

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta Elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**



Akustika orchestříšť'
Diplomová práce

Bc. Filip Nováček

Studijní program: Elektronika a komunikace
Studijní obor: Audiovizuální technika a zpracování signálů

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Praha 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Datum: 22. 5. 2019

.....
podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nováček** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **425050**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Akustika orchestřišť

Název diplomové práce anglicky:

Acoustics of Orchestra Pits

Pokyny pro vypracování:

Na základě měření akustických parametrů Janáčkova divadla proveďte analýzu stávajícího stavu, vytvořte model daného prostoru v programu EASE a tento model nakalibrujte s ohledem na tato měření.
Navrhněte akustické úpravy, které povedou k lepšímu přenosu vyšších kmitočtů do dolní části hlediště divadla.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/Afa, 1980
- [2] Kuttruff, H.: Room Acoustics, Spoon Press, 2009
- [3] Beranek, L.: Concert Hall Acoustics, JAES, Vol. 56, Nr. 7/8, 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **25.09.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2020**

Dr. Ing. Libor Husník
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá akustikou sálu Janáčkova divadla v Brně a jeho orchestřiště. V první části pojednává o teorii samotné propagace zvukových vln v uzavřeném prostoru a jejich pohlcování. Dále uvádí teoretické akustické parametry, které se uplatňují při zkoumání akustiky sálů větších rozměrů. Následně uvádí poznatky ze studií akustiky jiných světových sálů se zaměřením na prostor divadelního orchestřiště. Na základě architektonického modelu sálu Janáčkova divadla zkoumá akustické parametry sálu v prostředí simulačního programu EASE. Tyto získané parametry zhodnocuje a předkládá možné návrhy úprav, které by zlepšily šíření zvuku z prostoru orchestřiště do předních řad sálu.

Klíčová slova: Orchestřiště, prostorová akustika, Janáčkovo divadlo, EASE

Abstract

This diploma thesis is concerned with acoustics of Janáček Theatre in Brno and its orchestra pit. The opening part describes theory of soundwave propagation in enclosed room and sound absorption. Theoretical acoustic parameters that are considered while investigating spaces of larger volume are presented next. Then summaries findings from other music hall studies that are focused on orchestra pits. Based on architectural model of Janáček Theatre the acoustic parameters are obtained from EASE simulation software. The acquired values are evaluated and based on the recognized problem of sound distribution from the pit to the front part of the hall several propositions are given and discussed.

Key words: Orchestra pit, room acoustics, Janáček Theatre, EASE

Obsah

Úvod.....	11
1 Šíření zvukových vln.....	13
2 Šíření zvuku v prostoru	13
2.1 Šíření zvuku ve volném prostoru.....	13
2.2 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru	13
2.3 Pohlcování akustické energie	13
2.4 Dopad zvukové vlny na hranu překážky.....	14
3 Řešení akustického prostoru	14
3.1 Geometrická akustika	14
3.2 Vlnová akustika.....	15
3.3 Statistická akustika	16
3.4 Doba dozvuku	17
4 Objektivní kritéria kvality zvuku	20
4.1 Časová kritéria.....	20
4.2 Energetická kritéria.....	20
4.3 Další často používaná kritéria	23
5 Faktory ovlivňující akustický prostor.....	24
5.1 Rozměry a tvar prostoru.....	24
5.2 Sály s pravoúhlým tvarem.....	25
5.3 Sály tvaru vějíře.....	25
5.4 Sály typu vinice	26
5.5 Akustické úpravy prostoru	27
6 Šíření zvuku a prostorová akustika velkých sálů	28
7 Orchestřiště.....	30
7.1 Základy konstrukce orchestřiště	30
7.2 Orchestřiště a šíření zvuku z něj.....	32
7.3 Orchestřiště a pracovní podmínky pro hudebníky	34
7.4 Nové řešení orchestřišť	35
8 Příklady vybraných řešení orchestřišť	35
8.1 Divadlo J. K. Tyla v Plzni.....	35
8.2 Festspielhaus Bayreuth	36
8.3 Krakow Opera Hall.....	36
9 Janáčkovo divadlo v Brně.....	37
9.1 Sál.....	37
9.2 Orchestřiště	37
10 Stávající akustika Janáčkova divadla	38
10.1 Provedené měření	38
11 Model Janáčkova divadla.....	38

11.1	Využitý software	38
11.2	Vytvoření modelu	39
12	Provedené simulace	42
12.1	Simulace stávajícího stavu	43
13	Navrhované úpravy akustiky Janáčkova divadla	49
13.1	Úprava vnitřního uspořádání orchestřiště	49
13.2	Zavěšení odrazných ploch nad orchestřiště	53
13.3	Úprava stropní části nad orchestřištěm	60
14	Závěr	63
15	Literatura	65

Úvod

Orchestřiště je nedílnou součástí operních a velkých divadelních sálů. Slouží jako prostor pro hudební těleso, které doprovází svým přednesem dění na scéně a spoluutváří tak celkový dojem z díla. Prostorová akustika orchestřiště je velmi komplexní problematikou, kterou nelze vyřešit vždy jednotným postupem. Na celkový dojem z divadelního či operního představení má právě orchestřiště a to, jakým způsobem je energie od hudebníků přenesena k divákovi, zásadní vliv. Z tohoto důvodu je nutné se jí detailně věnovat a zkoumat, jaký vliv mají jednotlivé prvky orchestřiště a samotného sálu na hudební zážitek posluchače.

V rané době opery a divadla byl hudební doprovod přítomen přímo na jevišti s herci. Velmi rychle byl však pro orchestr vyčleněn nový prostor. V 17. století postavený první veřejný operní dům Teatro San Cassiano [1] již počítal s orchestrem v prostoru před jevištěm. Později začal být orchestr zakrýván předscénou a částečně také schováván, aby nerozptyloval diváky od sledování dění na jevišti.

