

## OBSAH

1. ZADÁNÍ .....	3
2. SPECIFIKACE SÁLU .....	3
3. POŽADOVANÉ HODNOTY AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ .....	4
3.1 DOBA DOZVUKU .....	4
3.2 ROZLOŽENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU .....	4
3.3 SROZUMITELNOST .....	4
3.4 ENERGETICKÁ KRITÉRIA .....	5
4. POZNÁMKY K AKUSTICKÝM ÚPRAVÁM .....	6
5. VÝSLEDNÉ HODNOTY AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ .....	7
5.1 DOBA DOZVUKU - BEZ OBKLADŮ STĚN .....	7
5.2 DOBA DOZVUKU PO AKUSTICKÝCH ÚPRAVÁCH .....	8
5.3 HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU .....	9
5.4 SROZUMITELNOST ŘEČI .....	10
5.5 JASNOST HUDEBNÍHO SIGNÁLU .....	11
5.6 ŠÍŘENÍ ZVUKU, REFLEKTOGRAMY .....	12
6. ZÁVĚR .....	18
7. POUŽITÉ PODKLADY A LITERATURA .....	19

## 1. ZADÁNÍ

Studie byla vypracována pro společnost Project Building s.r.o., Erbenova 8, Brno.

Obsahuje doporučení, poznámky a výpočty k řešení prostorové akustiky koncertního sálu brněnské konzervatoře.

## 2. SPECIFIKACE SÁLU

Ve studii je uvažováno s následující specifikací sálu:

Koncertní sál má v základní tvar kvádru s rozměry cca 20 × 14 × 5 m.

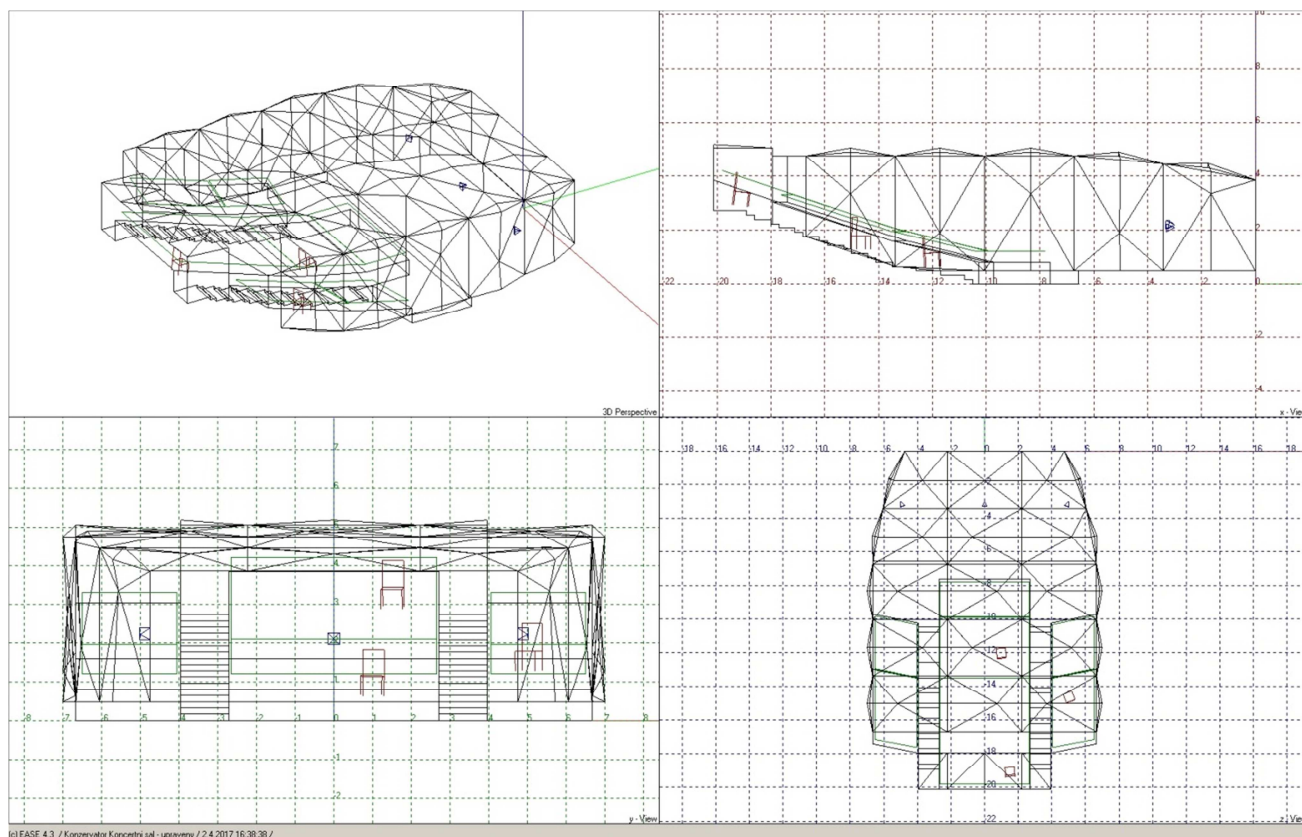
Jeviště je vyvýšeno montovanou konstrukcí. Plocha hlediště se zvedá k zadním stěnám sálu (elevace hlediště).

Stěny a strop jsou v návrhu obloženy konstrukcí, jejíž pohledovou vrstvou jsou dýhované panely překližky. Obklad je navržen tak, aby co možná nejvíce tvaroval prostor jeviště a narušoval rovnoběžnost a rovinnost bočních stěn sálu a stropu.

Sedadla pro posluchače budou poločalouněná. Počet míst v hledišti je 230, z toho 20 židlí volně stojících.

Objem sálu je cca 900 m<sup>3</sup>.

Obr. 1: Matematický model koncertního sálu, ortogonální zobrazení.



### Poznámka:

V obrázcích jsou patrné zeleně ohraničené poslechové plochy, které budou použity ve výpočtech. Leží ve výšce 120 cm nad podlahou auditoria, tedy přibližně ve výšce uší sedících posluchačů. Patrné jsou také značky míst v poslechových plochách, která byla využita v některých výpočtech a značky umístění zkušebních reproduktorů.

### 3. POŽADOVANÉ HODNOTY AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ

Koncertní sály jsou, spolu se záznamovými (tzv. nahrávacími), rozhlasovými a televizními studii, nejnáročnějšími prostory z hlediska řešení prostorové akustiky. Důvod je zjevný: optimální šíření zvuku a výsledná kvalita poslechu, resp. kvalita záznamu, jsou zde na prvním místě.

Akusticky kvalitní sály pro poslech vážné hudby<sup>1</sup> se vyznačují tím, že posluchač v něm získává pocit, že je hudbou obestřen, aniž by byl výsledný zvuk jaksi „nekonkrétní“ a „rozmazaný“. Návrh takového sálu začíná zvolením vhodného objemu a základního tvaru. Následně jsou řešeny interiérové dispoziční detaily, použité materiály, uspořádání jeviště, apod.

V první řadě je nutné, aby ke každému posluchači přicházel přímý zvuk z jeviště. To je možné zajistit přímou viditelností z každého místa v hledišti na všechny hudebníky na jevišti. Optimální návrh prostoru pak způsobí, že odrazy zvuku přicházejí k posluchači ve správných intervalech, energie dopadá do místa poslechu z různých směrů, dozvuk je plynulý, a sál netrpí akustickými chybami, jako jsou záněhy, stojatá vlnění, třepotavá ozvěna, apod.

#### 3.1 DOBA DOZVUKU

Doba dozvuku  $T_d$  [s]<sup>2</sup> je hlavním parametrem prostorové akustiky. Je to čas, po který zvuk v prostoru doznívá poté, co byl vypnut zdroj zvuku.

