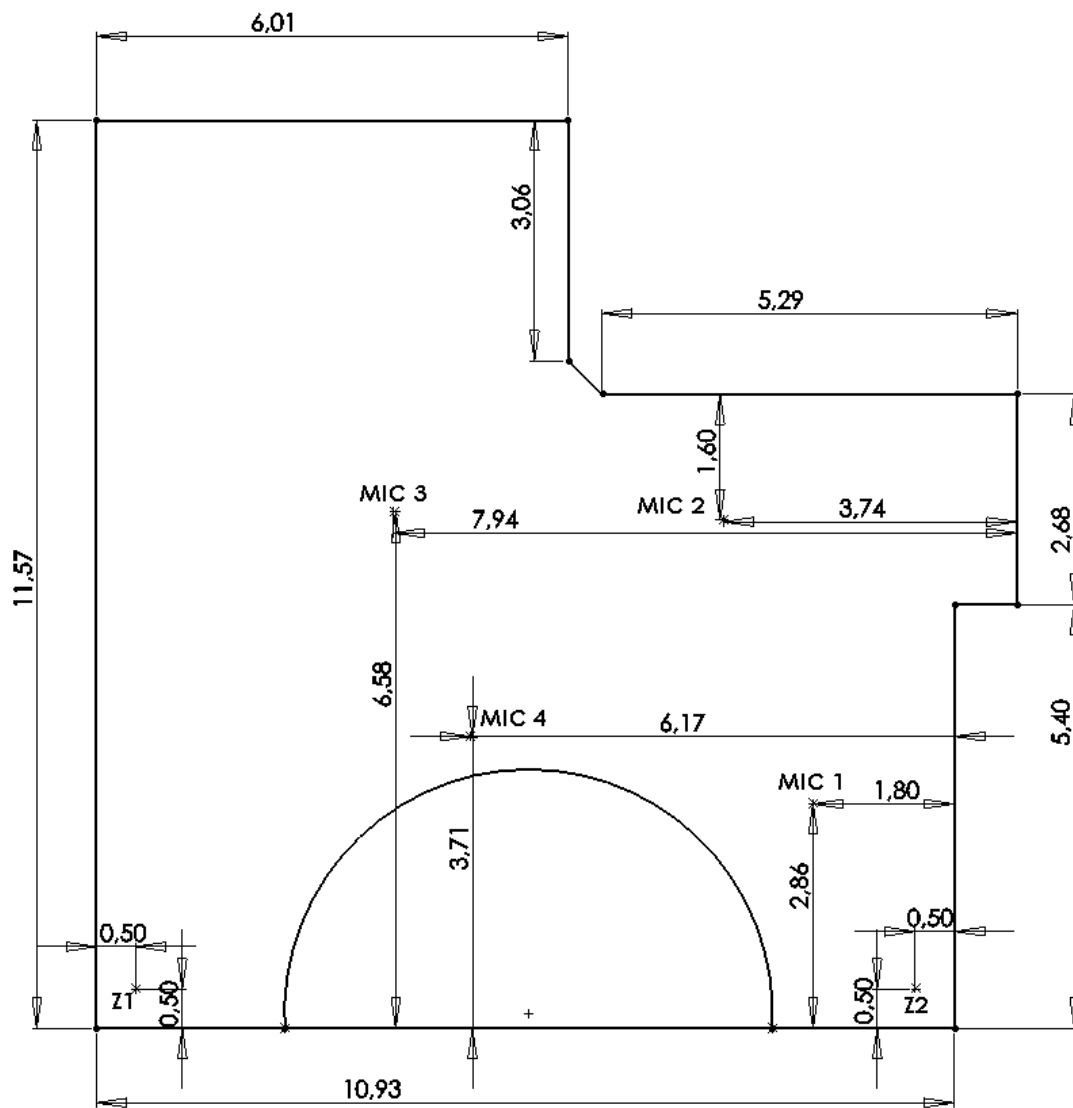
#### 3.1 Měření doby dozvuku

Měření doby dozvuku proběhlo v souladu s normou ČSN EN ISO 3382-1 zabývající se měřením parametrů prostorové akustiky metodou a normou ČSN EN ISO 3382-2. Měření bylo provedeno metodou přerušovaného šumu. Umístění reprobeden a mikrofonů je znázorněno na obrázcích 7 a 8. Pro každou kombinaci pozice mikrofonů a reproduktoru byly provedeny dvě měření. K měření byly použity 4 měřicí mikrofony umístěné ve výšce 1,5 m (přibližná výška ucha stojícího člověka) a připojené k analyzátoru (Brüel & Kjaer), reproduktor byl buzen růžovým šumem o hlasitosti 111 dB. Tím byl zajištěn dostatečný odstup od hladiny hlukového pozadí, která byla 48 dB. Doba trvání šumu byla 10 sekund, což je doba dostatečně dlouhá pro nabuzení místnosti. Po vypnutí generátoru šumu byl měřen pokles zvukové energie v místnosti. Naměřená data byla zpracována pomocí softwaru PULSE (od firmy Brüel & Kjaer). Vstupní signály byly převedeny CPB analýzou na spektrum ve frekvenčním pásmu 20 Hz až 8 kHz. Zjištěná teplota během měření byla 21,8 °C, relativní vlhkost vzduchu 35 %. Naměřené hodnoty jsou uvedeny na obr. 9.

Pro porovnání naměřených hodnot bylo měření doby dozvuku provedeno také ručním zvukoměrem BK 2260. Tím je zajištěna větší vypovídající hodnota výsledků. Toto měření proběhlo ve čtyřech opakováních, při různých pozicích zvukoměru a startovní pistole, která představovala zdroj zvuku. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny na obrázku 10. Jedná se o průměrné hodnoty spočtené ze všech čtyř měření.

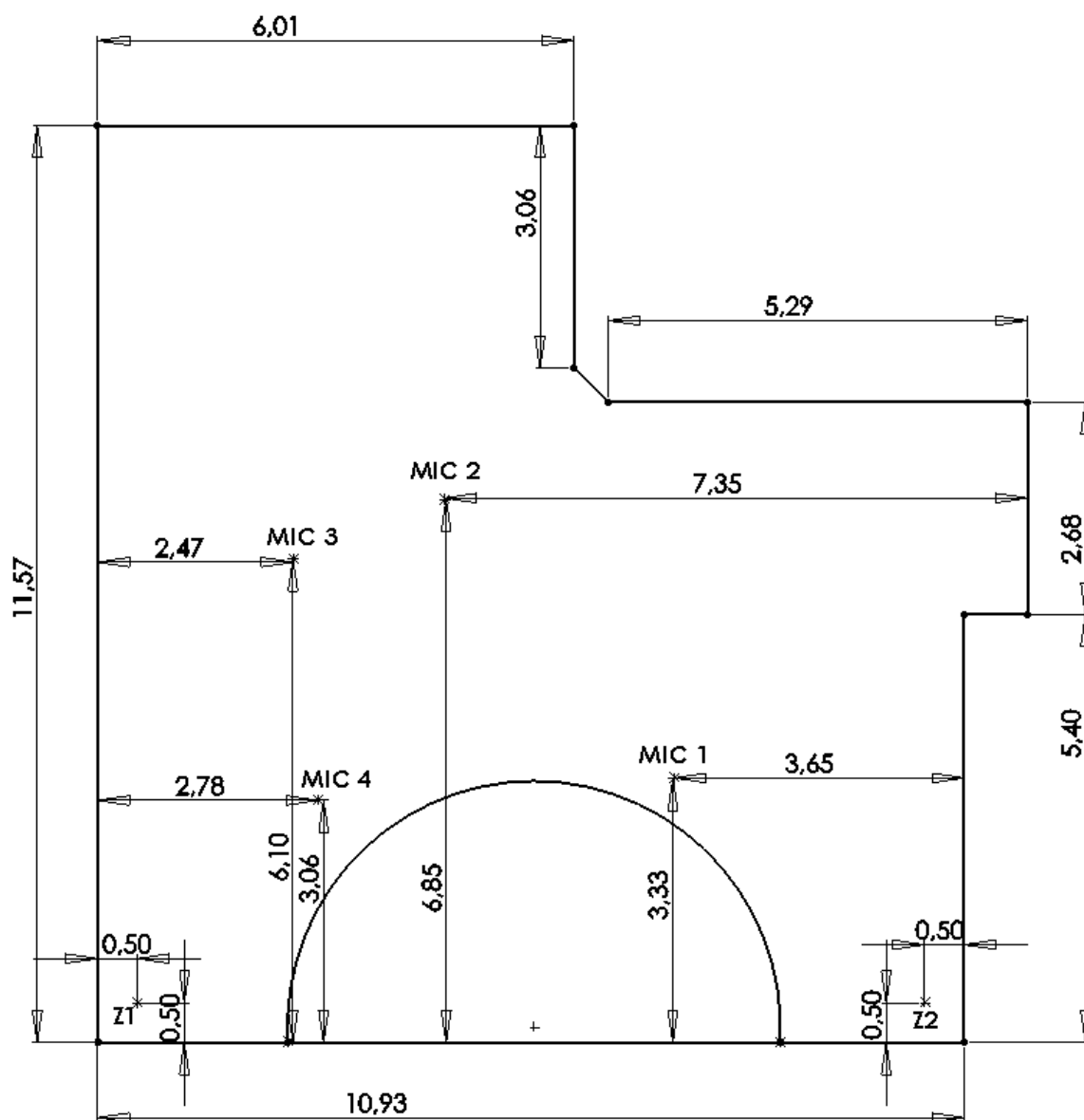
Oba zobrazené grafy se velmi shodují. Pouze na nižších frekvencích je nepatrný rozdíl

způsobený tím, že startovací pistole není v tomto pásmu schopna vybudit dostatečně silný zvukový impulz.



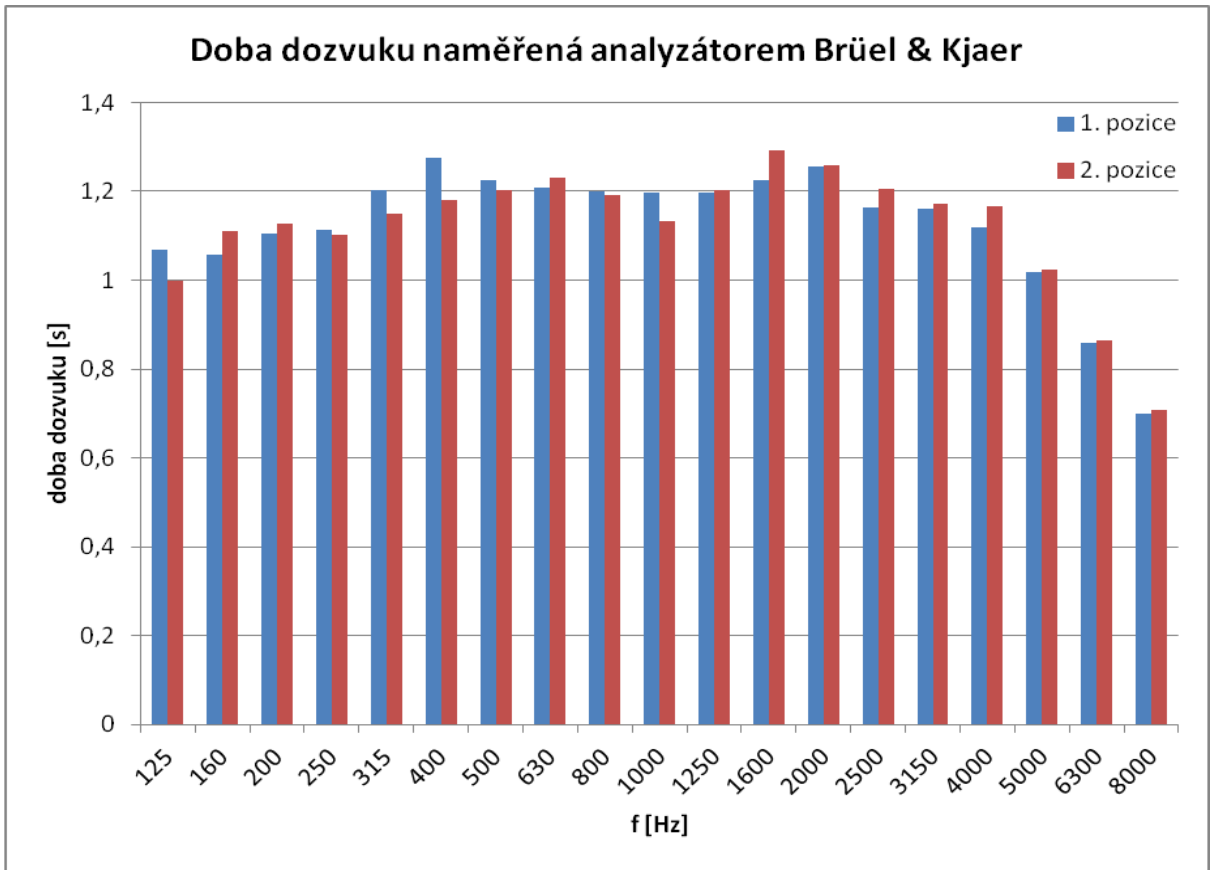
**Obr. 7** Rozmístění mikrofonů (MIC 1 – MIC 4) a zdroje zvuku (Z) – 1. pozice



