

# NÁVRH A RELIZACE AKUSTIKY SÁLU FILHARMONIE HRADEC KRÁLOVÉ, FHK

Martin Vondrášek<sup>a), b)</sup>

<sup>a)</sup> Výzkumné centrum hudební akustiky (MARC) Praha

<sup>b)</sup> SONING Praha, a.s. – centrum akustických služeb,

Plzeňská 66, 151 24 Praha 5, Czech Republic

*martin.vondrasek@soning.cz www.soning.cz*

**Abstract:** This article comprises the design of acoustic solution of the concert hall incl. orchestra enclosure (shell). The design was made using the newest knowledge of room and architectural acoustic, hereafter the simulation in the EASE program was applied. Impulse responses in selected listening positions were created by auralization process. Then, after installation of designed acoustic elements, measurements of objective criteria of the acoustical quality were taken. The measurement positions coincided with the selected listening positions in the EASE simulation. At the end the single value classification of hall acoustical quality was made.

## 1. Úvod

V tomto článku je popsána realizace koncertního sálu Filharmonie Hradec Králové (dále jen FHK) od počátečního návrhu, přes vlastní realizaci až po závěrečná akustická měření a konfrontace s předpokládanými dosaženými akustickými hodnotami stanovenými na základě akustických výpočtů. V následujících třech kapitolách bude popsán akustický návrh včetně navržených akustických prvků a orchestrální mušle, dále vlastní budování sálu a závěrečná akustická měření.

## 2. Akustický návrh sálu

Při akustickém návrhu sálu jsme byly limitovány maximálním objemem, který je 6782 m<sup>3</sup> včetně mobilní orchestrální mušle instalované v prostoru jeviště. Vzhledem k uvažovanému počtu návštěvníků 563 a prioritnímu způsobu využívání pro symfonickou hudbu (stálá scéna filharmonického tělesa Hradec Králové) byla stanovena optimální doba dozvuku  $RT_{unocc} = 1,6$  s. Pro stanovení dalších akustických parametrů bylo vycházeno z doporučených hodnot uvedených v [1] a provedení akustických simulací.

### 2.1. Stanovení vstupních parametrů

Při akustickém návrhu byly sledovány akustické parametry uvedené v tabulce 1 s uvedením požadovaných hodnot, které jsou vychází pro jednočíslné klasifikaci akustické kvality koncertních sálů dle metodiky uvedené v [1].

Mimo těchto parametrů byly sledovány ještě akustické parametry uvedené v tabulce 2 s uvedením požadovaných hodnot, které byly stanoveny s použitím [2] a [3].

**Table 1.** Akustické parametry pro hodnocení dle [1]

	optimální	simulace	měření
$RT_{mid}$ [s]	1,60	1,64	1,58
$[1-IACC_{E3}]$ [-]	1,00	0,58	0,67
$EDT_{mid}$ [s]	1,70	1,69	1,55
SDI [-]	1,00	-	0,70
$G_{mid}$ [dB]	4,5 - 5,5	7,5	7,0
ITDG [ms]	12 - 18	-	18
BR [-]	1,40	1,48	1,44

**Table 2.** Další sledované akustické parametry.

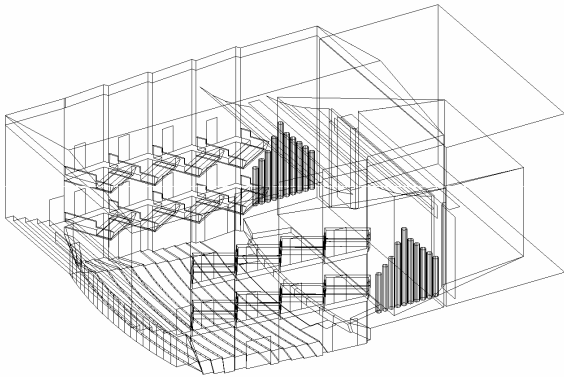
	optimální	simulace	měření
$C_{80}$ [dB]	$1 \pm 2$	0,16	0,80
EK14 [-]	< 1,5	< 0,90	< 0,78
$T_s$ [ms]	70 až 150	115	108

Všechny hodnoty akustických parametrů jsou uvedeny pro neobsazený stav. Pro hodnocení dle [1] byl proveden přepočítání parametru doby dozvuku  $RT_{mid}$  a poměru basových kmitočtů  $BR$  na obsazený stav.

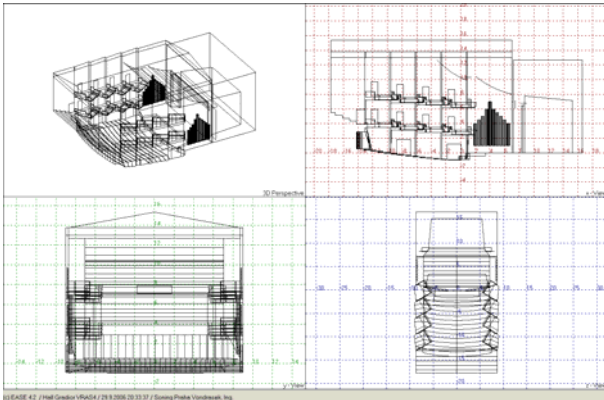
### 2.2. Akustické simulace

K vlastnímu návrhu akustických úprav bylo použito akustického modelu vytvořeného v simulačním programu EASE v 4.1.