Ve stadiu projektování je pro každý uzavřený prostor určena optimální doba dozvuku. Ta je závislá nejen na vnitřním objemu prostoru, ale i na způsobu využití daného prostoru. Například kinosál vyžaduje dozvuk velmi krátký, sál stejného objemu, ve kterém převažují koncerty komorní hudby, vyžaduje dozvuk delší. Proto, principiálně, nemůže existovat jakýsi „akusticky univerzální sál“, který by vyhověl všem typům pořadů.

**Optimální doba dozvuku ( $T_d$ ) pro koncertní sál konzervatoře, kde bude prezentována tzv. vážná neboli umělecká hudba bez elektroakustického přizvučování, je  $T_d = 1,15$  s.**

Vycházíme z ČSN 73 0527, kde je tato doba dozvuku uvedena jako optimální pro „operu, hudební divadlo“, vztaheno k danému objemu (900 m<sup>3</sup>).

#### 3.2 ROZLOŽENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU

Kvalitní poslech vyžaduje přiměřeně hlasité a vyrovnané pokrytí poslechových ploch zvukem šířeným z prostoru jeviště. Obecně hrozí nadměrné hladiny akustického tlaku zejména při umístění reprosoustav do blízkosti posluchačů (první řady diváků), nedostatečné mohou být hladiny zvuku v zadních částech velkých přetlumených, nebo členitých sálů. **Pokud se týká vyrovnanosti akustických hladin, nemají rozdíly v poslechové ploše vybočovat z tolerance  $\Delta L = \pm 6$  dB pro žádný z uvažovaných kmitočtů.**

#### 3.3 SROZUMITELNOST

Pro výpočty srozumitelnosti bude použita metoda „ztráty srozumitelnosti souhlásek“ -  $AL_{Cons}$ <sup>3</sup>. Výsledné hodnoty jsou udávány v procentech chybně přijatých souhlásek ze všech souhlásek vyřčených. Vztah mezi číselnými hodnotami  $AL_{Cons}$  a slovním vyjádřením kvality srozumitelnosti je uveden v následující tabulce. **Cílem je dosáhnout v poslechových plochách hodnot nižších než  $AL_{Cons} = 10$  %.**

Tab. 1: Stupnice srozumitelnosti  $AL_{Cons}$ .

< 3 %	výborná
3 – 7 %	velmi dobrá
7 – 10 %	dobrá
10 – 15 %	dostatečná (zhoršená)
> 15 %	špatná

<sup>1</sup> v ČR jsou to zejména pražské koncertní sály: Dvořákova síň Rudolfiny nebo Smetanova síň Obecního domu

<sup>2</sup> V angličtině značena „RT“ (Reverberation Time)

<sup>3</sup> Articulation Loss of Consonants

### 3.4 ENERGETICKÁ KRITÉRIA

V uzavřeném prostoru dochází k mnohočetným odrazům zvukové energie. K posluchači dorazí jako první přímý zvuk od zdroje. Poté, s odstupem v řádu jednotek až desítek milisekund, začnou dopadat první odrazy a následující. S časem hustota odrazů roste natolik, že odrazy splývají v difúzní pole.

Odrazy přicházející za přímým zvukem s časovým odstupem menším než  $\Delta T = 30 \text{ ms}$  vnímá naše ucho neodděleně od přímého zvuku, zvyšují pouze hlasitost a považujeme je za užitečné.

Při časovém odstupu větším dochází ke směřování. Od hranice cca  $\Delta T = 50 \text{ ms}$  působí již toto směřování rušivě a u mluveného slova se snižuje srozumitelnost.

Následuje-li za přímým zvukem dostatečně intenzivní odraz s odstupem větším než  $\Delta T = 100 \text{ ms}$ , vnímá ho již naše ucho odděleně, dochází k ozvěnám.

Tyto poznatky jsou v praktických návrzích využívány k návrhu geometrie prostoru. Je totiž důležité, aby akusticky tvrdé (odrazivé) plochy byly umístěny, orientovány a tvarovány tak, že umožní optimální směřování energie prvních odrazů zvuku do vhodného místa poslechové plochy.

K energetickým kritériím patří metoda zjišťování jasnosti hudebního signálu ( $\text{Clarity}_{80}$ ). Požadovaná hodnota a je uvedena u příslušného výpočtu níže.



#### 4. POZNÁMKY K AKUSTICKÝM ÚPRAVÁM

Koncertní sál konzervatoře má hlavní dispozice dané. Jde o prostor v historické zástavbě a není možné jej zásadně upravovat. Z toho plynou nedostatky, kterými jsou relativně nízký strop sálu a s tím související malý objem sálu.

Objem sálu je na spodní hranici vzhledem k použitelnosti pro daný účel. Elevace hlediště zajistí dobrou viditelnost na jeviště a tedy i příchod přímého zvuku k posluchači. Elevace však přece jen objem sálu dále zmenšuje.

Obecně se dá říci, že čím menší prostor je, tím narůstají problémy s kvalitou zvuku v pásmu nízkých kmitočtů.<sup>4</sup> Nedostatky spojené s přenosem basů v menších prostorech jsou označovány jako „nízká difuzita“, či „stojatá vlnění“ a způsobují nerovnoměrné pokrytí poslechové plochy (právě v pásmu nízkých kmitočtů). V některých místech hlediště se pak jakoby basů nedostává, jinde nepříjemně „duní“. Vhodným návrhem zvukoabsorpčních obkladů do prostoru je možné zmíněné problémy potlačit (u velmi malých prostor jde však o problém prakticky neřešitelný). Problémy s difuzitou v pásmu nízkých kmitočtů mizí až u prostor o objemech 2 000 m<sup>3</sup> a větších.

Plochy stěn, které jsou vzájemně rovnoběžné a navíc jsou ploché, rovné, bez interiérových detailů, neprospívají něčemu, co je v akustice označováno jako vysoká difuzita zvuku. Vysoká difuzita je parametr veskrze pozitivní a žádaný. V sále s vysokou difuzitou je pokrytí poslechové plochy rovnoměrné - dá se říci, že ke každému posluchači se v takovém případě dostává zvuk ve stejné kvalitě.

Na stěny sálu byly proto projektantem navrženy obklady stěn a stropu, které stěny vytvarují a co možná nejvíce difuzitu podpoří. Materiálem obkladu je dýhovaná překližka.

V prostoru jeviště jsou obkladem tvarovány stěny i strop. Důvodem je snaha, aby první odrazy zvukové energie byly směřovány z jeviště do hlediště.

V prostoru hlediště je obkladem narušována rovinnost stěn, která, jak řečeno výše, akustice neprospívá.

Tvarové a materiálové řešení obkladu pokládám, z akustického pohledu, za zdařilé.

**Do vzduchové mezery mezi dřevěným obkladem a pevnou stavební konstrukcí doporučuji při montáži vkládat akusticky pohltivý materiál - panely z minerální vaty, tloušťky min. 50 mm (např.: Rockwool, Isover, apod.). Akustickou vložku doporučuji rozmísťovat rovnoměrně, ve výměře odpovídající cca 50 - 60 % celkové plochy dřevěného obkladu.**

**Na zadní stěnu sálu doporučuji osadit zvukoabsorpčním obkladem, který zamezí odrazům od rovné zadní stěny zpět na jeviště. Vhodné jsou např. stěnové panely firmy Ecophon,**

Obr. 2: Příklad vhodného zvukoabsorpčního materiálu (Isover, typ Aku).



<sup>4</sup> Problematika je dána fyzikálními principy. V menších prostorech je vlnová délka nízkých kmitočtů blízká rozměrům prostoru.