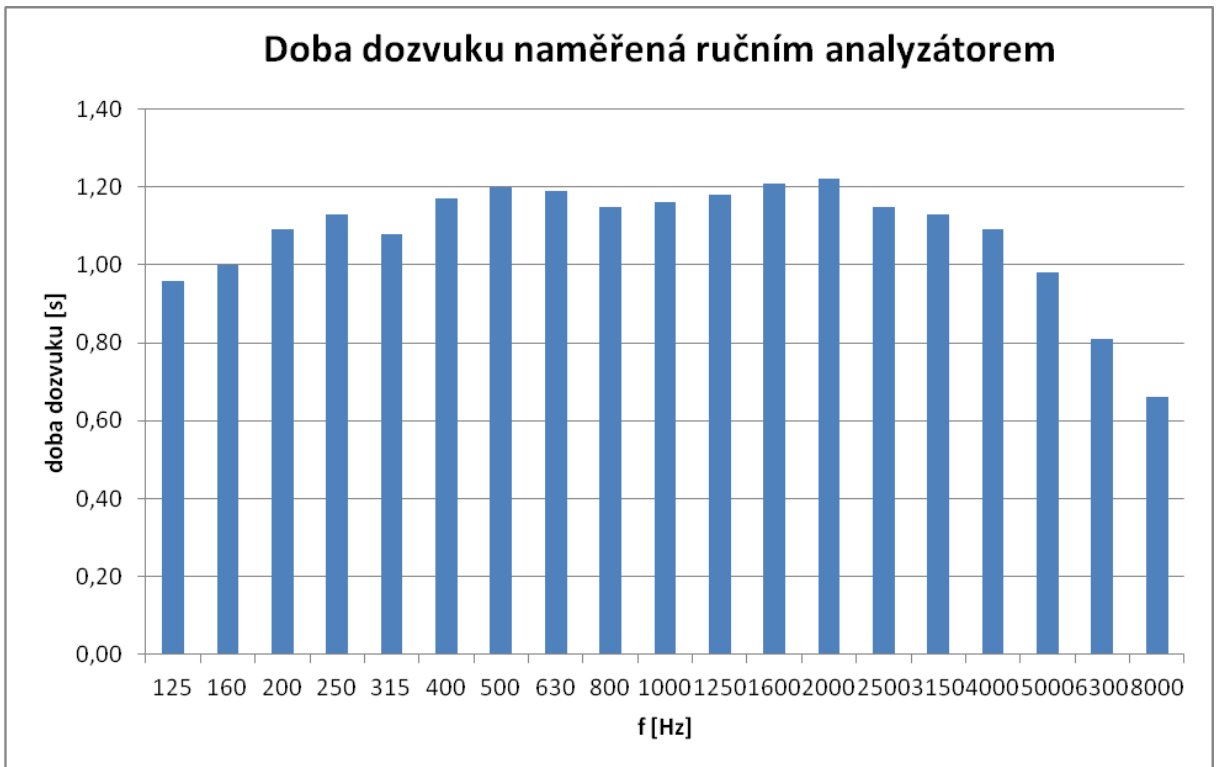


**Obr. 8** Rozmístění mikrofonů (MIC 1 – MIC 4) a zdroje zvuku (Z) – 2. pozice

Výsledky měření jsou uvedeny v příloženém souboru MS Excel.



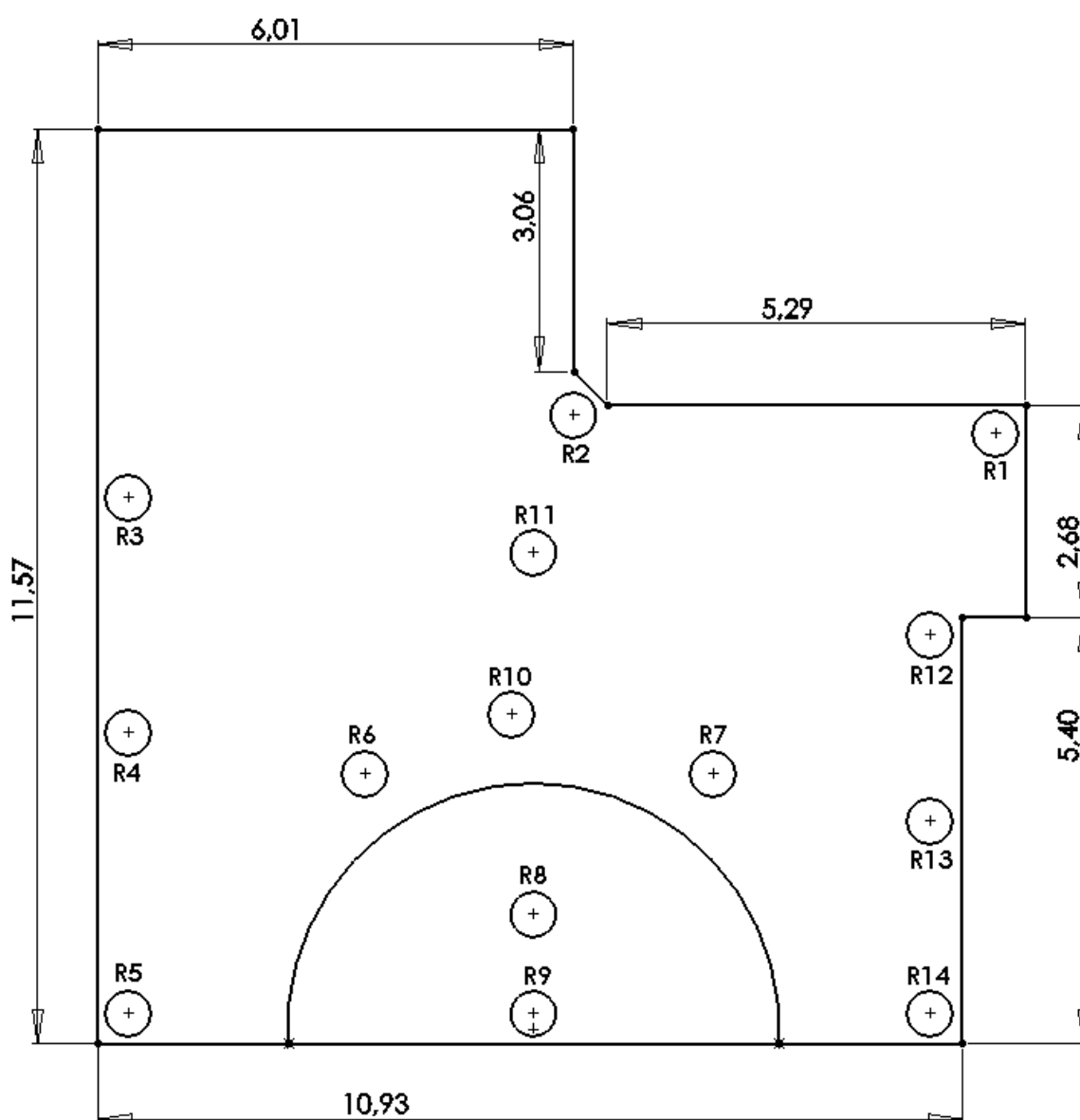
**Obr. 9** Graf naměřených dob dozvuku pro obě varianty – měření pomocí analyzátoru Brüel & Kjaer



**Obr. 10** Graf naměřených dob dozvuku – měření pomocí ručního analyzátoru

### 3.2 Měření vlastních frekvencí

Měření vlastních frekvencí místnosti bylo provedeno pomocí analyzátoru Brüel & Kjaer a jednoho měřicího mikrofону. Vlastní kmitočty místnosti jsou buzeny širokospektrálním signálem, tzv. bílým šumem. Vyhodnocení bylo zajištěno FFT analýzou, která vychází ze superpozice spektra hladin akustického tlaku budicího signálu a vlastních frekvencí místnosti.



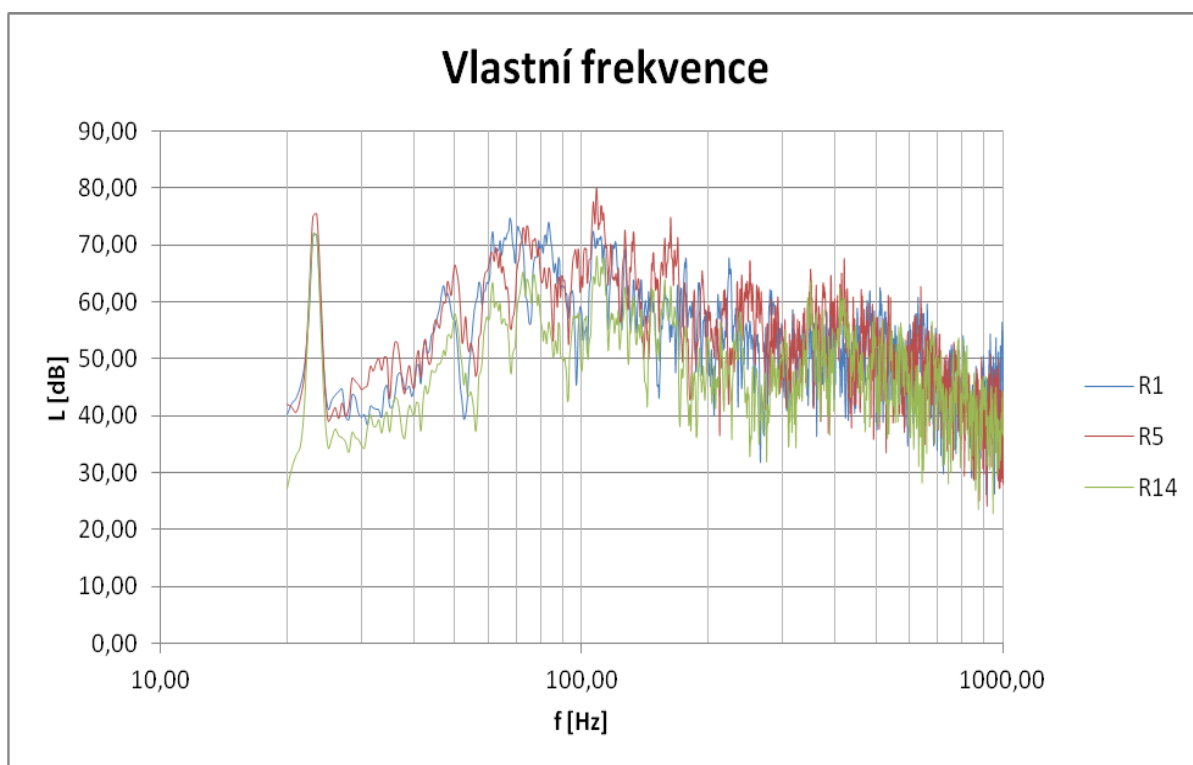
Obr. 11 Umístění mikrofónu při měření vlastní frekvencí

Pro zjištění přibližného rozložení vlastních frekvencí v prostoru bylo měřeno ve 14-ti místech (R1 – R14). Umístění reproduktoru zůstalo stejné jako při měření doby dozvuku, tzn. v rohu místnosti, 50 cm od stěn. Teplota a relativní vlhkost vzduchu byla také stejná, tj. 21,8 °C a 35 %. Rozložení míst měření je zobrazeno na obr. 11, přičemž bod R10 byl měřen ve světlíku.

Výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 12. Pro snazší orientaci jsou uvedeny pouze hodnoty z bodů R1, R5 a R14. Tyto body byly změřeny v rozích místnosti, kde je výrazný nárůst úrovně vlastních frekvencí. Kvůli výrazné nerovnoměrnosti místnosti nejsou hodnoty vlastních kmitů v každém rohu stejné. Přibližně od frekvence 120 Hz se již chová místnost poměrně difúzně. Pouze v bodě R5 je při frekvenci 162,5 Hz výrazný nárůst. Vrchol změřený na frekvenci 23 Hz je ruch vstupující zvenčí, nebude proto uvažován.

Naměřené hodnoty se shodují s teoretickým výpočtem kritického kmitočtu (v kapitole 2.3 Výpočet kritického kmitočtu). Odchylna mezi spočítanou a naměřenou hodnotou je ovlivněna dvěma faktory. Měřená místnost má velmi různorodé uspořádání, navíc vliv přístavby nelze zohlednit ve výpočtu. Vztah je definován pouze pro pravoúhlou místnost se čtvercovým nebo obdélníkovým půdorysem a konstantní výškou. Není také možné zjistit naprosto přesně skutečný objem místnosti. Nelze zcela započítat vliv nábytku, vybavení baru a dalších prvků. Objem použitý při výpočtu odpovídá prázdné místnosti.

Podrobné výsledky a grafy pro všechny měření body jsou uvedené v příloženém souboru MS Excel.



**Obr. 12** Naměřené vlastní frekvence

Z naměřených hodnot byly vybrány frekvence, které převyšují ostatní. Tyto frekvence bude nutné ztlumit, aby došlo k vyrovnání rozložení zvukového pole. Pro větší přehlednost jsou výsledky uvedeny v tabulce 1.

frekvence [Hz]	výskyt
61	R1, R6-R9, R14
67,5	R1, R2, R4, R7, R9, R11
74	R1, R5, R12, R14
83	R1, R6,
108	R1, R3, R5, R6, R8, R9, R11-R14
162	R3, R5, R6, R10

**Tab. 1** Frekvence určené k potlačení

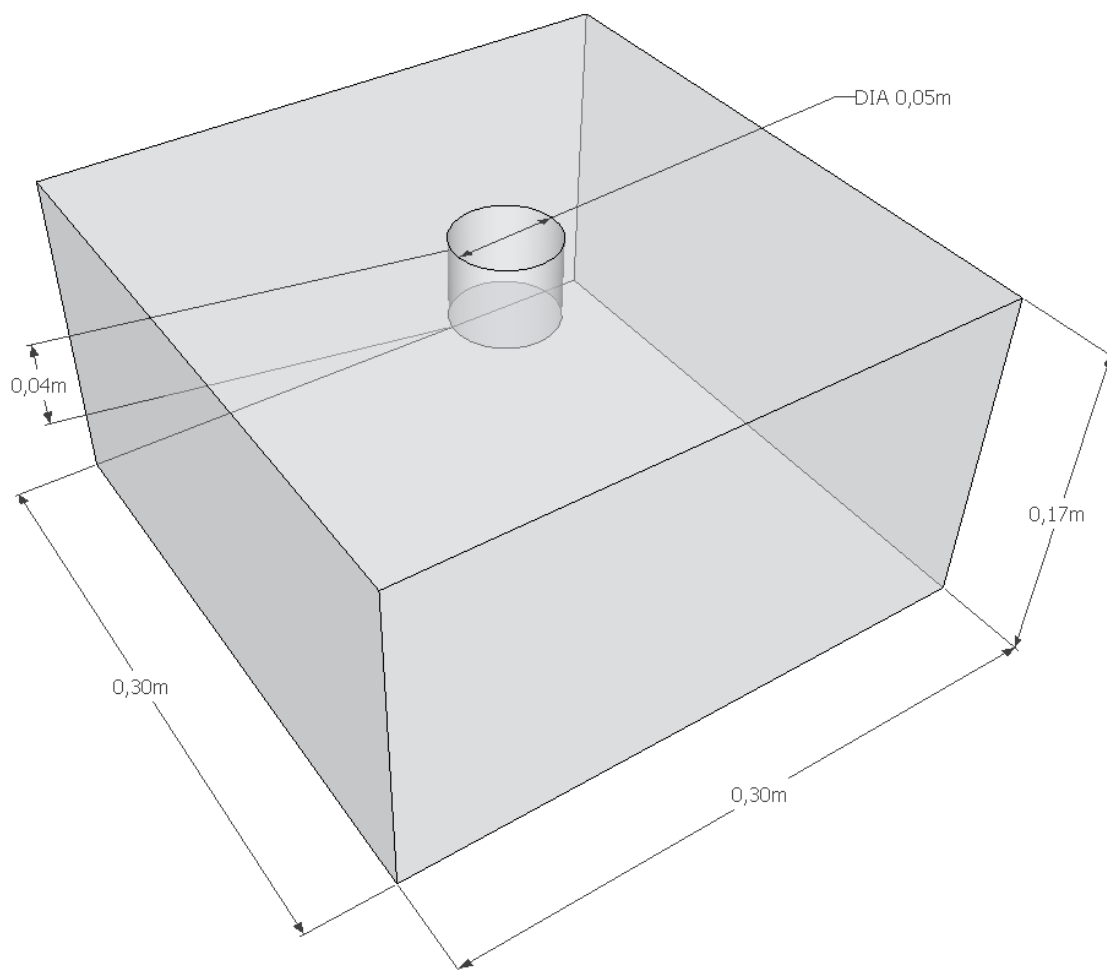
## 4 Návrh akustických úprav prostoru

### 4.1 Potlačení vlastních frekvencí

Pro srovnání poslechových podmínek je důležité provést potlačení vlastních frekvencí místnosti. Tyto frekvence obvykle potlačujeme instalací vhodně zvolených rezonátorů. V uvažované místnosti je vhodné použít Helmholtzův rezonátor. Tyto rezonátory mohou být buď šterbinové, nebo děrované, vzduchový polštář je obvykle zatlučen porézním materiálem. Tím je zajištěna požadovaná šířka pásma působení. Rezonátory se umísťují do rohů místnosti, kde je nejvyšší nárůst akustického tlaku, a dosahují tak nejvyšší účinnosti.

Z výsledků měření vlastních frekvencí (kap. 3.2) bylo rozhodnuto potlačit frekvence v pásmu 60 – 85 Hz. Rezonanční kmitočet rezonátoru byl určen na 74 Hz a pro tuto hodnotu byl navržen trubkový model rezonátoru. Výpočet je proveden v příloženém souboru MS Excel. Model rezonátoru je na obr. 13. Rezonátor by měl být vyplněn minerální vatou nebo jiným pohltivým materiálem. Rozsah rezonátoru lze spočítat. Výpočet rozsahu rezonátoru je však poměrně komplikovaný a proto se v praxi určuje měřením v dozvukové komoře. Účinnost jeho působení pak lze na základě předchozího měření částečně upravit na požadovanou úroveň. Rezonátor může být seskládán z těchto bloků (obr. 13) nebo může být vyroben jako souvislá deska. V tomto případě je nutné zachovat poměr děrování včetně vypočítaných rozměrů děr.

Po instalaci těchto rezonátorů by mělo být provedeno další měření vlastních frekvencí místnosti a z něj posléze vyhodnotit, zda je potřeba umístit ještě další rezonátory naladěné na jiné frekvence. Z naměřených hodnot (kap. 3.2) je pravděpodobné, že bude nutné zatlučit také vlastní kmity v oblasti 106 Hz. Tato frekvence bude pravděpodobně již mimo působení navrženého rezonátoru a bude třeba ji utlumit jiným rezonátorem. Postup při návrhu tohoto rezonátoru je totožný s předchozím. Lišit se bude pouze v rozměrech a případném tlumícím materiálu.

**Obr. 113** Model rezonátoru

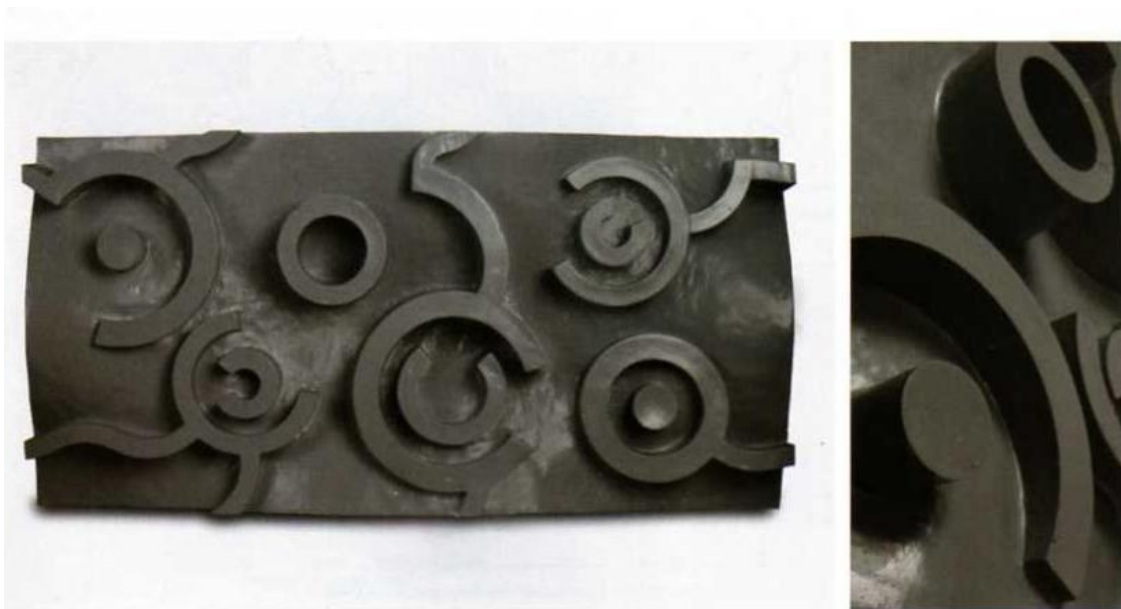
## 4.2 Úprava difuzity zvukového pole

Pro úpravu difuzity poslechového prostoru je vhodné umístit do poslechového prostoru několik difuzorů. Tím by se částečně vykompenzoval vliv zrcadlové stěny, která má nepříznivý vliv na odrazy zvukových vln. Difuzory se umísťují do míst, kde připadá v úvahu první odraz zvuku šířícího se z reproduktoru od stěny. Tam dosahuje difuzor nejvyšší účinnosti. V uvažovaném prostoru lze difuzory umístit na boční stěny a strop. Zejména boční stěnu a strop v oblasti zrcadel by bylo vhodné osadit difuzorem.

Jako nejvhodnější difuzor do hudebního klubu byl vybrán typ AUDITION SPIREFORM (obr. 14) od firmy SONING. Tento difuzní prvek má vhodný design, který nebude působit rušivě. Je vyroben z laminovaného akrylu, který se vyznačuje nízkou

hmotností, lze jej tedy umístit i na strop. Lze ho instalovat přímo na stěnu nebo na nosný rošt. Kmitočtové a směrové charakteristiky tohoto materiálu jsou uvedeny v příloze. [4]

Další možností je pak např. typ AKART HOME nebo AUDITON CITY (oba od firmy SONING).



**Obr. 124** *Difuzor AUDITON SPIREFORM*

Další možností, jak zlepšit difuzitu poslechového prostoru, je RPG difuzor. Ten může být vyroben svépomocí např. ze dřeva. Tímto způsobem je možné snížit finanční náklady na akustické úpravy. V příloženém souboru MS Excel je uveden výpočet pro parametry difuzoru. Ve výpočtu je možné zadat horní a dolní kmitočet pracovního pásma difuzoru. Ze zadaných hodnot dostáváme konkrétní rozměry difuzoru, šířku šachet, počet šachet a jejich hloubky. Šachty od sebe musí být oddělené tenkými přepážkami.