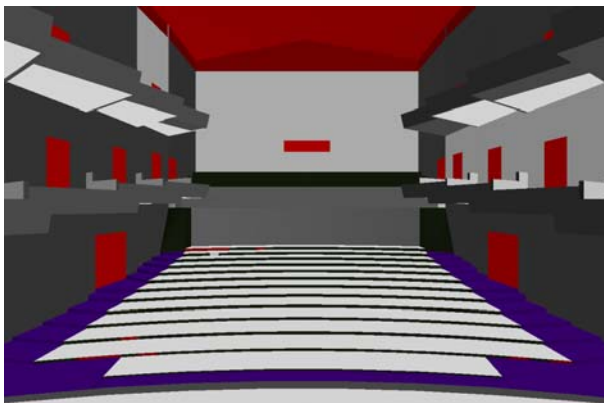
Při vyšetřování návrhu odrazných prvků a tvaru orchestrální mušle byla použita paprsková metoda šíření zvuku Raytracing. Pro zjišťování hodnot sledovaných akustických parametrů s rozložením v poslechových plochách bylo použito modulu Aura version 2.1 simulačního programu Ease v 4.1.



**Figure 1.** Pohled na 3D drátěný model sálu FHK



**Figure 2.** Prostorové projekce sálu FHK

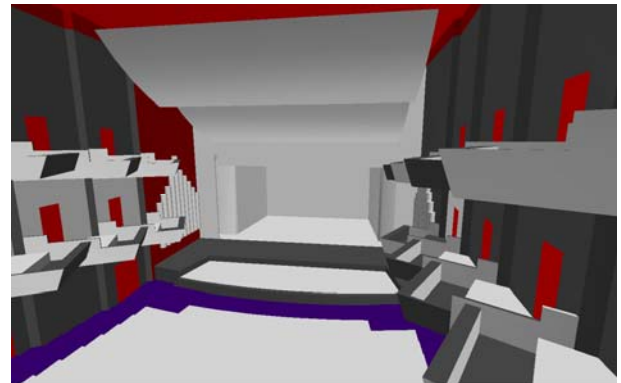


**Figure 3.** Vizualizace prostoru hlediště FHK



**Figure 4.** Pohled do prostoru hlediště FHK

Pohled na vizualizace sálu s porovnáním skutečného provedení jsou na následujících obr. 2 až 5.



**Figure 5.** Vizualizace prostoru jeviště FHK



**Figure 6.** Pohled do prostoru jeviště FHK



**Figure 7.** Pohled do prostoru jeviště s osazením symfonického hudebního tělesa

Při zhotovení akustického modelu byly hodnoty činitele zvukové pohltivosti aplikovaných materiálů použity z databáze programu Ease. Hodnoty rozptylu navržených difuzních prvků byly získány na základě vztahů v [8] a s použitím programu Matlab.

### 2.3. Akustické řešení obvodových stěn

Posluchači nejlépe hodnotí sály, které vykazují co nejvyšší hodnoty indexu *BQI* (**B**inaural **Q**uality **I**ndex). Proto při návrhu akustického řešení stěn sálu byly použity difusní rozptylné prvky, které mají zajistit co nejvyšší hodnoty *BQI*. Tyto prvky byly použity ve třech různých modifikacích, které vycházely z účelu využití toho kterého daného prvku. Zadní stěna sálu je tvořena QRD difusory, které byly navrženy s prvočíslly  $N = 5$  a  $7$ . Tyto prvky byly prostřídány na základě posloupnosti vygenerovaného signálu MLS řádu  $N = 4$  délky  $L = 15$ . Toto uspořádání zaručuje podstatně rovnoměrnější rozptyl zvukového signálu než opakující se v řadě prvky QRD stejného řádu  $N$ .



**Figure 8.** Řez prvky NQRD instalovanými na zadní stěně a poprsníku hlavního balkónu

Při výpočtu prvků QRD pro  $N = 5$  a  $7$  bylo použito následujících vztahů

$$w = \frac{c_0}{2 \cdot f_{\min}} \quad [mm] \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu,  $f_{\min}$  horní mezní frekvence činnosti difuzoru a  $w$  šířka jednotlivé šachty. Quadratic residue posloupnost  $s_n$  je dána následujícím vztahem

$$s_n = n^2 \cdot \text{mod } N \quad (2)$$

kde  $N$  je řád posloupnosti. Např. pro jednu periodu QRD difuzoru s  $N = 7$  je posloupnost  $s_n = \{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$ . Maximální hloubka šachty je dána vztahem

$$d_n = \frac{s_n \cdot c_0}{2 \cdot N \cdot f_0} \quad [mm] \quad (3)$$

$f_0$  je dolní mezní frekvence pro kterou je difuzor navržen, kterou je možné úpravou (3) popsat vztahem

$$f_0 = \frac{s_{\max}}{N} \cdot \frac{c_0}{2 \cdot d_{\max}} \quad [Hz] \quad (4)$$

kde  $s_{\max}$  je maximální hodnota z posloupnosti  $s_n$ . Pro  $N = 7$  je hodnota poměru  $s_{\max}/N = 4/7$ . Správná funkce QRD difuzoru je zajištěna pokud je splněná nerovnost

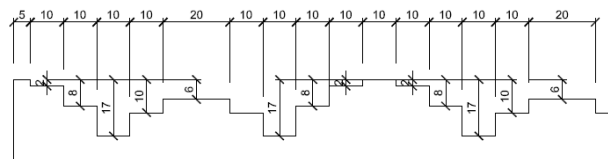
$$N \gg \frac{c_0}{2 \cdot w \cdot f_0} \quad [-] \quad (5)$$

Boční stěny sálu jsou akusticky upraveny MLS difuzory, které se stanoví na základě posloupnosti MLS řádu  $N = 5$  délky  $L = 31$ . Hloubka a šířka prvků se stanoví za použití vztahů (1) a (3), kde hodnota  $s_n = 1$ , protože MLS posloupnost je tvořena hodnotami 0 a 1. Řez navrženou strukturou ukazuje následující vyobrazení.