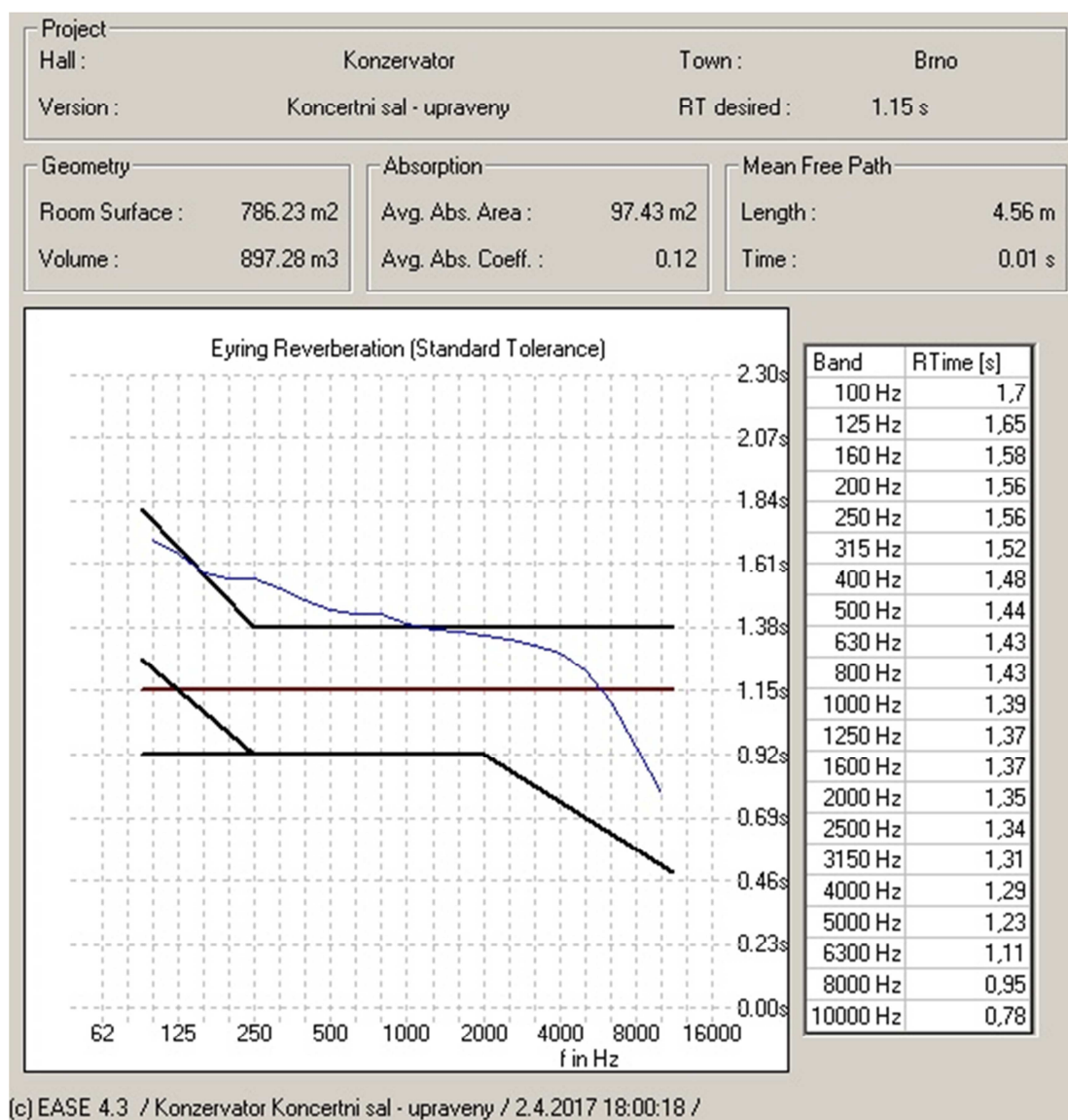
## 5. VÝSLEDNÉ HODNOTY AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ

### 5.1 DOBA DOZVUKU - BEZ OBKLADŮ STĚN

V případě, že by stěny a strop nebyly opatřeny dřevěným obkladem a stěny by byly tvořeny omítnutými zdmi, vychází hodnoty doby dozvuku v koncertním sále pro jednotlivá zvuková pásma takové, jaké jsou v následujícím grafu. Ve výpočtu je uvažováno s 80% zaplněním auditoria posluchači.

Doba dozvuku by se měla pohybovat v tolerančním poli okolo optimální doby dozvuku předepsanou v ČSN 73 0527.

Obr. 3: Doba dozvuku sálu bez akustických úprav, 80% zaplnění auditoria.



Doba dozvuku mírně překračuje doporučené hodnoty v pásmu nižších středních kmitočtů.

Dá se říci, že vzhledem k relativně malému objemu sálu vzhledem k předpokládanému počtu míst v hledišti není téměř nutné doplňovat do prostoru zvukoabsorpční materiály. Čalouněná sedadla, resp. diváci vlastně způsobí dostatečné tlumení prostoru.

Sál by však trpěl některými akustickými nedostatky (nízká difuzita zmíněná v bodě 4.) a proto byly stěny a strop opatřeny tvarovanými dřevěnými obklady.

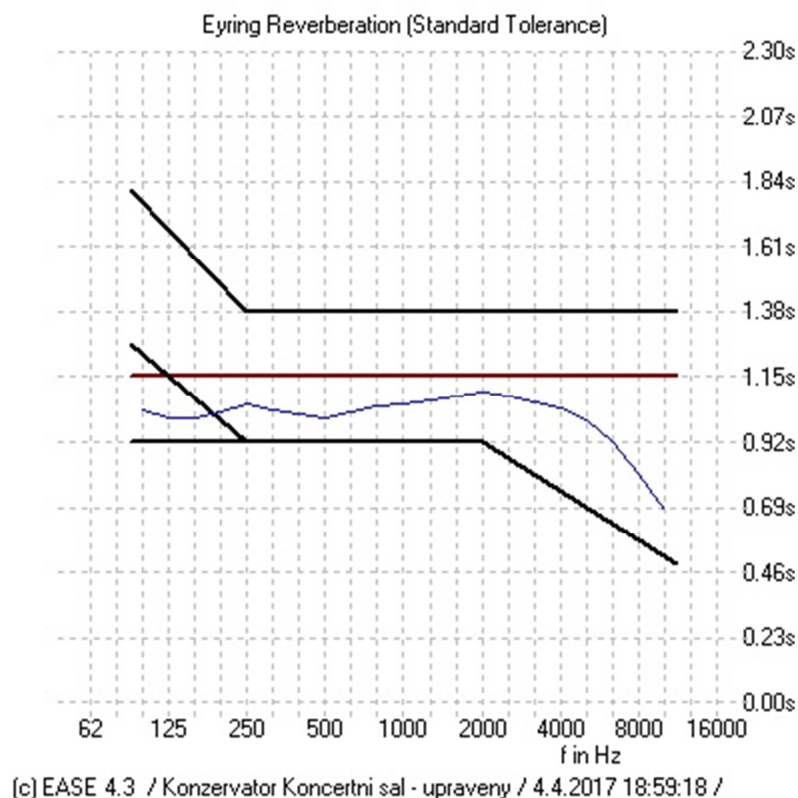
## 5.2 DOBA DOZVUKU PO AKUSTICKÝCH ÚPRAVÁCH

Tlumení stěn sálu zvukoabsorpčními obklady je, jak naznačeno v předchozích odstavcích, nežádoucí.

Pro obklad stěn a stropu byla zvolena konstrukce, která je výrazně zvukoodrazivá. Obklad bude mírně pohltivý v pásmu nízkých kmitočtů, přičemž výsledná pohltivost obkladové konstrukce v tomto pásmu bude závislá na tloušťce použitých desek (překližky) a vzduchové mezeře mezi deskou a pevnou stavební konstrukcí (zdí, stropem).

Při použití desek tloušťky 6 mm budou hodnoty doba dozvuku v sále přibližně takové, jaké jsou uvedeny v následujícím grafu.

Obr. 4: Doba dozvuku v akusticky upraveném koncertním sále, 80% zaplnění auditoria.