#### **Příklad navrženého difuzoru:**

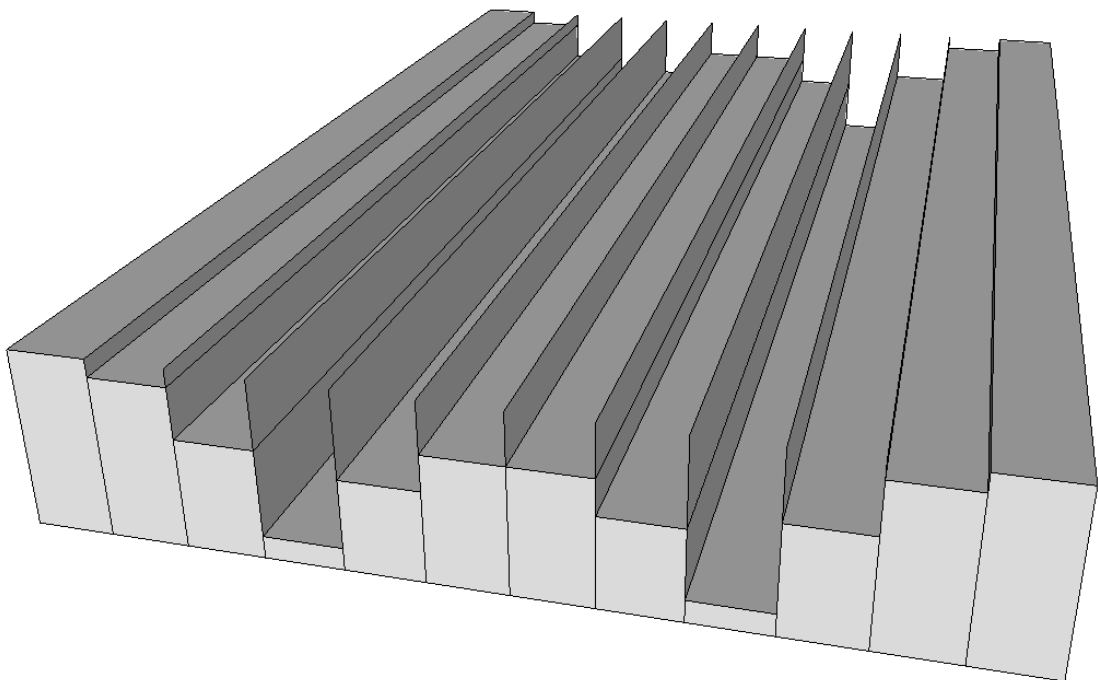
spodní pracovní kmitočet	$f_0 = 2000 \text{ Hz}$
horní pracovní kmitočet	$f_{\max} = 5000 \text{ Hz}$
počet šachet	$N = 11$
šířka šachet	$b = 0,034 \text{ m}$
hloubka šachet v tab. 2.	



hloubka šachty [m]	0	0,008	0,031	0,07	0,039	0,023	0,023	0,039	0,07	0,031	0,008	0
číslo šachty	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

**Tab. 2** Návrh hloubky šachet RPG difuzoru

Výška panelu je víceméně libovolná, závisí pouze na konkrétním umístění panelu a požadavcích majitele klubu. Pro zvýšení životnosti panelu bych doporučil jeho povrchovou úpravu, např. lakováním. Barevné provedení je možné a mělo by odpovídat konkrétnímu umístění. Pro snazší představu o provedení difuzoru je na obr. 15 proveden model panelu. Z obrázku je patrné, že difuzor je osově symetrický, jednotlivé šachty jsou oddělené přepážkami. Celý difuzor by měl být upevněn na nosný rám nebo desku a poté připevněn na strop nebo stěnu. Difuzor je prostorově nenáročný, hloubka včetně nosného rámu nepřekračuje 10 cm.



**Obr. 135** Model RPG difuzoru

### 4.3 Úprava doby dozvuku

Ačkoliv poslechový prostor hudebního klubu splňuje podle normy hodnoty doby dozvuku, bylo by vhodné místnost více ztlumit a docílit tak mírného přetlumení prostoru. Norma uvažuje koncertní sály a poslechové prostory pro klasickou nebo vážnou hudbu, kde je zvuková hladina většinou nižší a tedy i doba dozvuku je subjektivně kratší. V tomto případě je ale třeba uvažovat spíše hlasitější hudbu převážně rockového charakteru.

Akusticky pohltivé prvky by bylo vhodné umístit na stěnu za podium nebo na boční stěny. Tím by se také částečně eliminovala případná zpětná vazba u mikrofonů na podiu. Tento materiál by měl být mechanicky odolný a měl by také splňovat patřičná protipožární opatření. Další pohltivé prvky lze umístit na strop nad podiem. Zde již není kladen nárok na zvýšenou mechanickou odolnost.

Na trhu je k dispozici mnoho druhů absorpčních obkladů. Z katalogu firmy SONING byl vybrán typ PP20 VERSO, který má ideální vlastnosti pro upravovaný prostor. Frekvenční charakteristika činitele zvukové pohltivosti v oktávových a třetinooktávových pásmech tohoto materiálu je uvedena v příloze. Obklad splňuje veškeré požadavky na mechanickou odolnost, žáruvzdornost a je zdravotně nezávadný. Obklad je dodáván s vlastní konstrukcí. Rozměry desek jsou 900 x 1000 x 18 mm a lze zakoupit v různých barevných kombinacích. [4] Další parametry výrobku jsou uvedeny v kopii katalogového listu v příloze.

Jako další alternativy lze použít např. absorpční obklad D30 VERSO nebo P30 VERSO opět od firmy SONING. Samozřejmě je možné použít i materiály od jiných výrobců, při zpracování této diplomové práce jsem však měl k dispozici pouze omezené množství katalogů.

### 4.4 Návrh umístění a parametrů ozvučovacího systému

Součástí této diplomové práce je také analýza současného ozvučovacího systému a návrh na případné zlepšení. V této souvislosti bylo provedeno měření frekvenční charakteristiky ozvučovacího systému. Měření proběhlo v akustických laboratořích FEL v bezdrazové komoře. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v příloze. Z naměřených hodnot je patrné, že frekvenční charakteristiky obou reprobeden jsou značně nevyrovnané. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou v oblasti od 100 Hz do 10 kHz je větší než 20 dB.

Toto je zcela nevyhovující. Zejména vysokotónový reproduktor, který je účinný přibližně od frekvence 2 kHz, má frekvenční charakteristiku značně nerovnoměrnou. Tento problém lze částečně eliminovat výměnou vysokotónového reproduktoru v obou reprobednách.

Další variantou je výměna ozvučovacího systému. Tato možnost je finančně náročnější, ale vzhledem k projevenému zájmu o renovaci rovněž připadá v úvahu. Na začátku úvah o návržení ozvučovacího systému je potřeba definovat prostor, který je nutné pokrýt. V současné době je ozvučen pouze prostor přímo před pódiem. To je však při vyšším počtu posluchačů nedostatečné, protože lidé stojící při krajích již nemají ideální poslechové podmínky. Proto bych rád v rámci tohoto návrhu pokryl celý prostor spodní místnosti. Horní místnost zůstane prozatím bez ozvučení a bude stále sloužit jako klidová zóna, v případě potřeby lze doinstalovat doplňující ozvučení i sem.

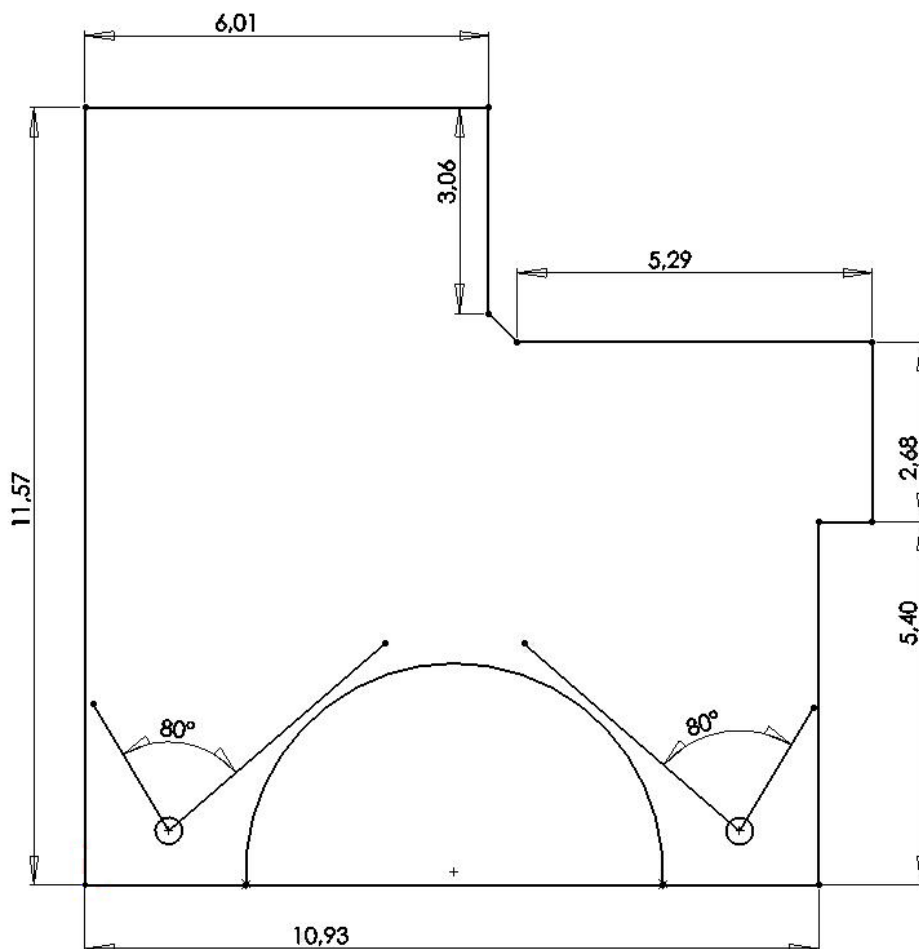
Jelikož na návrh ozvučovacího systému neexistuje v podstatě žádný návod či postup, bylo postupováno víceméně intuitivně na základě vlastních zkušeností a z dostupných parametrů uvedených výrobcí ozvučovacích systémů.

Pro zajištění kompletního pokrytí uvažovaného prostoru bych použil 2 až 4 širokopásmové reprobedny zavěšené nejlépe na stropě doplněné dvěma basovými boxy. Pro umístění basových boxů jsou dvě možnosti. První z nich je umístění do rohů místnosti vedle pódia. To by přineslo i jejich zvýšenou účinnost. Nežádoucí by však mohla být případná zpětná vazba od mikrofonu snímajícího velký buben. V každém případě by bylo vhodné toto rozestavení vyzkoušet a poté se rozhodnout. Druhou možností je zachovat umístění basových boxů jako v současnosti, tj. po stranách před pódiem. Toto rozestavení je výhodné z hlediska zpětné vazby, nevýhodou je však záběr prostoru.

Po dlouhých úvahách byly vybrány dvě varianty ozvučení. První z nich je jednodušší a levnější, pokrývá dostatečně požadovaný prostor, avšak mohou se vyskytnout větší problémy se zpětnou vazbou. Druhá varianta je složitější a finančně náročnější. Oproti tomu získáme dokonaleji ozvučený prostor a odstraníme zpětnovazební problémy první varianty. V obou případech je uvedeno pouze přibližné umístění reproboxů. Konkrétní pozice závisí na vybraném typu reproboxu a na prostorových možnostech.