**Figure 9.** Řez MLS strukturou bočních stěn

Odrážně-rozptylné prvky umístěné na poprsnicích bočních balkónů jsou navrženy tak, aby splňovaly dvě funkce. Mají zajistit difuzní rozptyl frekvencí od 8kHz do 17kHz. Pro řád posloupnosti  $N = 11$  je posloupnost  $s_n = \{0, 1, 4, 9, 5, 3, 3, 5, 9, 4, 1\}$ . Pro frekvence pod difuzním rozptylem mají zajistit směrování zvukových paprsků rovnoměrně do poslechovcích ploch v hledišti. To je zajištěno navrženým náklonem  $5^\circ$ . Pohled na řez použitou strukturou je na následujícím obrázku.



**Figure 10.** Řez strukturou PQRD instalovanou na poprsnicích bočních balkónů s náklonem  $5^\circ$

Všechny použité prvky jsou vyrobeny ze dřeva a opatřeny z důvodu splnění požárních předpisů (šíření plamene po povrchu) speciálním nátěrem.

### 2.4. Pódium

Pro dosažení optimálních hodnot všech jednotlivých kritérií akustické kvality neexistuje obecný návod. Z parametrů vysoce hodnocených sálů však lze vyvodit následující závěry.

- Pro oblast pódia jsou nejdůležitějšími parametry slyšitelnost vlastního nástroje, slyšitelnost ostatních nástrojových skupin, barva zvuku a vjem prostoru. Dirigent a sólisté mají proti orchestru některé další požadavky..
- Vzájemné slyšitelnosti a souhře výrazně napomáhají rozměry pódia a vysoce difusní struktura stropu. Obecně hůře jsou hodnoceny hladké obvodové stěny („glare“ – zářít, civět).

Pro oblast pódia jednotlivým subjektivním atributům odpovídají objektivní kritéria *SUPPORT*, *EDT*

a *EDTF*, definovaná následujícím způsobem (Gade, 1989)

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{20ms} p^2(t) dt} [dB] \quad (6)$$

kde  $p(t)$  je impulsová odezva sálu

$$ST2 = 10 \log \frac{\int_{10ms}^{200ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{20ms} p^2(t) dt} [dB] \quad (7)$$

či

$$ST_{late} = 10 \log \frac{\int_{10ms}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{20ms} p^2(t) dt} [dB] \quad (8)$$

Akustická podpora pódia *ST* je definována jako poměr energií v intervalech v milisekundách {20,100}, {20,200} a {20,∞} k počáteční energii v intervalu {0,10}, vyjádřená v logaritmické míře. Je určována z kvadrátu časového průběhu akustického tlaku impulsové odezvy  $p^2(t)$  monaurální impulsové odezvy  $p(t)$  (dále jen IO), snímané všesměrovým mikrofonem ve vzdálenosti 1 m od všesměrového zdroje.

**Support** *ST1* odpovídá subjektivnímu pocitu, jak hudebník vnímá svůj nástroj vůči ostatním, soudy sólistů lépe korelují s kritériem *ST2*. *ST<sub>late</sub>* je jedním z faktorů subjektivních kategorií **reverberance** (dozvukovost) a **dynamika**. Druhým faktorem je počáteční doba dozvuku *EDT*, určovaná ze stejných impulsových odezev. Hodnoty kritérií jsou určovány jako průměr oktávových pásem 250, 500, 1000 a 2000 Hz.

Kritérium *EDTF* je dobrou mírou subjektivního atributu **timbre**. Tento atribut je vztažen k pocitu, jak prostor působí na barvu nástroje, vyváženost jednotlivých nástrojových sekcí i jednotlivých nástrojů v celku. *EDTF* je definováno vztahem

$$EDTF = \frac{EDT_{250} + EDT_{500}}{EDT_{1000} + EDT_{2000}}. \quad (9)$$

Důležitým subjektivním atributem pódia je **intimita** (Beranek, 1962). Hudebníci vesměs

preferují intimní prostředí, lépe se v něm cítí a jednotlivé nástrojové skupiny se lépe slyší. To má nesporný vliv na jejich výkon i souhru. Objektivním korelátem intimity jsou rozměry mušle. Ta by půdorysně měla být vepsána do obdélníku 19×13 m. Překročí-li některý rozměr tyto meze, potom by střední výška mušle měla být v rozmezí 9,5 ± 1,5 m.

## 2.5. Navázání pódia na sál, orchestrální mušle

Pódium, často vybavené koncertní mušlí (i demontovatelnou), musí svým tvarem napomáhat vyzařování zvukové energie do sálu. Směrem k hledišti musí směřovat dostatečný počet počátečních odrazů. Toho lze dosáhnout tvarovým řešením – sklonem stropu a lichoběžníkovým půdorysem.