Z výpočtu plyne, že doba dozvuku za výše uvedených podmínek extrémně vyrovnaná a je kratší - klesá ke spodní hranici tolerančního pásma.

Uvažovaný dřevěný obklad bude mít akustickou pohltivost nízkou ale jeho výměra je značná a na celkové akustické absorpci prostoru se bude znatelně podílet. Hlavní smysl obkladu je mírném potlačení nízkých kmitočtů v sále a ve tvarování stěn sálu.

**Sedadla v hledišti jsou čalouněná, ovšem pouze lehce. Smyslem čalounění z hlediska akustického je to, aby se příliš nelišila pohltivost prostoru podle množství zaplnění posluchačů v sále.**

### 5.3 HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU

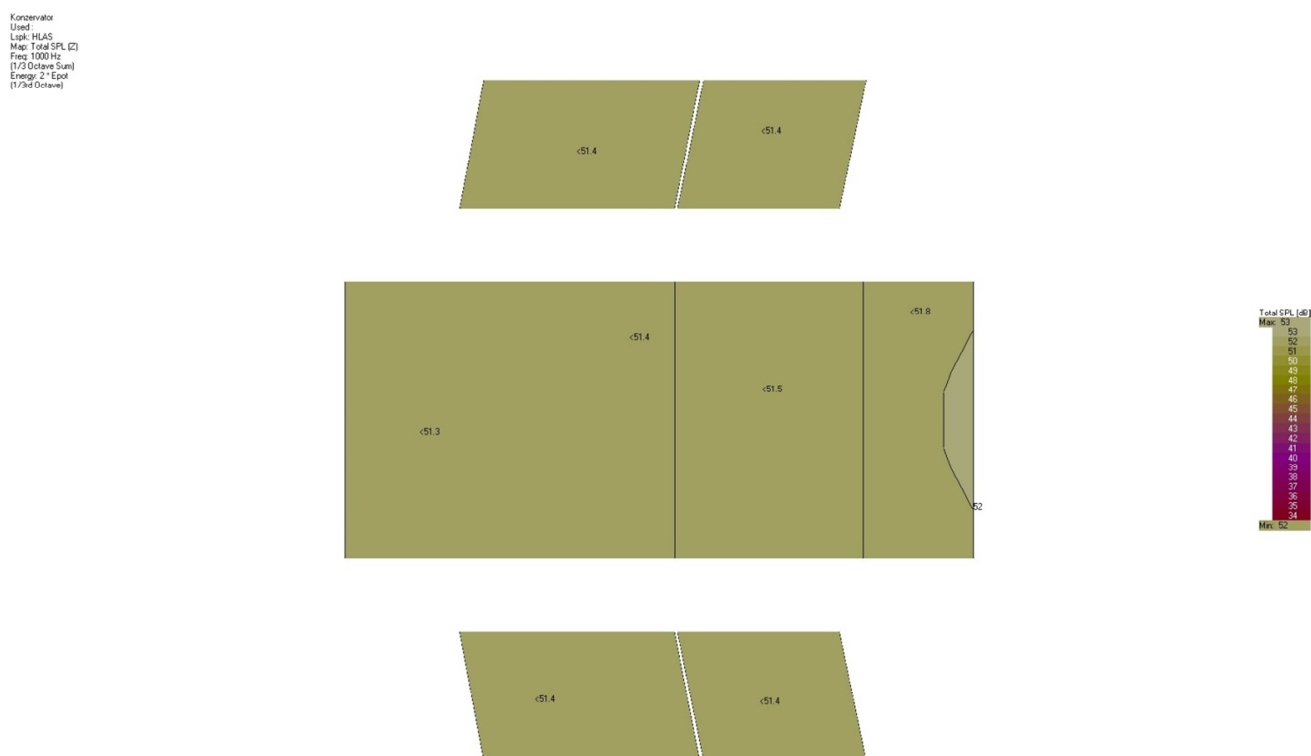
V následujícím výpočtu jsou v poslechových plochách zaznamenány hodnoty hladin akustického tlaku (pro kmitočet 1 kHz) generovaného zkušebním zdrojem simulujícím vlastnosti lidského hlasu („mužský hlas silný“).

Pokles hladiny akustického tlaku se vzrůstající vzdáleností od zdroje je  $\Delta L=0,7 \text{ dB}$ . Sál je relativně malý a relativně málo tlumený a úbytek akustického tlaku bude lidským uchem nerozpoznatelný.

*Poznámka:*

*Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v poslechových plochách sálů zmíněných v „Poznámce“ v bodě 2. této stati. Zkušební reproduktor je umístěn přibližně uprostřed jeviště.*

Obr. 5: Rozložení akustických hladin v poslechových plochách, zdroj – mužský hlas na jevišti.



(c) EASE 4.3 / Konzervator Koncertní sál - úpravy / 2.4.2017 17:28:59 /

Obecně je v uzavřených prostorech (vlivem odrazů zvuku) úbytek zvukové energie se vzrůstající vzdáleností malý. Extrémně nízký rozdíl v pokrytí v této simulaci je to dán také tím, že první řady posluchačů jsou poměrně daleko od zdroje zvuku, který je umístěn uprostřed jeviště. V případě, že zdroj by byl umístěn na hraně jeviště, dopadal by do předních řad zvuk o vyšší hladině a rozdíly v poslechové ploše by byly větší.

## 5.4 SROZUMITELNOST ŘEČI

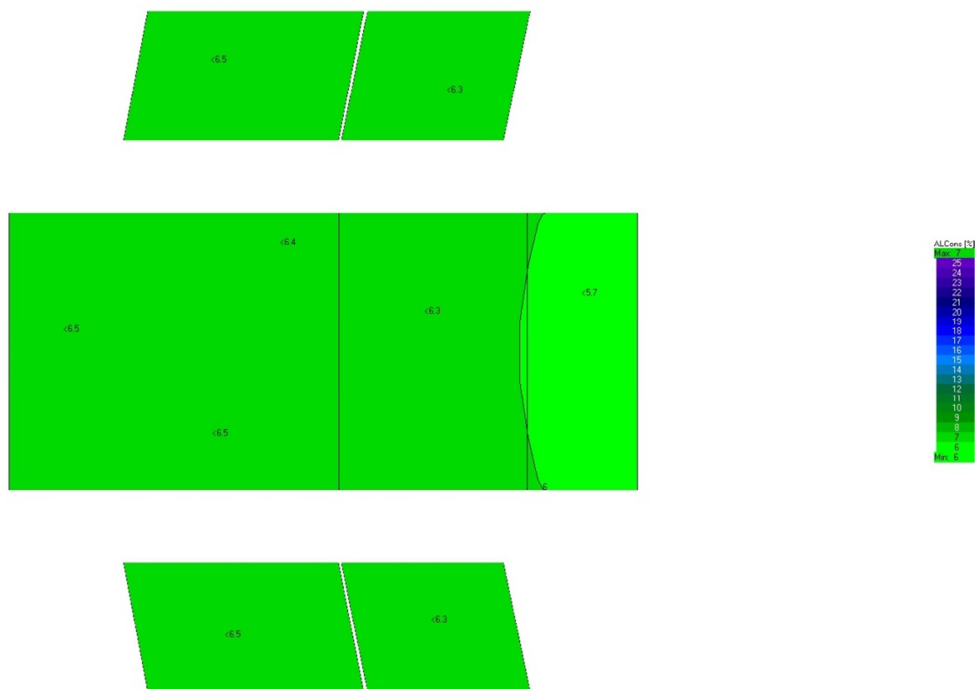
Dosažení nízkých výborných hodnot srozumitelnosti mluveného slova není v koncertním sále prioritou, ale lze její hodnoty uvést.

Výsledné hodnoty leží v pásmu „velmi dobrá“ (dle stupnice uvedené v Tab. 1). Platí to pochopitelně v případě kvalitní artikulace řečníkem.