## 1. Varianta

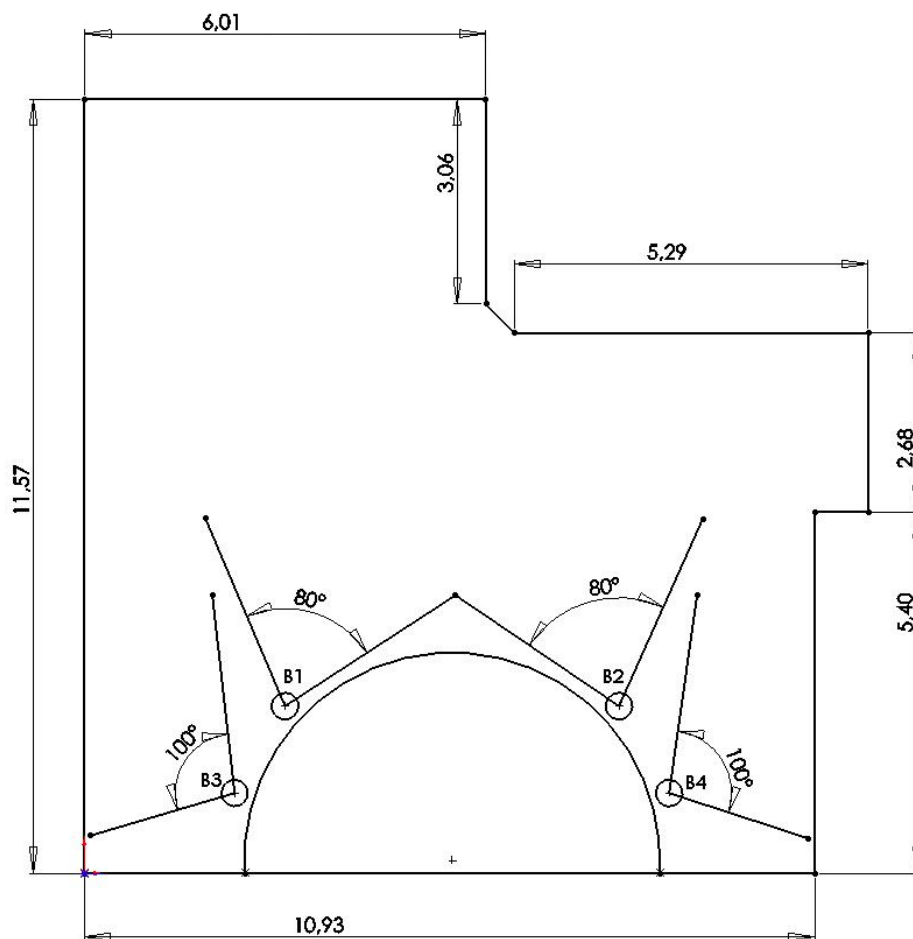
V tomto případě bude ozvučovací systém umístěn podle obr. 16. Na zemi je basový reprobox, širokopásmový box lze umístit na tyč nebo zavěsit pod strop a to tak, aby byla spodní hrana alespoň ve výšce 180 cm, tj. nad hlavami stojících posluchačů a nedocházelo tak k nežádoucím útlumům. Problém se zpožděním není třeba v případě zavěšeného širokopásmového boxu řešit, protože umístěním basového boxu můžeme nastavit stejnou vzdálenost vůči referenčnímu bodu. V případě umístění širokopásmového boxu na tyč je tento problém řešen již výrobcem vhodnou konstrukcí. Jako nejvhodnější typ ozvučovacího systému jsem vybral výrobky firmy KV2, pro basový box typ EX 2.2 (případně EX 2.5), pro širokopásmový box typ EX 12. [7] Parametry těchto systémů jsou uvedeny v příloze. Úhel vyzařování v horizontální rovině  $80^\circ$  je garantován výrobcem pro frekvence nad 1000 Hz. Nižší frekvence bude pravděpodobně nutné mírně potlačit, aby nedocházelo k problémům se zpětnou vazbou.



**Obr. 16** Rozmístění ozvučovacího systému – 1. varianta

## 2. Varianta

Rozmístění reproboxů je naznačeno na obr. 17. Basové reproboxy jsou umístěné na zemi. Širokopásmové reproboxy B1 a B2 lze umístit na tyč nebo zavěsit pod strop, přičemž platí stejná pravidla jako již uvedená v 1. variantě. Reproboxy B3 a B4 budou zavěšené pod stropem a nasměrované podle obr. 17.



**Obr. 17** Rozmístění ozvučovacího systému – 2. varianta

Celé propojení tohoto systému je trochu odlišné od předchozího. Nabízejí se dva způsoby. Prvním z nich je připojení zvukového procesoru a nastavení odpovídajících zpoždění. Toto ale v praxi takřka nelze provést, protože v každém bodě jsou vzdálenosti mezi reproduktory a posluchačem odlišné. Z těchto důvodů bude proveditelnější a cenově přijatelnější připojit reproboxy B3 a B4 druhým způsobem. Tj. reproboxy B1 a B2 včetně basových připojit k mixážnímu pultu na stereo výstup L-R a reproboxy B3 a B4 připojit zvláštním mono výstupem, buď oba společně, nebo každý jiným, a jejich hlasitost nastavit na

nižší úroveň. Toto zapojení umožní pouštět z reproboxů B3 a B4 pouze ty nástroje a zpěvy, které nejsou v prostoru před nimi dostatečně slyšet, např. kvůli tomu, že je muzikant na opačné straně pódia. Tento způsob zapojení ozvučovacího systému je náročnější pro zvukaře, ale přináší lepší poslechové podmínky pro návštěvníky.

Jako vhodný typ širokopásmových reproboxů jsem vybral na pozice B1 a B2 typ EX 12, na pozice B3 a B4 typ EX 10. Pro basové reproboxy by byl vhodný typ EX 2.2 (případně EX 2.5). Parametry těchto reproboxů jsou uvedeny v příloze.

Porovnání finanční náročnosti obou variant je uvedeno v tabulce 3. Ceny jsou včetně DPH a mohou se měnit. Vychází z dostupného ceníku na [7].

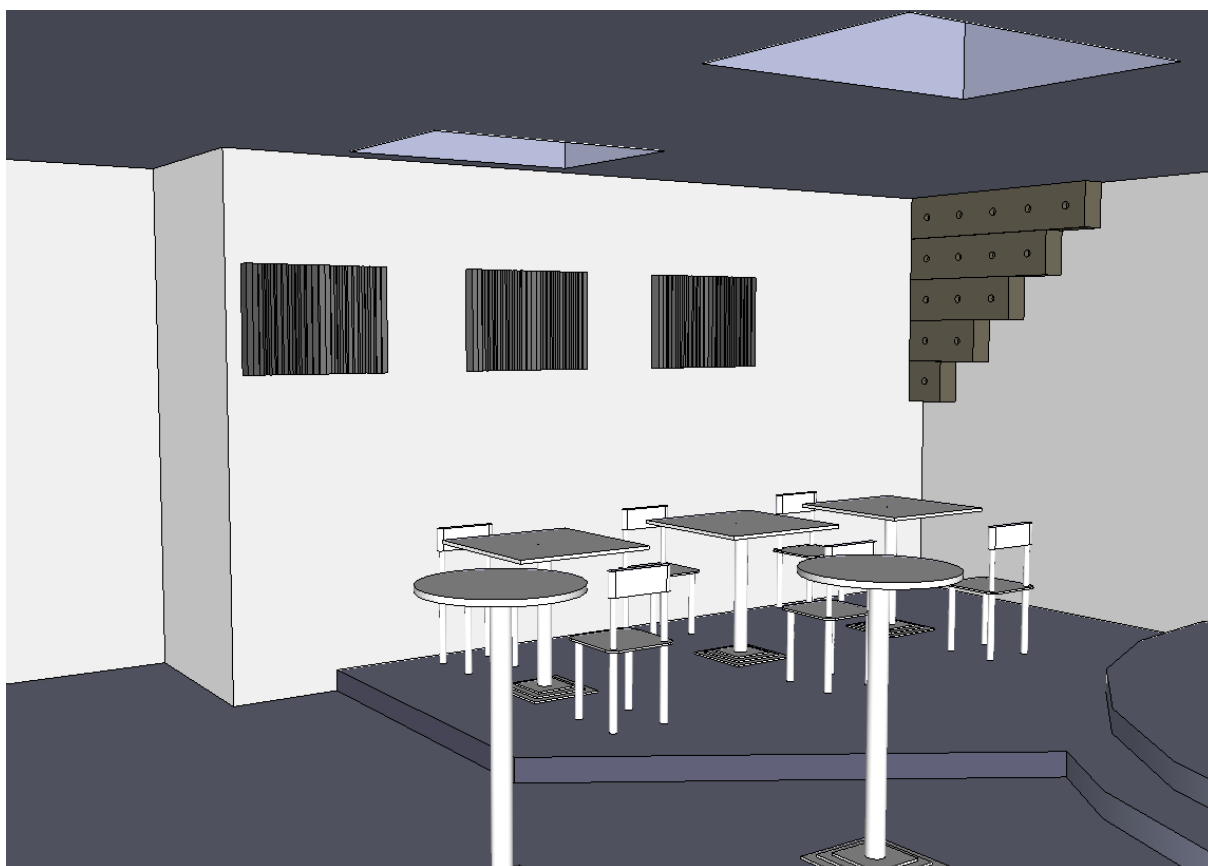
1. varianta				2. varianta			
	počet ks	cena za ks	cena		počet ks	cena za ks	cena
EX 12	2	65 677 Kč	131 354 Kč	EX 12	2	65 677 Kč	131 354 Kč
EX 2.2	2	60 604 Kč	121 208 Kč	EX 10	2	47 920 Kč	95 840 Kč
				EX 2.2	2	60 604 Kč	121 208 Kč
Cena celkem	252 562 Kč			Cena celkem	348 402 Kč		

**Tab. 3** Cenové porovnání obou variant

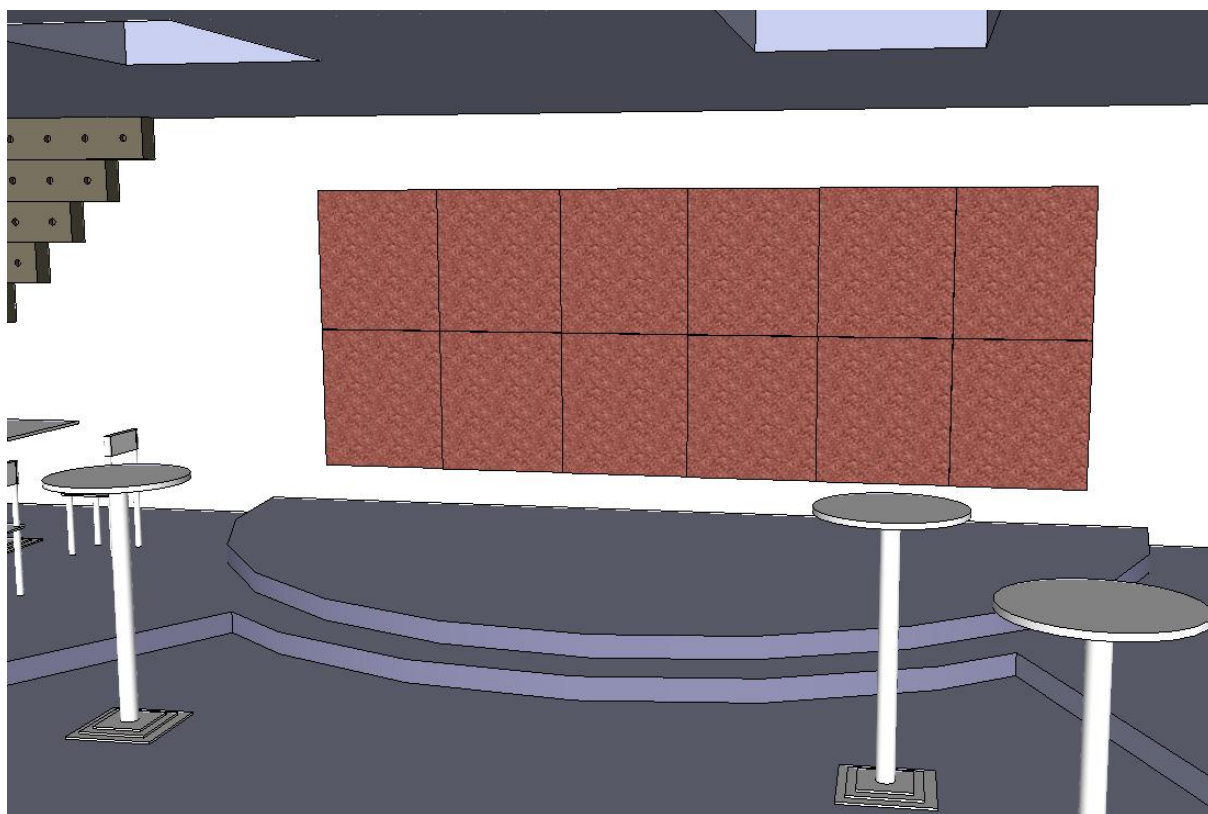
#### 4.5 Návrh umístění akustických prvků

V této kapitole je uvedeno několik návrhů na umístění difuzorů a rezonátorů. Instalace akustických prvků na konkrétní pozice je možná až po dohodě s majitelem hudebního klubu. Následující obrázky tak slouží pouze jako předloha. Pravidla pro umístění jednotlivých prvků byla popsána v předchozích kapitolách. Barevné provedení modelovaných prvků je má pouze ilustrativní charakter.