Při malém rozevření dochází nejen k nedostatečnému vytékání energie do sálu, ale i k mnohonásobným odrazům až stojatému vlnění mezi páry téměř rovnoběžných stěn. To je na pódium mnohými hudebníky vnímáno jako nerovnoměrný výkon vlastního nástroje a nejasný, nečitelný poslech nástrojů spoluhráčů.

U rovnoběžných bočních stěn či vodorovném stropu dochází k stojatému vlnění prakticky vždy. Stojaté vlnění je hudebníky obecně hodnoceno velmi negativně.

Rozevírání mušle lze podle Shin-ichirochana charakterizovat indexem náklonu *K*, definovaného jako

$$K = \frac{\sqrt{\frac{W \cdot H}{\pi}} - \sqrt{\frac{w \cdot h}{\pi}}}{D} \quad (10)$$

kde *W* a *H* jsou šířka a výška proscénia, *w* a *h* šířka a výška zadní stěny a *D* hloubka mušle. Syntézou odpovědí hudebníků Boston Symphony Orchestra, Das Gewandhaus Orchestra Leipzig a New Japan Philharmonic při turné po 30 japonských sálech našel autor tyto jednoznačné závěry

- 1) Pódium nesmí být malé – pro dobrý přenos symfonického orchestru musí mít alespoň 1000 m<sup>3</sup>.
- 2) Index náklonu musí být  $K \leq 0.3$ .
- 3) Mají-li vnitřní ohraničující stěny mušle výrazně rozptylové vlastnosti není výsledný dojem hudebníků tolik závislý na indexu náklonu *K*.

Kritéria pro hodnocení vazby pódium – sál vychází z úvahy, že ke „smíchání“ (**blend**) zvuku jednotlivých nástrojových skupin a tvorbě celého hudebního výrazu má docházet na pódium dříve, než v sále (Jordan, 1982). Z tohoto důvodu musí být průměrné hodnoty počáteční doby dozvuku vyšší v auditoriu než na pódium a naopak na pódium musí být vyšší časová jasnost. Poměry lze kvantifikovat pomocí inverzních indexů  $II$ , definovaných např. jako

$$II_{EDT} = \frac{Avg(EDT)_{audience\ area}}{Avg(EDT)_{stage}} \quad (11)$$

či

$$II_{C80} = \frac{Avg(C80)_{stage}}{Avg(C80)_{audience\ area}}. \quad (12)$$

Mají-li být akustické podmínky hodnoceny jako dobré musí inverzní indexy splňovat podmínku  $II \geq 1$ , přičemž optimální hodnoty pro auditorium jsou  $EDT$  v rozmezí 2 – 2,3 s a  $C_{80}$  v rozmezích  $0 \pm 1,6$  až 2 dB.

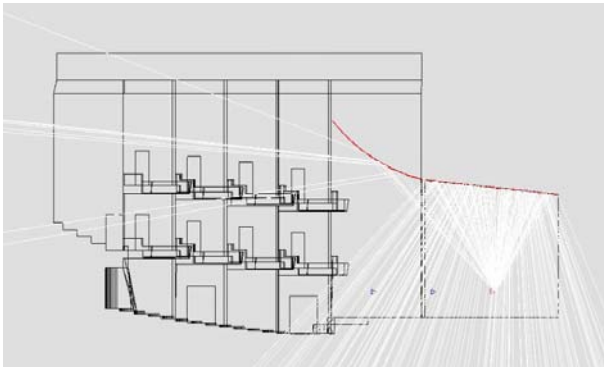


Figure 11. Zobrazení paprskové metody

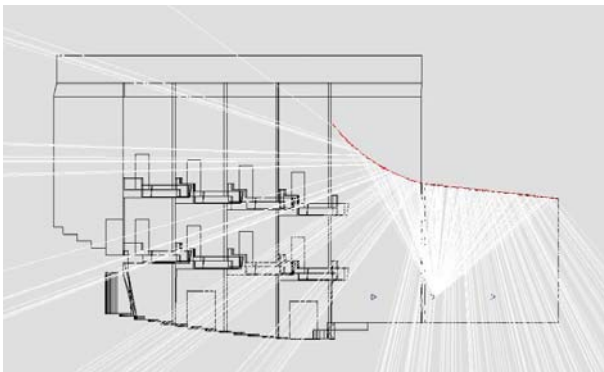


Figure 12. Zobrazení paprskové metody

Na následujících obr. 7 až 9 je metoda Ray-Tracingu použita při návrhu orchestrální mušle v prostoru sálu Filharmonie Hradec Králové. Pomocí těchto simulací bylo určeno množství zvukové energie v mušli ku zvukové energii

v poslechové ploše hlediště (zaručení takové hlasitosti v mušli aby hudebníci hráli ve svých obvyklých poslechových podmínkách a v hledišti byly hodnoty  $G$  – Strength v optimálních hodnotách). Součástí těchto simulací byl i návrh tvaru odrazné plochy nad prostorem jeviště. Tato plocha je zhotovena ze dřeva s tvarováním, které je zřejmě z dosažených výsledků. Celé provedení konstrukce je dostatečně tuhé, aby nemohlo dojít k jejímu rozkmitání.