Hladina hluku v hledišti (tzv. hluk pozadí) byla při výpočtu nastavena na hodnotu  $L_p = 40 \text{ dB}$ , která odpovídá šumu v tichém hledišti.

Obr. 6: Hlásková srozumitelnost řeči ( $AL_{Cons}$ ), řečník uprostřed jeviště.

Konzervator  
Used:  
Lspk: HLAS  
Map: Articulation Loss  
Energy: 2° Epot  
(1/3rd Octave)



(c) EASE 4.3 / Konzervator Koncertní sál - úprava verze / 2.4.2017 17:32:22 /

## 5.5 JASNOST HUDEBNÍHO SIGNÁLU

Výpočet „jasnosti“ (nebo „čistoty“) hudebního signálu se provádí pro ověření vhodnosti sálu ke konkrétnímu druhu hudby. Výpočty se provádějí metodou „Clarity<sub>80</sub>“ a hodnoty závisí na tvaru prostoru, jeho zvukové pohltivosti a směrových vyzařovacích charakteristikách zdrojů zvuku.

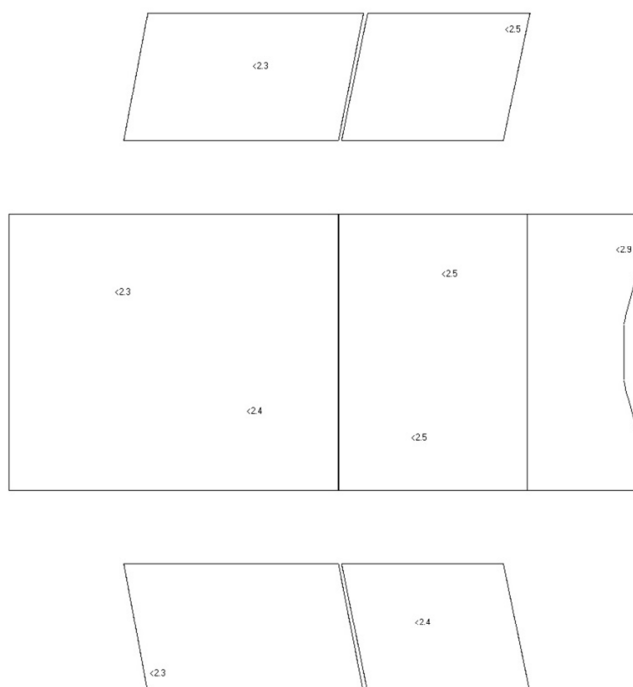
Požadované hodnoty pro různé druhy hudby jsou uvedeny v tabulce:

Tab. 2: Stupnice jasnosti hudebního signálu ( $C_{80}$ ).

0 dB	Varhanní a romantická hudba v prostorech s dlouhou $RT_{60}$
+2 dB	Klasická hudba a sborový zpěv
+4 dB	Pop music
+6 dB	Rock and Roll

Obr. 7: Hodnoty  $C_{80}$  v poslechových plochách, zdroj - mužský hlas na jevišti.

Konzervator  
Used:  
Lspk: HLAS  
- Speaker Data Not Authorized -  
Map: C80  
Freq: 1000 Hz  
(1/3 Octave Average)  
Energy: 2% E<sub>ref</sub>  
(1/3d Octave)



(c) EASE 4.3 / Konzervator Koncertní sál - úpravy / 4.4.2017 20:35:16 /

Výpočty nabývají hodnot mezi +2 až +3dB. Pro koncerty klasické hudby (komorní hudba, sólisté) se dle tohoto výpočtu bude sál jevit jako mírně přetlumený.

## 5.6 ŠÍŘENÍ ZVUKU, REFLEKTOGRAMY

Vzhledem ke složitosti problematiky šíření zvuku, není v současnosti možné simulovat zcela reálně poslech v sále. K tomu by bylo nutné v prostoru daných vlastností patrně vypočítávat kmitání všech molekul vzduchu v daném prostoru a ovlivňování jejich pohybu navzájem.

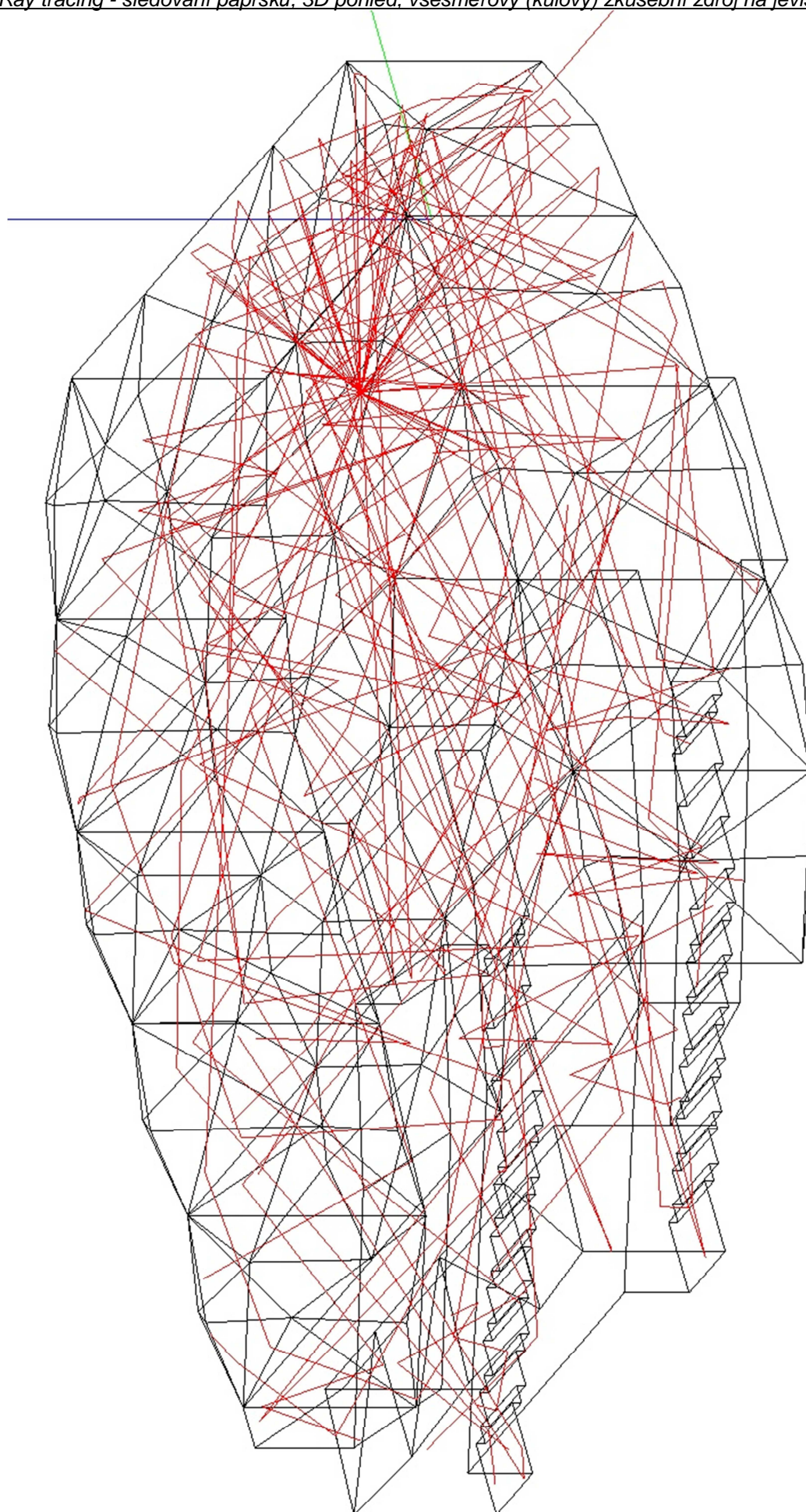
Proto se v současných simulacích používají metody sledování zvukových paprsků, které šíření zvuku „zviditelňují“ a člověku znalému problematiky prostorové akustiky mnohé napoví.