Na obr. 18 je znázorněn příklad umístění rezonátorů a difuzorů. Uvedená pozice difuzorů má význam hlavně pro 2. variantu rozestavení ozvučovacího systému. V případě první varianty rozestavení nebo současného ozvučovacího systému nebudou mít difuzory takovou účinnost, protože nebudou rozptylovat první odraz. Rezonátory mohou být podobným způsobem umístěny i do protějšího rohu místnosti.

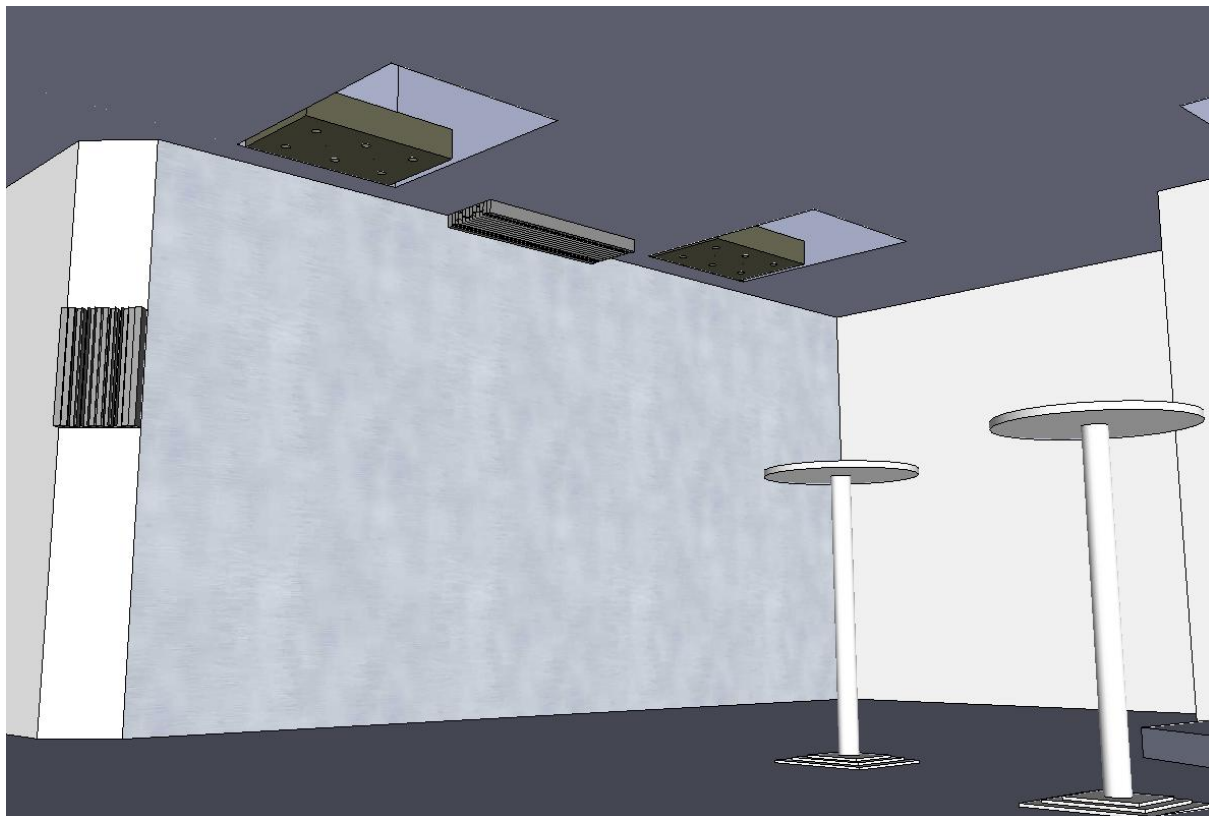


**Obr. 18** Návrh umístění difuzorů a rezonátorů



**Obr. 19** Návrh umístění akustických obkladů

Na obr. 19 je vidět umístění akustických obkladů. Obložení stěny za pódiem bude mít za následek snížení doby dozvuku na středních frekvencích a omezení nežádoucích odrazů na pódiu.



**Obr. 20** Návrh umístění difuzorů a rezonátorů

Příklad využití stropních vrchlíků pro umístění rezonátorů je na obr. 20. Difuzory mají za úkol rozptýlit nežádoucí odrazy od zrcadlové stěny.



## Závěr

Tato diplomová práce vznikla na základě zájmu majitele hudebního klubu House of Blues v Plzni o zlepšení poslechových podmínek pro návštěvníky i vystupující umělce. Veškeré informace v této práci lze využít při realizaci akustických úprav.

Všechny body zadání byly postupně splněny. V úvodu práce je popsáno několik základních pojmů a vztahů prostorové akustiky potřebných pro další postup. Následuje popis současného stavu. Pro lepší představu o upravovaném prostoru byl vytvořen model místnosti. V průběhu zpracovávání výpočtové části se bohužel objevilo několik problémů. Teorii pro výpočet vlastních frekvencí nebylo možné aplikovat, neboť uvažovaný prostor je velmi členitý a vliv horní místnosti nelze ve výpočtu zanedbat. Dalším problémem byl výpočet doby dozvuku. Jelikož se v místnosti nachází velké množství předmětů, u kterých není známý činitel zvukové pohltivosti, bylo v tomto případě postupováno opačně. Z naměřené doby dozvuku byla spočtena průměrná hodnota činitele zvukové pohltivosti klubu, ze které se později vycházelo při úpravě doby dozvuku. Vypočítané hodnoty odpovídají stavu bez posluchačů. V dalších částech je popsáno měření doby dozvuku a měření vlastních frekvencí místnosti včetně grafů s naměřenými hodnotami.

Závěr práce je věnován návrhu zlepšení akustických vlastností. V rámci toho byl spočítán rezonátor na potlačení vlastních kmitů a difuzor na zlepšení difuzity prostoru. Dále bylo vybráno několik průmyslově vyráběných materiálů, které také pomohou zlepšit akustické vlastnosti klubu. Součástí práce je také analýza současného ozvučovacího systému a návrh nového včetně dvou variant umístění a cenového porovnání pro konkrétně navrhované typy ozvučovacích systémů. V poslední kapitole je uvedeno několik návrhů na umístění uvedených akustických prvků.

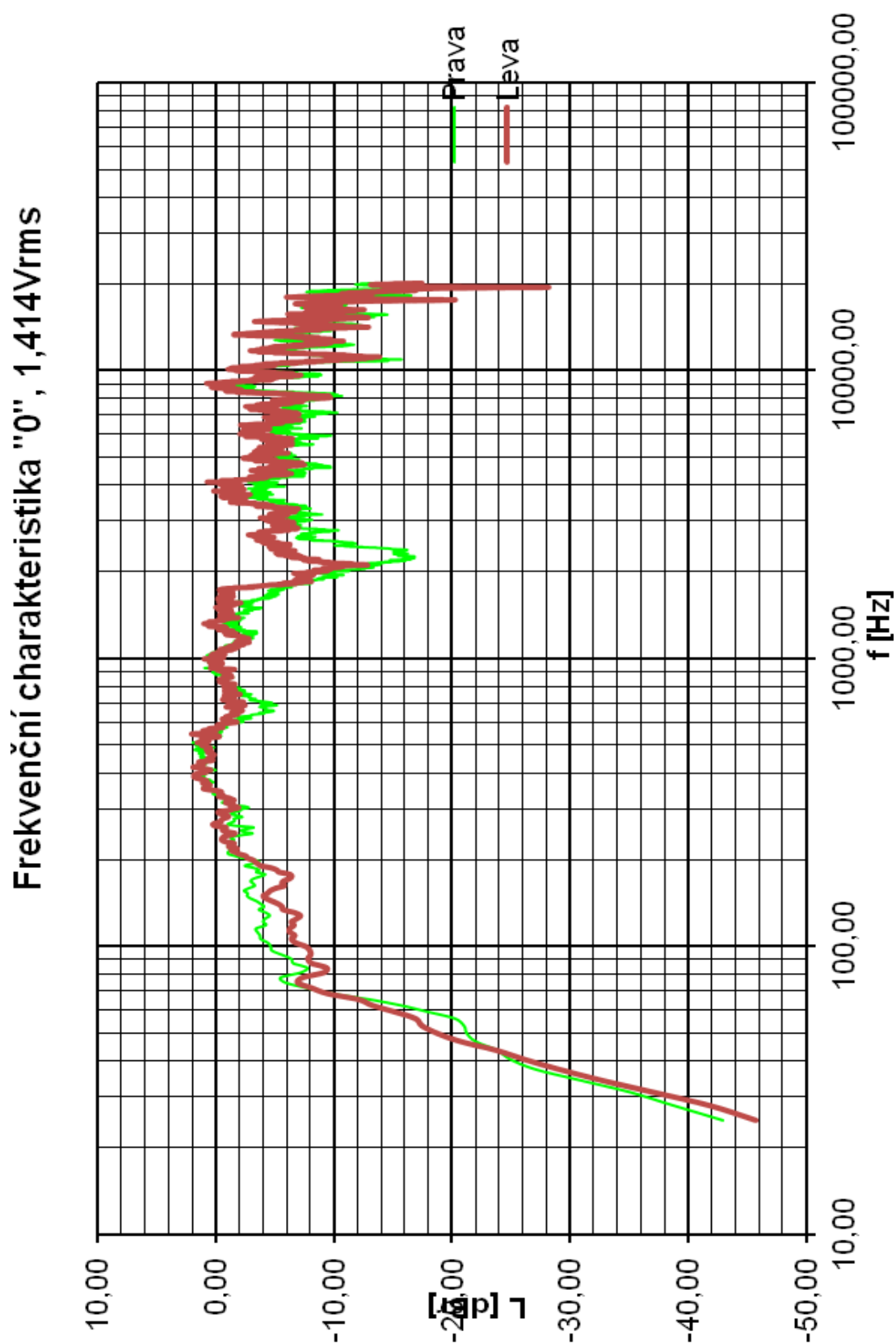
Při realizaci tohoto projektu by bylo vhodné postupovat po částech. Po instalaci rezonátorů se zcela jistě změní doba dozvuku, neboť rezonátor nepracuje jen na frekvenci, pro kterou byl navržen. Proto by bylo vhodné provést po namontování rezonátorů další měření a z naměřených hodnot určit další postup úprav.