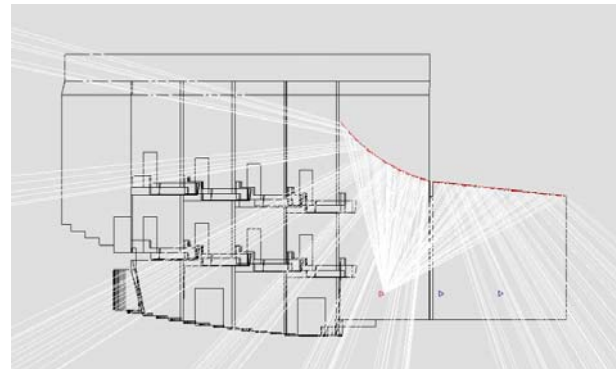


Figure 13. Zobrazení paprskové metody

Akustické řešení zadní a bočních stěn mušle vychází z difusní struktury stanovené na základě generované posloupnosti MLS pro řád  $N = 5$  délky  $L = 31$ , kde hloubka a šířka definovaného bloku, který je v posloupnosti MLS reprezentován „1“ je stanovena výpočtem dle vztahu (1) a (3).

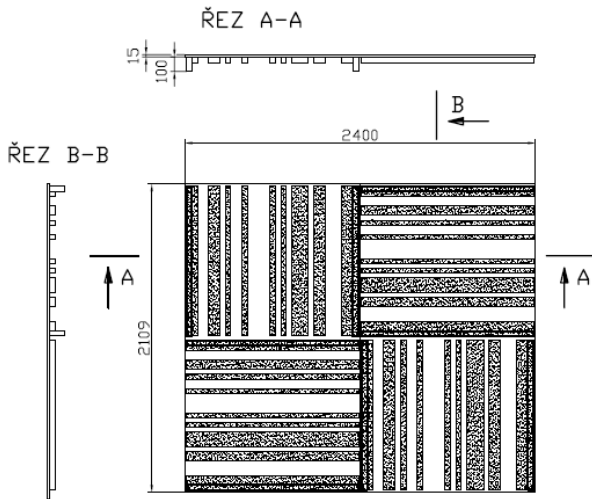
Pohled na řešení struktur zadní stěny a boků orchestrální mušle.



Figure 14. Řez boční strukturou orchestrální mušle

Na strop orchestrální mušle byly kladeny největší požadavky a to nejen z hlediska akustických vlastností, ale i technického provedení (mobilita, zajištění požadovaného náklonu, apod.)

V [1] Beranek uvádí, že by plošná hmotnost stropu mušle měla být minimálně  $17 \text{ kg/m}^2$  (zhotovený strop mušle má hmotnost  $26 \text{ kg/m}^2$ ) a to z důvodu zamezení případných vibrací vzniklých působením zvuku orchestru. Při návrhu rozptylných struktur byly použita kombinace MLS struktur zasazených do kazet, které byly vždy oproti sobě otočeny o  $90^\circ$ . Konečné upořádání je zřejmě z následujícího vyobrazení.



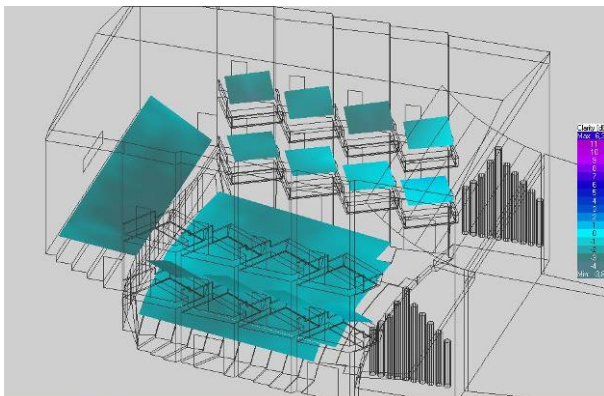
**Figure 15.** Pohled na řešení difusní struktury stropu orchestrální mušle

Takto vytvořená struktura by měla vykazovat potřebnou difuzitu a tím zajistit požadované poslechové podmínky pro orchestr.

Celá koncertní mušle je navržena a postavena jako mobilní, tzn. že strop se skládá ze tří částí, které jsou zavěšeny na jevištních tazích. Zadní stěna je rozdělena do jednotlivých ploch, kde každou je možno kolem své osy otočit a použít tak zadní černou rovnou plochu. Boční stěny jsou sestaveny z jednotlivých dílů, kde každý se otáčí kolem své osy a je možné s nimi v definovaných trasách tvořenými zapuštěnými vodícími kolejnicemi pohybovat.

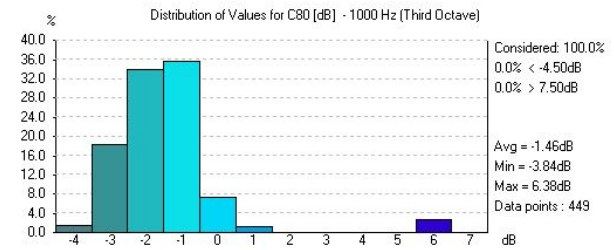
## 2.6. Výsledky získané akustickou simulací

Výpočty akustických parametrů byly prováděny jak v rozložení po celé poslechové ploše obr. 16 a 18 tak i v poslechových bodech v kterých bylo prováděno akustické měření. U všech sledovaných parametrů je pro přehlednost uvedena distribuce hodnot odpovídající plošnému rozložení viz. obr. 17 a 19.