Na následujících čtyřech obrázcích (Obr. 8 až Obr. 11) je patrné šíření zvukových paprsků z všesměrového, neboli kulového zdroje zvuku umístěného uprostřed jeviště, a to z různých pohledů. Zobrazeno je celkem 45 náhodných zvukových paprsků (simulace nastavena na maximálně 5 odrazů od povrchů v prostoru).

Následující tři obrázky (Obr. 12 až Obr. 14) jsou tzv. reflektogramy - záznamy, resp. výpočty zvukové energie jednotlivých paprsků dopadajících do konkrétního místa v sále. Výpočty jsou provedeny pro 3 zvolená místa v hledišti (viz schematicky zakreslené židličky v Obr. 1). Výpočty zobrazují úroveň přímého zvuku a odrazů přicházejících do daného poslechového místa ve vztahu k času.

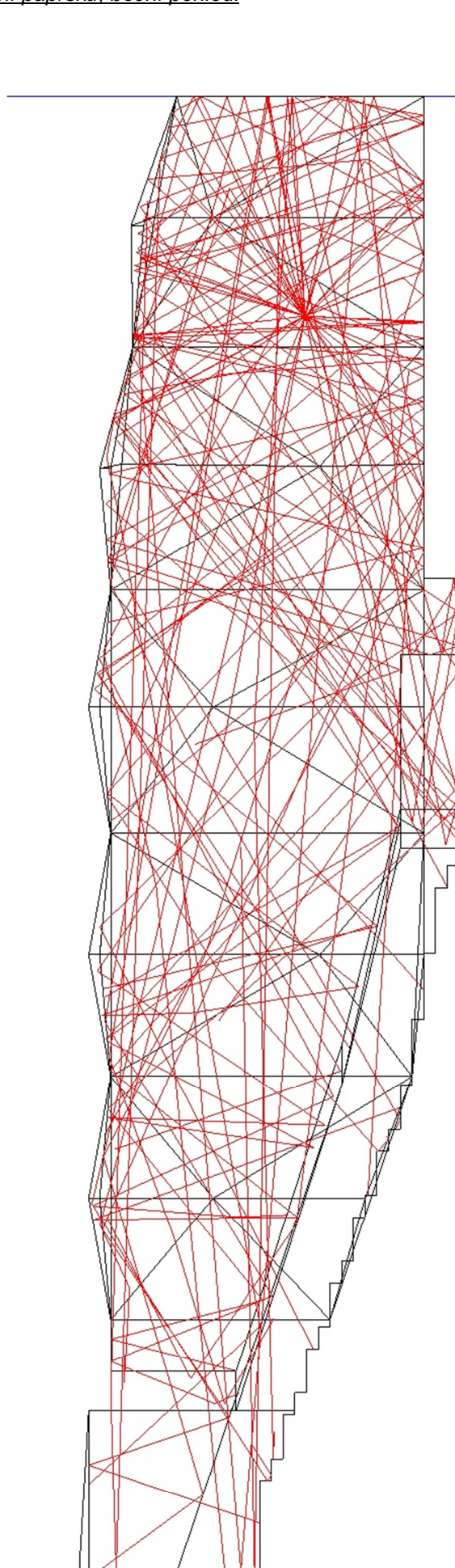


Obr. 8: Ray tracing - sledování paprsků, 3D pohled, všesměrový (kulový) zkušební zdroj na jevišti.

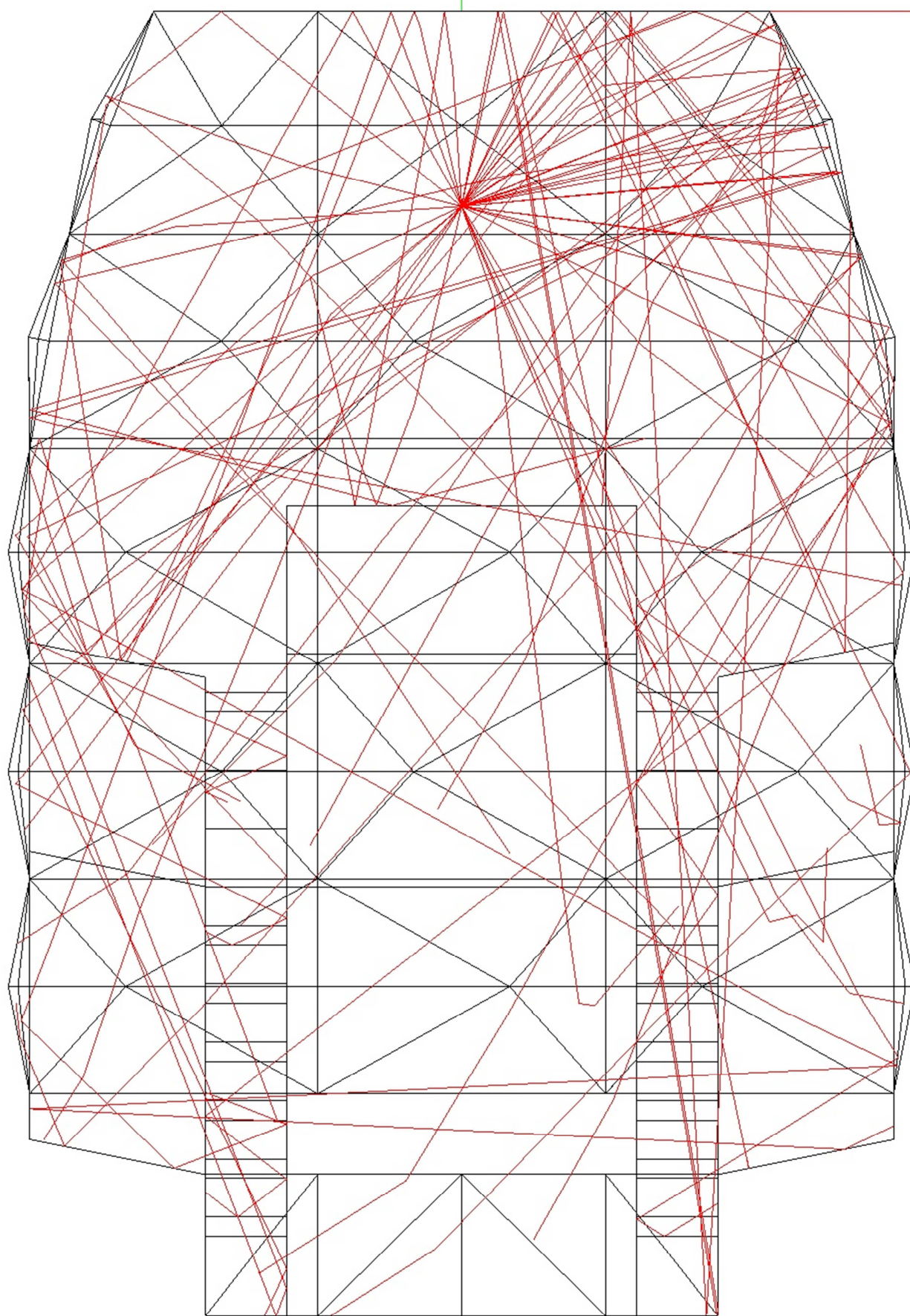




Obr. 9: Ray tracing - sledování paprsků, boční pohled.