## Použitá literatura

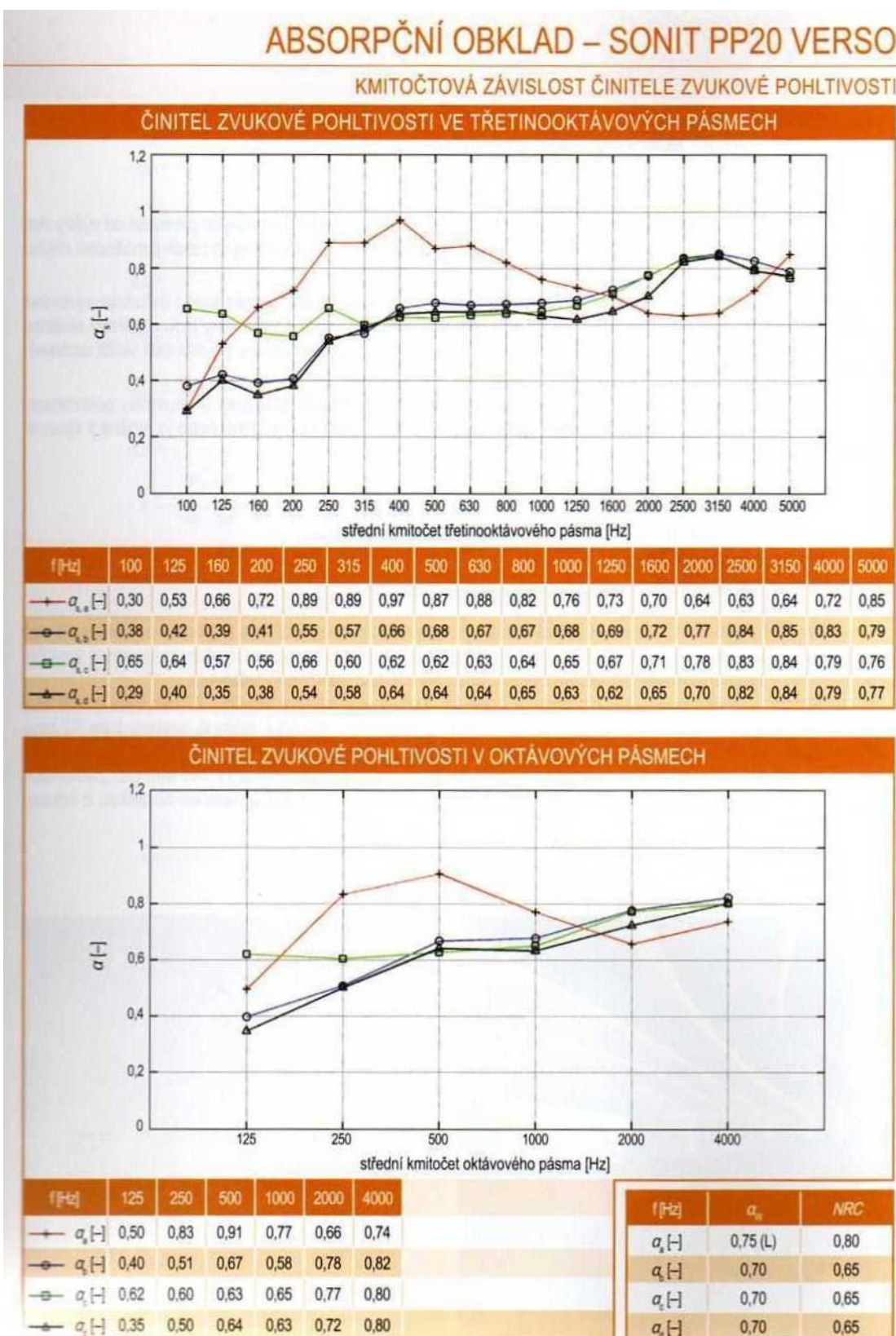
- [1] Kolmer, F.; Kyncl, J.: *Prostorová akustika*, SNTL Praha 1982
- [2] Vlachý, V.: *Praxe zvukové techniky*, Muzikus Praha, 2000
- [3] Vaverka, J.: *Stavební fyzika I*, VUT v Brně, 1998
- [4] Hrádek, T., Tuček, J.: *Katalog akustických prvků*, AMU 2011
- [5] Altman, J. *Diplomová práce „Návrh akustických úprav poslechové místnosti“*  
v r. 2009
- [6] <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Tema-mesice-Poslech-v-domacich-studiich~16~rijen~2006/> <20.11.2011>
- [7] <http://www.kv2audio.cz> <25.4.2012>

## Přílohy

Naměřená frekvenční charakteristika ozvučovacího systému



Frekvenční charakteristiky absorpčního materiálu PP20 VERSO

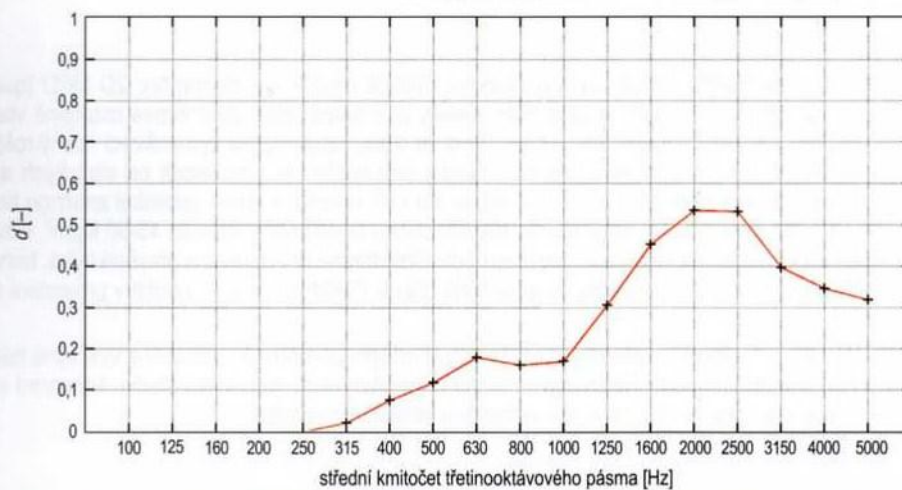


Charakteristiky difuzoru AUDITON SPIREFORM

## DIFUZNÍ PRVEK – AUDITON SPIREFORM

KMITOČTOVÁ ZÁVISLOST ČINITELE DIFUZITY A SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY ODRAZŮ

PRŮMĚRNÁ HODNOTA NORMALIZOVANÉHO ČINITELE DIFUZITY PRO VŠESMĚROVÝ DOPAD ZVUKU

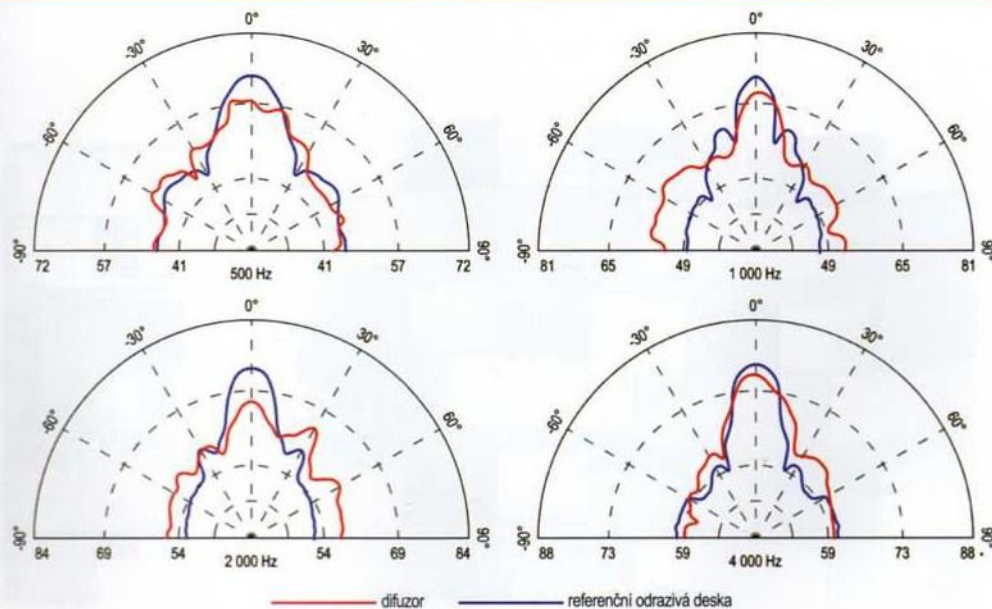


f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
d [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,12	0,18	0,16	0,17	0,31	0,45	0,53	0,53	0,40	0,35	0,32

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
d [-]	0,00	0,01	0,12	0,21	0,51	0,35

### SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY ODRAZŮ VE TŘETINOOKTÁVOVÝCH PÁSMECH – KOLMÝ DOPAD

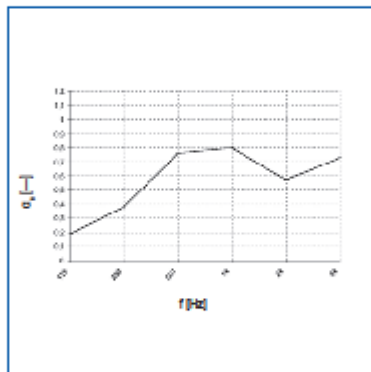
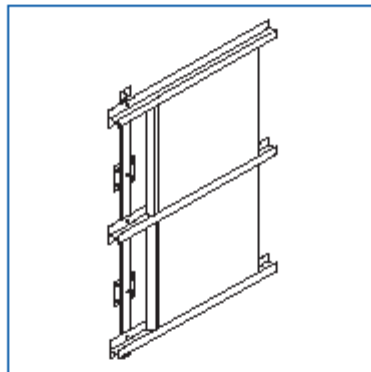


\*pro větší přehlednost a názornost zobrazených dat byly naměřené směrové charakteristiky proloženy vytláčenými křivkami

Katalogový list akustického obkladu PP20 VERSO

# SONIT PP20

AKUSTICKÉ OBKLADOVÉ DESKY



**POPIS**

Akustický stěnový obklad pro interiérové i exteriérové aplikace s efektním vzhledem přírodního kamene. Vyznačuje se nehořavostí, ekologickou čistotou (neobsahuje vlákna) a velmi dobrou mechanickou, klimatickou a chemickou odolností.

**TVAR:** Obdélníkové desky různých formátů s rovinnou lícovou stranou se zkosenými hranami. Některé formáty jsou na protilehlých bočních stranách opatřeny drážkou pro montáž do nosné konstrukce.

**MATERIAL:** Velikostně tříděný barvený písek spojený epoxidovou kompozicí. Pro exteriérové aplikace je lícová strana obkladu opatřena ochrannou barevnou vrstvou.

**ROZMĚRY:** 900 × 1000 × 18 mm, 950 × 1000 × 18 mm, 650 × 1300 × 20 mm s drážkou

**HMOTNOST:** 30 kg/m<sup>2</sup>

**BARVY A POVRCHOVÁ ÚPRAVA:** Zmitost přírodního kamene, provedení pro interiéř jednobarevné i melirované, pro exteriér jednobarevné v široké barevné škále, dle vzorníků.

**AKUSTICKÉ VLASTNOSTI:**

- absorpce zvuku na středních a vysokých kmitočtech
- NRC = 0,60
- $\alpha_w = 0,55$  (M,H) - platí pro vzduchovou mezeru 30 mm
- index vzduchové neprůzvučnosti:  $R_w = 13$  dB

**DALŠÍ CHARAKTERISTIKY:**

- objemová hmotnost: 1575 kg/m<sup>3</sup>
- pevnost v tlaku: 12 MPa
- hořavost: A2-s2,d0 dle ČSN EN 13 501-1:2003
- klimatická odolnost: - 30 až + 60°C, mrazuvzdorný (50 cyklů)
- součinitel tepelné vodivosti: 0,717 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
- hygiena: neobsahuje minerální vlákna ani těžké kovy, schválen pro použití ve zdravotnictví a potravinářství
- chemická odolnost: odolává zředěným roztokům luhů a kyselin, ropným produktům a chemickým roztokům rozpouštědel

**POUŽITÍ**

Akustické úpravy průmyslových provozů i společenských prostorů, akustické úpravy exteriérů (v kombinaci s neprůzvučným materiálem je vhodný pro konstrukci protihlukových stěn).

**MONTÁŽ**

Obkladové prvky se montují na stěnu se vzduchovou mezerou na kovovou nosnou konstrukci povrchově upravenou základním nátěrem nebo žárovým zinkováním. Prostor mezi konstrukcí a stěnou lze využít pro technologické rozvody. Prvky je možné montovat i do speciálních panelů určených pro konstrukci protihlukových stěn. Obklad je možné řezat na požadovaný rozměr za sucha diamantovým kotoučem nebo rozbrušovacím kotoučem na kámen. Otvory do obkladu (např. pro zásuvky a vypínače) lze vrtat tvrdokovovými nástroji.