**Figure 16.** Rozložení Clarity  $C_{80}$

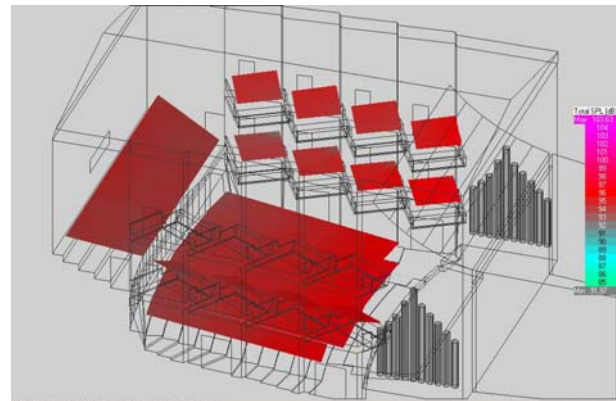
Hodnoty parametru  $C_{80}$  jsou v rozsahu hodnot  $-1 \pm 2$ , kdy „nejhorší místa jsou na prvních balkónech.



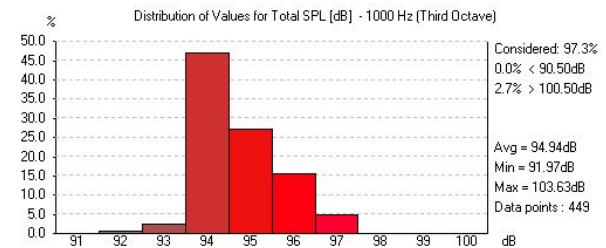
(c) EASE 4.1 / Hall VRAS1 / 22.4.2005 14:47:55 / Michael Antek Antek

**Figure 17.** Distribution of Value for  $C_{80}$

Rozložení simulované hladiny akustického tlaku Total SPL je v rozsahu hodnot  $95 \pm 2$  což ukazuje na rovnoměrnou hlasitost v poslechových plochách sálu.



**Figure 18.** Rozložení hladin akustického tlaku



(c) EASE 4.1 / Hall VRAS1 / 22.4.2005 14:48:18 / Michael Antek Antek

**Figure 19.** Distribution of Value Total SPL

### 3. Výstavba sálu

Po navržených akustických úpravách, zhotovení projektové a výrobní dokumentace bylo přistoupeno k vlastní realizaci. Na následujících obr. jsou pohledy na provádění vlastní montáže a detaily instalovaných akustických prvků.



**Figure 20.** Montáž QRD difusorů na zadní stěně

Při montáži všech prvků byl kladen velký důraz na uchycení k železobetonovým stěnám sálu. Prvky byly přišroubovány a případné nerovnosti byly vypěněny tak aby bylo zajištěno tuhé spojení se stěnou. Tímto opatřením má být zabráněno možnému kmitání či vibrací.



**Figure 21.** Pohled na boční stěnu se strukturou MLS

Veškeré akustické prvky instalované v prostoru sálu jsou provedeny ve dřevě s povrchovou úpravou vyhovující požadavku na index šíření plamenem po povrchu do 55 mm/min.



**Figure 22.** Pohled na rozptylné struktury na bočních balkónech

Sedadla instalované v sále FHK mají polstrování jak sedáku tak opěradla. Zadní stěna opěradla a spodní strana sedáku jsou tvořeny dřevěnou deskou s povrchovou úpravou nátěrem.



**Figure 23.** Pohled na akustické řešení interiéru, detail na umístění odrazně-rozptylných struktur na bočních balkónech

### 4. Akustická měření

Závěrečná akustická měření byla provedena po kompletním zhotovení interiéru sálu. Postup měření byl proveden dle EN ISO 3382, s rozmístěním pozic vysílače – všesměrový zdroj a přijímače – měřicí mikrofon s kulovou charakteristikou pro difuzní pole dle metodiky uvedené v [7]. Měřicí mikrofon byl umístěn ve výšce 1,2 m tj. průměrná výška středu uší sedícího posluchače, všesměrový zdroj byl umístěn ve výšce 1,5 m. Vyobrazení měřících pozic je na následujícím vyobrazení.

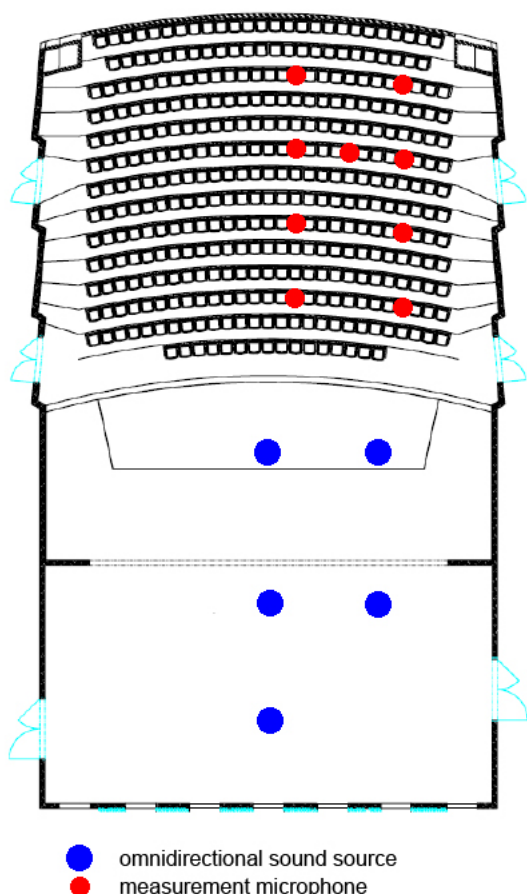


Figure 24. Měřicí pozice v sále FHK

#### 4.1. Výsledky měření

Všechny změřené impulsové odezvy mají hodnotu parametru *INR* – Impulse response to noise ratio na všech třetinooktávových frekvencích větší jak 50 dB, hodnota parametru *cc* - correlation coefficient vždy vyhovuje požadavkům ISO 3382. Na následujícím obr. 25 je zobrazen průběh doby dozvuku *T30* v třetinooktávových pásmech.