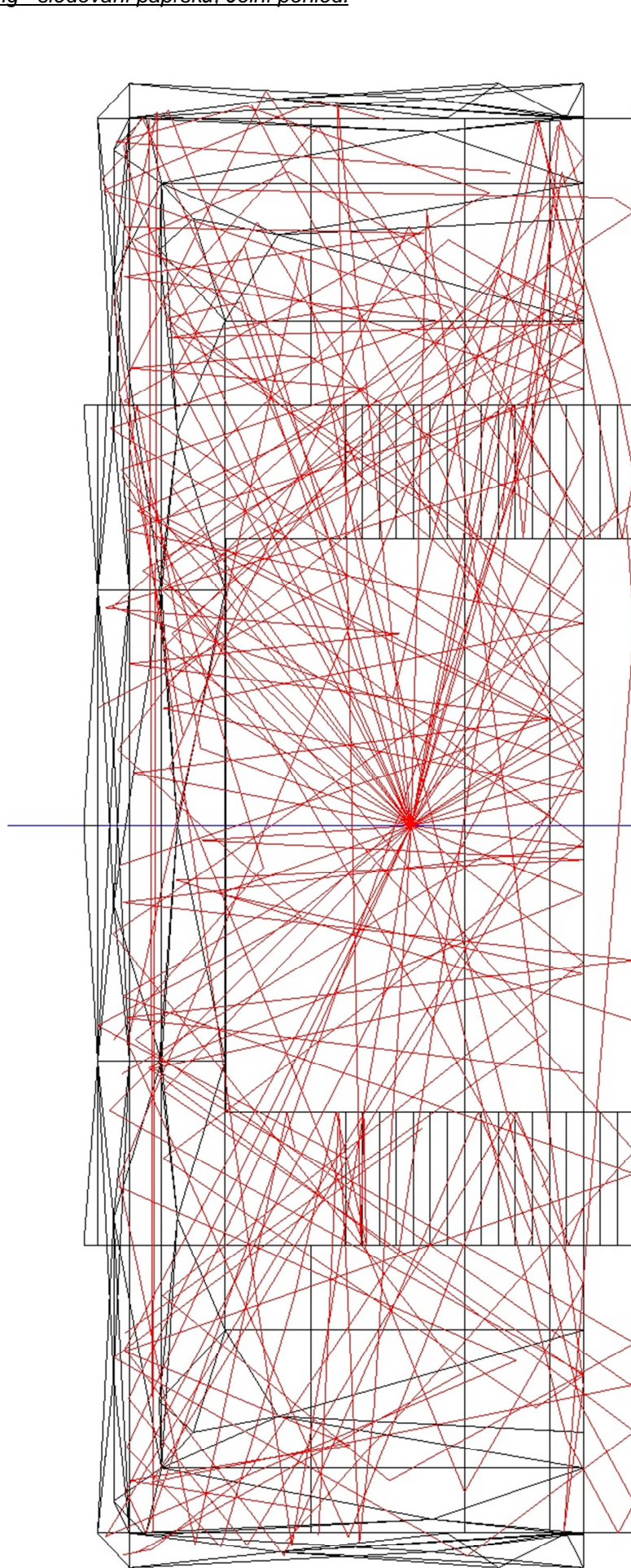


Obr. 10: Ray tracing - sledování paprsků, horní pohled.