**ÚDRŽBA**

Obklad lze od prachu vyčistit vysavačem. Při větším zašpinění lze použít roztok univerzálních saponátů v horké vodě nanášený kartáčem. Při zašpinění ropnými produkty je možné použít i rozpouštědlo.

**BALENÍ**

24 kusů na paletě.

www.soning.cz

• prostorová akustika • stavební akustika • elektroakustika • ozvučení • průmyslová akustika • dopravní akustika • akustické materiály • měření • studie • projektování • dodávky • realizace •

SONING Praha a.s., Píseňská 66, 151 24 Praha 5  
tel.: +420 257 190 511-512, fax: +420 257 329 512, e-mail: soning@soning.cz



Katalogový list širokopásmového reproboxu EX 10

# EX 10

A New Approach to Active Speaker Systems



11

## Specifications

System Acoustic	
-3dB response	65Hz - 18kHz
-10dB response	50Hz - 22kHz
Acoustic Performance	
Max SPL long-term	126dB
Max SPL Peak	129dB
Crossover Points	1.6 kHz
HF Compression Driver	
Number of Drivers	1
Diaphragm Size	1.75" (44mm)
Throat Exit Diameter	1.0" (24.5mm)
Phase Plug	Patented - Complex Geometry
Diaphragm Material	Titanium
Magnet Type	Neodymium
HF Horn Design	
Horizontal Coverage	100° 1kHz to 10kHz avg.
Vertical Coverage	80° 1kHz to 10kHz avg.
Type	Constant Directivity
Mouth Size	7.48" x 7.48" (190mm x 190mm)
Throat size	1.0" (25.4 mm)
Low Frequency Section	
Number of Drivers	1
Acoustic Design	Front Loaded, Bass Reflex
Woofer Size	10.00"(250mm)
Voice Coil Diameter	2.50"(63mm) Inside/Outside Epoxy Baked
Wire Type	Copper Clad Aluminum
Diaphragm Material	Epoxy-reinforced Cellulose
Magnet Type	Neodymium
Magnetic Circuit	TransCoil dual voice coil
Second Static Voice Coil	Yoke Mounted Copper Clad Aluminum
High Frequency Amplifier Specifications	
Type	Class AB - Push Pull - Low Intermodulation Design Transformer Balanced Speaker Output
Rated Continuous Power	50 Watts
Distortion	<.05% THD
Operating Bandwidth	1.5kHz - 30kHz
Cooling	Passive - aluminum heatsink
Forced Ventilation	High-capacity fan (variable speed)

Bass Amplifier Specifications	
Type	Class H - Single Power Supply
Rated Continuous Power	450 Watts
Distortion	<.05% THD
Operating Bandwidth	20 Hz - 1.8 kHz
Cooling	Passive - aluminum heatsink
Forced Ventilation	High-capacity fan (variable speed)
Power Supply	Iron core toroidal trans- former
Physical	
Height	20.23" (514mm)
Width	12.20" (310mm)
Depth	12.79" (325mm)
Weight	48.4 lbs. (22kg)



Katalogový list širokopásmového reproboxu EX 12

# EX 12

A New Approach to Active Speaker Systems



13

## Specifications

System Acoustic	
-3dB response	55Hz - 20KHz
-10dB response	50Hz - 20KHz
Acoustic Performance	
Max SPL long-term	127dB
Max SPL Peak	130dB
Crossover Points	1.1 kHz
HF Compression Driver	
Number of Drivers	1
Diaphragm Size	3" (76mm)
Throat Exit Diameter	1.4" (35mm)
Phase Plug	Three slot radial
Diaphragm Material	Nitrate VPD Treated Titanium
Former Material	Nomex
Former Design	Direct Drive Bent Former
Magnet Type	Neodymium
HF Horn Design	
Horizontal Coverage	80° 1kHz to 10kHz avg.
Vertical Coverage	40° 1kHz to 10kHz avg.
Type	Constant Directivity
Mouth Size	10.60" x 10.60" (270mm x 270mm)
Throat size	1.4" (35 mm)
Low Frequency Section	
Number of Drivers	1
Acoustic Design	Front Loaded, Bass Reflex
Woofer Size	12.00"(304mm)
Voice Coil Diameter	2.50"(63mm) Inside/Outside Epoxy Baked
Wire Type	Copper Clad Aluminum
Diaphragm Material	Epoxy-reinforced Cellulose
Magnet Type	Neodymium
Magnetic Circuit	Active Impedance Control
Second Static Voice Coil	Yoke Mounted Copper Clad Aluminum
High Frequency Amplifier Specifications	
Type	Class AB – Push Pull – Low Intermodulation Design Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor (MOSFET) output stage Transformer Balanced Speaker Output
Rated Continuous Power	50 Watts
Distortion	<.05% THD

Operating Bandwidth	1.1kHz – 30kHz
Cooling	Passive – aluminum heatsink
Forced Ventilation	High-capacity fan (demand sensitive)
Bass Amplifier Specifications	
Type	High-efficiency, Current-enhancing Switch Mode technology with Linear Active Filter
Rated Continuous Power	450 Watts
Distortion	<.05% THD
Operating Bandwidth	20Hz – 2kHz
Cooling	Passive – aluminum heatsink
Forced Ventilation	High-capacity fan (demand sensitive)
Power Supply	Iron core toroidal transformer
Physical	
Height	23.46" (596mm)
Width	14.48" (368mm)
Depth	14.48" (368mm)
Weight	60 lbs. (27kg)





Katalogový list basového reproboxu EX 2.2

# EX 2.2

## Active Bass Module



14



The EX 2.2 is a compact, high output active subwoofer system. Through the implementation of KV2 Audio's highly-efficient "Switch Mode" amplifier technology, precision-manufactured, high-tech woofer designs and the innovative implementation of a high-efficiency, twin-chamber acoustic design, the EX 2.2 delivers 1000 watts of continuous power for tight, fast, controlled bass response at very high levels from a small cabinet footprint.

### Switch Mode Technology

The EX 2.2 and EX 2.5 both implement an improved version of KV2 Audio's Switch Mode, current-enhancing low frequency amplifier technology. Through the implementation of this highly efficient amplifier technology, we're able to maintain the extraordinary amount of current required to control the woofer at extremely high levels with minimal waste resulting in heat. Thus, we're able to reproduce low frequency information with high transient levels and extend the operational boundaries of the acoustic design. The new design improves overall system efficiency to over 90%.

Either of the EX subs can add high performance bass reproduction to active speaker systems such as KV2 Audio's EX 10 or EX12 loudspeakers, or can be easily used with passive speaker systems. The built in electronic high pass filter, phase and independent output level controls provide high precision, easy to use system integration circuitry. Both are ideal for use in live applications that require reproduction of low frequencies with very high transient content at high output levels.

### APPLICATIONS

- Small to medium-sized Live and Playback Applications
- Portable PA Systems for speech and multimedia playback
- Mobile DJ
- Fixed Installations

### Features

- Active high output, double 12-inch, bass module
- 1000 Watt High-efficiency amplifier featuring current-enhancing switch mode technology with linear active filter
- High efficiency acoustic design delivers over 130dB of output
- Complete, on-board subwoofer management including equalization, crossover filters, amplifier overdrive protection, output level and phase controls
- Left & Right Stereo or Mono Inputs with through signal outputs and high pass outputs
- Two 12-inch, high output, high efficiency low frequency drivers with 3.00" (75mm) polyimide, high temperature voice coil assembly and light weight, high force neodymium magnetic structures
- Professional, Baltic birch construction with highly resistant polymer coating
- Two recessed side handles for simplified handling and carrying
- Acetal copolymer high impact, low friction feet are located on two sides allowing vertical or horizontal system set up, lock-in and easy cabinet movement
- Two internal corner braces with four M10 suspension points
- Top hat for pole insertion and speaker placement
- LED indicators for signal present, limiter, thermal condition and power ON status

### Specifications

System Acoustic Acoustic Performance	
-3dB response	38Hz - 130Hz
-10dB response	32Hz - 150Hz
Max SPL long-term	130dB
Max SPL Peak	133dB
Crossover Points	120Hz
Low Frequency Section	
Number of Drivers	2
Acoustic Design	Acoustic loading via twin asymmetrical chambers
Woofer Size	12.00"(300mm)
Voice Coil Diameter	3.00"(75mm) Inside/Outside epoxy baked
Diaphragm Material	Epoxy-reinforced cellulose
Magnet Type	Advanced ventilated neodymium
Bass Amplifier Specifications	
Rated Continuous Power	1000 Watts
Distortion	<.05% THD
Operating Bandwidth	20Hz - 2kHz
Cooling	Passive - finned aluminum heatsink
Power Supply	Iron core toroidal transformer
Physical	
Height	18.54" (471mm)
Width	23.38" (594mm)
Depth	24.21" (615mm)
Weight	99 lbs (45kg)

www.kv2audio.com

Katalogový list basového reproboxu EX 2.5

# EX 2.5

A Professional Low Frequency Solution



15



The EX 2.5 is the "active" brother of the ES 2.5 bass module found in the ES Series. It provides depth and power that belies its size and footprint. The product uses the same low frequency 1600-watt amplifier found inside the EPAK 2500 and features stereo signal input, output and hi-pass connectivity, control panel allowing easy integration with passive or active loudspeaker systems.

People who have experienced the ES 2.5 and EX 2.5 constantly remark that they can't believe the quality and output level of bass that these cabinets deliver. Now, by creating a standalone version, the EX 2.5 becomes the perfect tool for high-end low frequency systems. Single cabinets can be placed in ideal locations within the confines of an installation or multiple cabinets can be assembled to increase frontal area, loading and deliver massive output.

Once you start using EX 2.5 active subwoofers, it's hard to go back to using standard subwoofer solutions. The EX 2.5 eliminates racks, speaker cables, outboard control electronics and the time required to set up and maintain the system. Set it up, plug in the number of cabinets you want to use, stand back and go.

## APPLICATIONS

- Small to large-sized Live and Playback Applications
- Portable PA Systems for speech and multimedia playback
- Mobile DJ
- Fixed Installations

## Features

- Active high output, double 15-inch, bass module
- 1600 Watt High-efficiency amplifier featuring current-enhancing switch mode technology with linear active filter
- High efficiency acoustic design delivers over 134dB of output
- Complete, on-board subwoofer management including equalization, crossover filters, amplifier overdrive protection, output level and phase controls
- Stereo or Mono inputs with through signal outputs and high pass output
- Two 15-inch, high output, high efficiency low frequency drivers with 4.00" (100mm) polyimide, high temperature voice coil assembly and carbon fiber reinforced cone assemblies
- Professional Baltic birch construction with highly resistant polymer coating
- Eight custom corner handles for simplified handling and carrying
- Acetal copolymer high impact, low friction feet are located on two sides allowing vertical or horizontal system set up, lock-in and easy cabinet movement
- Six internal corner braces with twelve M10 suspension points
- Top hat for pole insertion and speaker placement
- LED indicators for signal present, limiter, thermal condition and power ON status

## Specifications

System Acoustic Acoustic Performance	
-3dB response	38Hz - 130Hz
-10dB response	32Hz - 150Hz
Max SPL long-term	134dB
Max SPL Peak	137dB
Crossover Points (Selectable)	90Hz / 130Hz
Low Frequency Section	
Number of Drivers	2
Acoustic Design	Acoustic loading via twin asymmetrical chambers
Woofer Size	15.00" (381mm)
Voice Coil Diameter	4.00" (100mm) Inside/ Outside epoxy baked
Diaphragm Material	Epoxy-reinforced cellulose
Magnet Type	Advanced ventilated ferrite
Bass Amplifier Specifications	
Rated Continuous Power	1600 Watts
Distortion	<.05% THDz
Operating Bandwidth	20Hz - 2kHz
Cooling	Passive - aluminum heatsink
Power Supply	Iron core toroidal transformer
Physical	
Height	23.62" (600mm)
Width	27.55" (700mm)
Depth	29.13" (740mm)
Weight	182 lbs (83 kg)



www.kv2audio.com