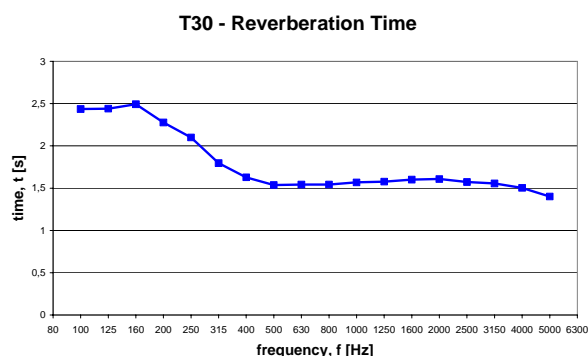


Figure 25. Průběh změřené doby dozvuku

Všechny změřené parametry – *EDT*, *T10*, *T20*, *T30*, *Ts*, *C80*, *G* a *IACC* i s příslušnými jednočíselnými hodnotami jsou uvedeny jak tabelárně tak v příslušných grafech přílohy.

## 5. Zhodnocení

Uvedený článek se zabývá kompletním popisem návrhu koncertního sálu FHK. Na základě výsledků provedeného měření a v současné době prováděných subjektivních testů lze konstatovat, že akustika sálu dosahuje velice dobrých hodnot. Na stupnici subjektivního hodnocení by měla odpovídat kategorii B+. Výsledné hodnocení by mohlo být o stupeň lepší a to v případě většího objemu sálu.

## Poděkování

Tato práce byla současně řešena s projektem č.: 1M6138498401, který je podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky. Dále bych chtěl na tomto místě poděkovat Ing. Michalu Antkovi za jeho všestrannou odbornou pomoc při realizaci akustického návrhu úprav FHK a v neposlední řadě i řediteli FHK RNDr. Václavu Dernerovi za jeho vstřícný a ochotný přístup při návrhu, realizaci a akustických měřeních.

## Literatura

- [1] Leo L. Beranek: Concert and Opera Halls – How They Sound. Acoustical Society of America, 1996. ISBN 1-56396-530-5.
- [2] Takayuki Hidaka, Leo L. Beranek: Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas, J. Acoust. Soc. Am. 107 (1), January 2000. pp. 368 - 383.
- [3] Takayuki Hidaka: On the objective parameter of texture. Forum Acusticum & Internoise 2002, Sevilla.
- [4] Martin Vondrasek, M. Antek ml.: Comparison of objective criteria of concert halls quality. Akustické listy, Česká akustická společnost, Volume 11, No. 3, September 2005. pp. 9-18.
- [5] Noriko Nishihara, Takayuki Hidaka, Leo L. Beranek: Mechanism of sound absorption by seated audience in halls, J. Acoust. Soc. Am. 110 (5), November 2001. pp. 2398 - 2411.
- [6] Takayuki Hidaka, Noriko Nishihara, Leo L. Beranek: Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a simple method for simulating the occupied state, J. Acoust. Soc. Am. 109 (3), March 2001. pp. 1028 - 1042.
- [7] Takayuki Hidaka, Leo L. Beranek, Sadahiro Masuda, Noriko Nishihara, Toshiyuki Okano: Acoustical design of the Tokyo Opera City (TOC) concert hall, (Japan), J. Acoust. Soc. Am. 107 (1), January 2000. pp. 340 - 354.
- [8] T. J. Cox, P. D'Antonio: Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application, Spon Press, 2004.



## Přílohy

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
EDT [s]	2,49	2,12	1,56	1,55	1,58	1,47

Average 500 Hz a 1000 Hz	
EDT <sub>mid</sub> [s]	1,55

(Third Octave)																		
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
EDT [s]	2,24	2,56	2,59	2,27	2,17	1,72	1,61	1,60	1,48	1,49	1,56	1,61	1,60	1,59	1,55	1,58	1,48	1,35

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T10 [s]	2,42	2,12	1,62	1,57	1,59	1,49

(Third Octave)																		
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T10 [s]	2,41	2,43	2,47	2,26	2,12	1,82	1,72	1,61	1,58	1,56	1,62	1,57	1,61	1,61	1,59	1,54	1,50	1,40

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T20 [s]	2,44	2,13	1,59	1,57	1,58	1,49

(Third Octave)																		
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T20 [s]	2,40	2,40	2,48	2,26	2,07	1,78	1,66	1,56	1,55	1,55	1,59	1,58	1,61	1,60	1,57	1,55	1,50	1,39

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
T30 [s]	2,46	2,15	1,59	1,57	1,59	1,49

Average 500 Hz a 1000 Hz	
T30 <sub>mid</sub> [s]	1,58

(Third Octave)																		
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T30 [s]	2,44	2,44	2,49	2,28	2,10	1,80	1,63	1,54	1,54	1,54	1,57	1,58	1,60	1,61	1,57	1,56	1,50	1,40