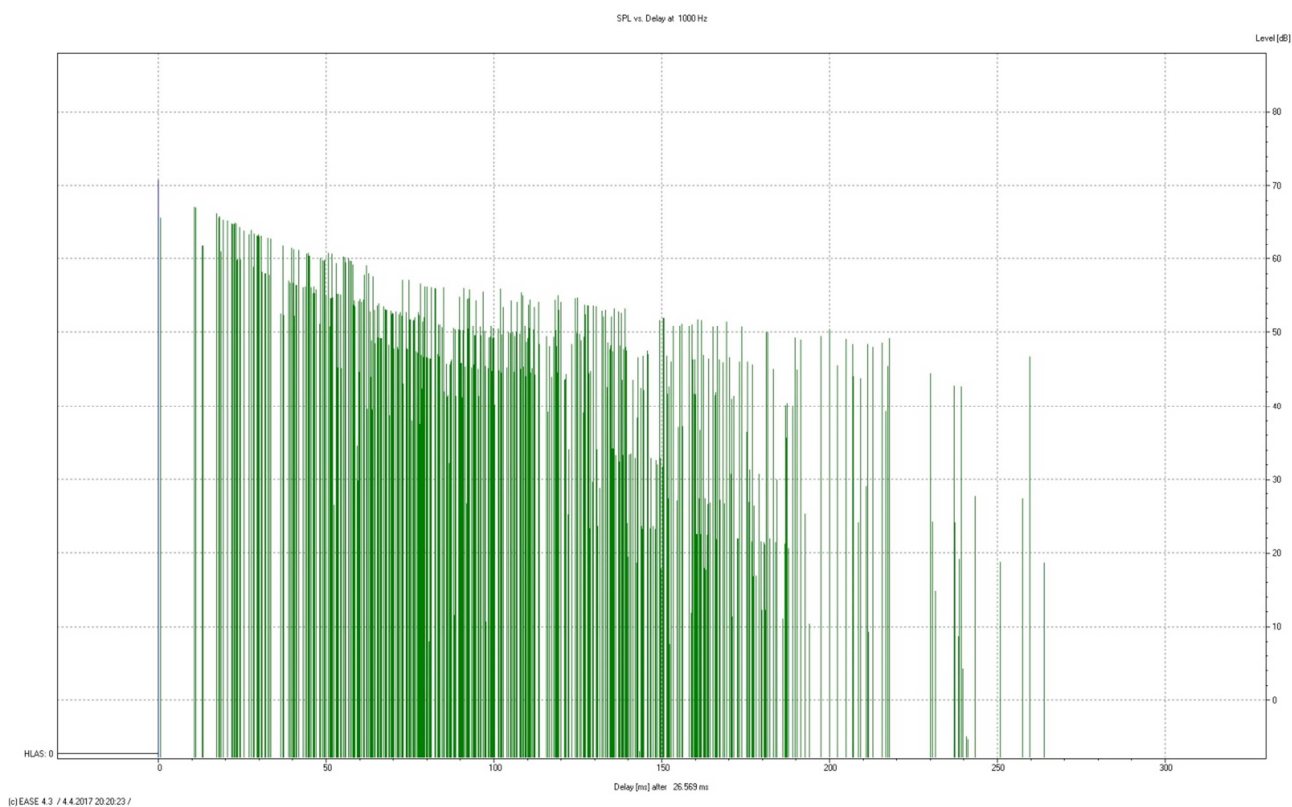




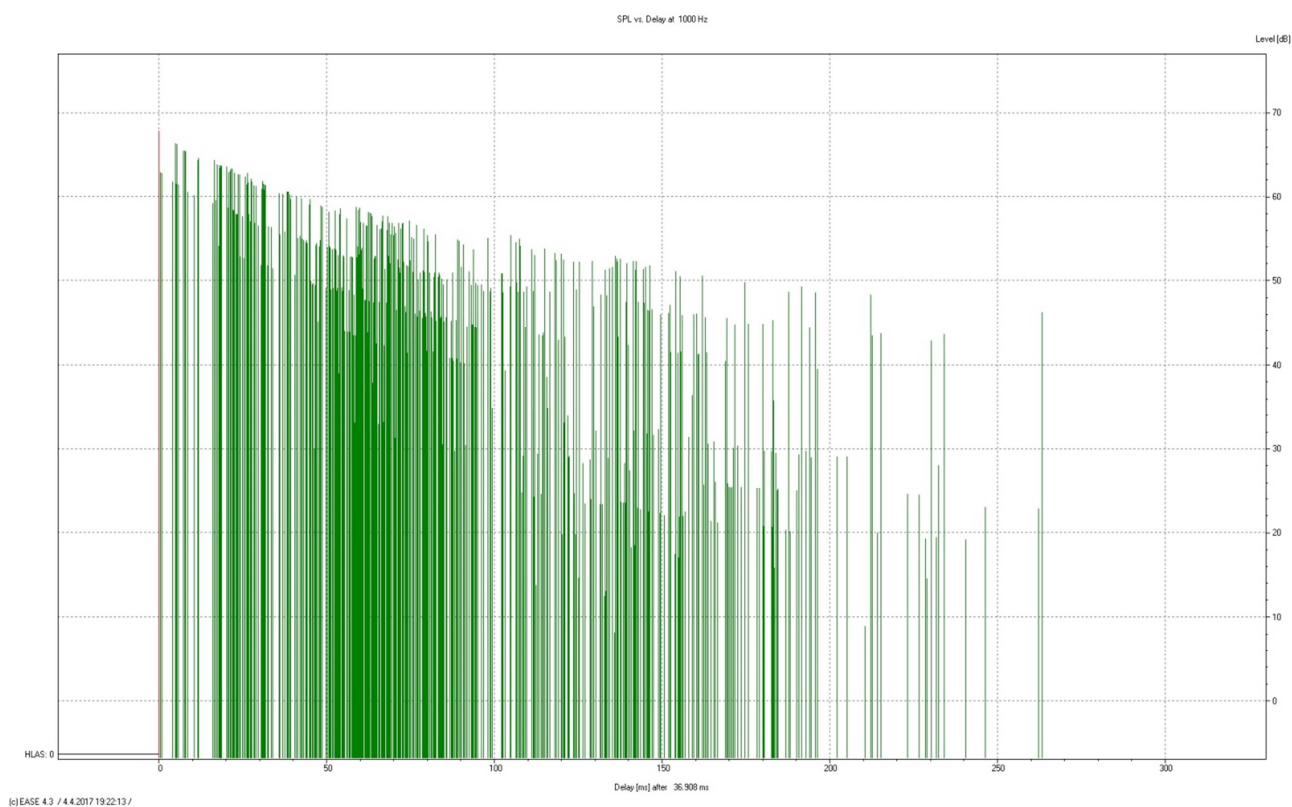
Obr. 11: Ray tracing - sledování paprsků, čelní pohled.



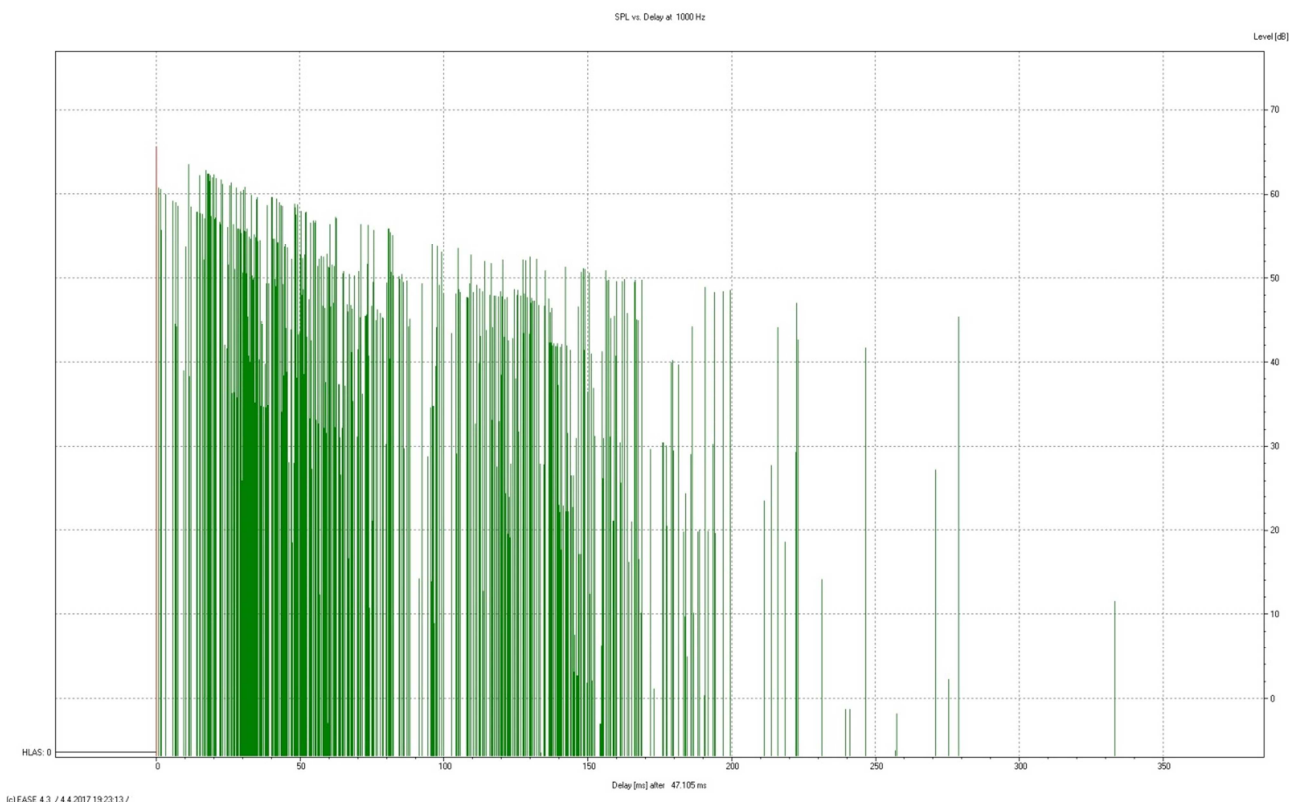
Obr. 12: Reflektogram - místo v přední části hlediště, zdroj - všesměrový (kulový) zkušební zdroj na jevišti.



Obr. 13: Reflektogram - místo v boční části hlediště, zdroj - všesměrový (kulový) zkušební zdroj na jevišti.



Obr. 14: Reflektogram - místo v zadní části hlediště, zdroj - všesměrový (kulový) zkušební zdroj na jevišti.



## 6. ZÁVĚR

Osobní zkušenosti z projektování prostorové akustiky a poznatky ze simulací vypracovaných k dané akci byly průběžně konzultovány s projektantem ing. arch. Janem Podešvou.

Předložené, průběžně aktualizované podklady zaslané projektantem:

- výkres obkladu sálu D.1.1-303 z dubna 2017

- navržené kompaktní desky, tl. 6 mm

- sedadla Opus Sello

jsou předpokladem pro kvalitní řešení akustiky sálu.

Omezení a nedostatky výchozích vlastností sálu byly v textu zmíněny. Sál má pro daný účel (kterým je kvalitní přenos zvuku akustických nástrojů a zpěvu) relativně malou výšku stropu. Zejména proto není možné tvar sálu zcela optimálně tvarovat. Z grafických rozborů a reflektogramů uvedených v předchozím článku (čl. 5.6) lze vyčíst, že směřování zvukových paprsků není optimální.

Optimální není také umístění některých sedadel do bezprostřední blízkosti stěn. Zadní sedadla hlediště v „kapse“, kde je již strop velmi nízký, také nebudou optimálním poslechovým místem.

Vzhledem k uvedenému nebude sál konzervatoře z hlediska akustiky úplně špičkovým sálem, nicméně k danému účelu, domnívám se, velmi dobře vyhoví.

Radek Sikora

21. 5. 2017

## 7. POUŽITÉ PODKLADY A LITERATURA

- [1] Rozpracovaná projektová dokumentace pro provedení stavby z března 2017 zpracovaná společností POParch s.r.o. Ing. arch. Janem Podešvou.
- [2] Databáze zvukoabsorpčních vlastností stavebních materiálů a konstrukcí pro software EASE 4.1.
- [3] ČSN 73 0525 – Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady.
- [4] ČSN 73 0527 – Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely.
- [5] Vaverka, J. a kolektiv; Stavební fyzika 1 - Urbanistická, stavební a prostorová akustika.
- [6] Halahyja, M.; Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie
- [7] Kolmer, F.; Prostorová akustika
- [8] Vlachý, V.; Praxe zvukové techniky
- [9] Merhaut, J. a kolektiv; Příručka elektroakustiky