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Ts [s]	192	159	111	102	110	102

(Third Octave)																		
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Ts [s]	182	215	218	195	170	129	120	119	106	100	102	108	111	113	110	112	104	94

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
C80 [s]	-3,0	-1,9	0,5	1,3	0,6	1,0

(Third Octave)																		
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
C80 [s]	-0,9	-3,2	-4,1	-3,4	-2,5	0,2	0,3	0,0	1,2	1,7	1,4	0,8	0,7	0,4	0,6	0,4	0,9	1,5

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
G [dB]	9,6	8,4	6,9	7,2	7,0	6,9

Average 500 Hz a 1000 Hz	
G <sub>mid</sub> [dB]	7,0

(Full Octave)						
f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
IACC <sub>0,80</sub> [-]	0,94	0,79	0,37	0,29	0,32	0,31

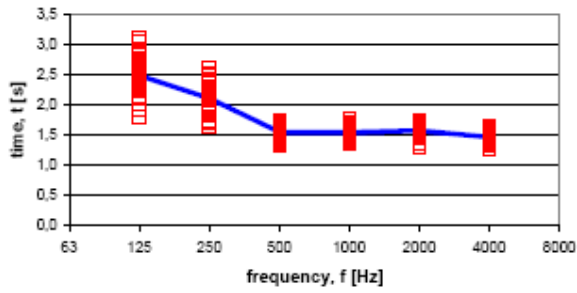
Average 500 Hz až 2000 Hz	
IACC <sub>E3</sub> [-]	0,33

ITDG [ms]	17
-----------	----

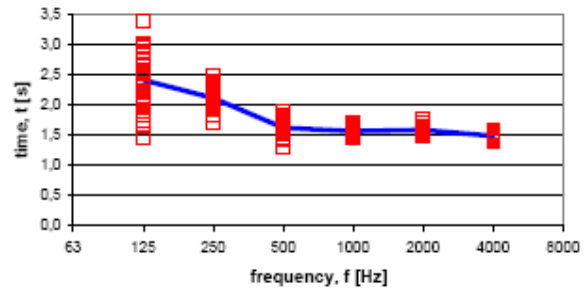
SDI [-]	0,7
---------	-----

BR [-]	1,44
--------	------

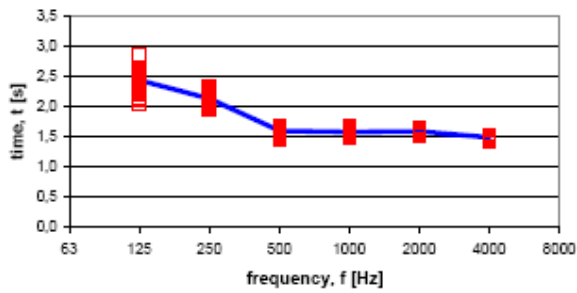
EDT - Early Decay Time



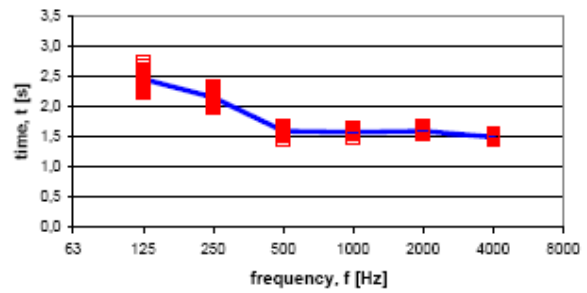
T10 - Reverberation Time



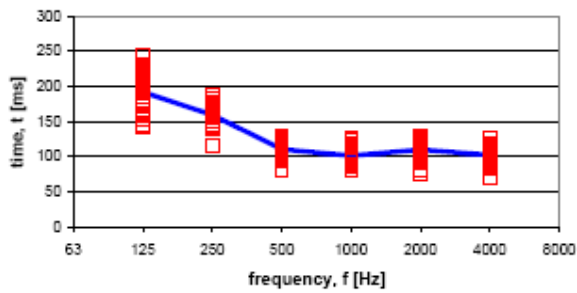
T20 - Reverberation Time



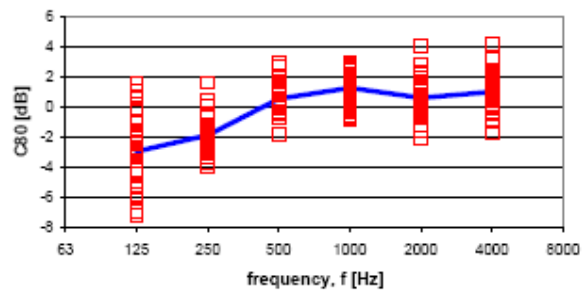
T30 - Reverberation Time



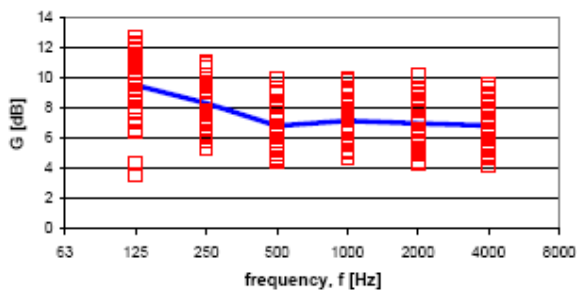
Ts - Centre Time



C80 - Clarity



G - Sound Strength



IACC 0,80 - Interaural Cross Correlation