Tak jako k architektuře samotného sálu i ke konstrukci orchestřiště se přístupy značně různí. Každé operní a divadelní dílo počítá s jinak velkým orchestrem, a tak i velikost orchestřiště se vždy liší. Vidění celého konceptu orchestřiště může být velmi rozmanité. V tomto bodě je zajímavý a poměrně odlišný například přístup skladatele Richarda Wagnera. Wagner sám byl u návrhu Festivalového divadla v Bayreuthu, ve kterém měly být uváděny pouze jeho opery, a přišel s myšlenkou, že celý orchestr by měl být divákovi skryt a neměl by tvořit jakousi bariéru mezi divákem a jevištěm.

Prostorová akustika studuje šíření zvuku ve zkoumaném prostoru a naše vnímání tohoto prostoru. Jedná se o komplexní vědní obor, který se stále více stává problematikou našeho každodenního života. Není však samozřejmě pravdou, že by se akustikou lidstvo zabývalo až v poslední době. Dříve bylo však zkoumání tohoto vědního oboru zaměřené na prostory, kde probíhala hudební a divadelní performance. Již římský architekt a inženýr Vitruvius si uvědomoval, že je nutné konstruovat divadla tak, aby všichni nejen dobře viděli, ale i slyšeli. Popsal také použití bronzových váz, které fungovaly jako rezonátory a měly zlepšovat srozumitelnost hereckého projevu.

První, kdo se zabýval prostorovou akustikou z vědeckého pohledu v novodobé historii, byl Wallace Clement Sabine na přelomu 19. a 20. století. Ten položil základy tohoto oboru, na kterých se staví dodnes. Jako první zkoumal praktickými pokusy vliv různých materiálů, ale i osob na akustiku. Pomocí stopek a varhan zkoumal tlumení různých frekvencí a později definoval dobu dozvuku – parametr, který je klíčový při zkoumání akustiky dodnes.

V dnešní době se s akustikou setkáme nejen u hudebního sálu a jeho orchestřiště, ale také na mnoha místech, kde se o ní dříve tolik nepřemýšlelo – ať už je to rušné vlakové nádraží, školní učebna nebo plavecký stadion.

Problematiku prostorové akustiky je velmi obtížné, ne-li nemožné, naprosto přesně matematicky popsat, vymodelovat a hodnotit. Do jisté míry může být její posouzení čistě objektivní. Z tohoto pohledu se jedná o šíření zvukových vln dle fyzikálních zákonů, podle kterých je možné výpočty, modely a simulacemi určit vliv prostoru na šíření zvuku a základní akustické parametry prostoru, které mají prokazatelný vliv na naše vnímání prostorové akustiky.

Hodnocení akustiky je ale možné také ze subjektivního hlediska. Každý člověk podvědomě vnímá akustický vliv prostoru, ve kterém se nachází, avšak například čistotu zvuku, jeho prostorovost, nebo srozumitelnost mluveného slova cítí každý odlišně. K těmto čistě subjektivním hodnotám byly již přiřazeny objektivní akustické parametry, které mají údajně na osobní hodnocení prostoru největší vliv, aby bylo možné určit, jak zkoumaný prostor upravit pro lepší celkový zážitek z poslechu.

Umístění orchestru před jeviště tak, aby divák stále viděl na dirigenta, případně samotné hudebníky, ale zároveň nepřišel o nic z dění na jevišti, s sebou nese řadu pozitiv, ale i úskalí.

Dobře navržené a akusticky ošetřené orchestřiště je základem vyváženého hudebního projevu v celém sále. Správně fungující orchestřiště navíc ocení nejen diváci, ale i herci na jevišti a samotní hudebníci. Dobrá distribuce akustické energie z prostoru orchestřiště umožní snížení úrovně hlasitosti celého tělesa, tak aby se hudebníci navzájem dobře slyšeli a lépe se jim hrálo. To zároveň pomáhá aktérům na scéně, kterým je lépe rozumět a kteří se tak také lépe slyší navzájem. Dalším nesporným plusem nynější koncepce orchestřiště je, že bývá navrženo tak, aby měl dirigent stálý přehled o akci na jevišti a mohl tak přizpůsobit orchestr aktuálnímu dění.

To vše je ale samozřejmě vyvažováno některými komplikacemi, se kterými se při konstrukci orchestřišť setkáváme. Samotní hudebníci často vyjadřují nelibost k práci v orchestřišti kvůli stísněnému prostoru a vysoké úrovni hlasitosti, které jsou uvnitř vystaveni. V případě orchestřiště a hudebního sálu je také nutné a obvykle i obtížné snoubit požadavky akustických inženýrů a architektů, protože často, co lahodí oku, nemusí tak úplně ve výsledku znít libě pro naše ucho.

Tato práce se zabývá zkoumáním prostorové akustiky Janáčkova divadla v Brně, a především vlivu dispozic jeho orchestřiště na šíření zvuku do prostoru sálu.

V úvodní části této práce je přehled o šíření zvuku v uzavřeném prostoru, problematice akustiky koncertních sálů se zaměřením na orchestřiště a přiblížení, jakým způsobem je akustika orchestřišť hodnocena a jakými prostředky je možné ji ovlivnit.

V další části je popsán stav orchestřiště Janáčkova divadla a naměřené akustické hodnoty. V následující části jsou popsány provedené simulace v programu EASE stávajícího stavu a také simulace možných úprav prostorů, které by vedly ke zlepšení akustických vlastností divadla.

1 Šíření zvukových vln

Zvuk je definován jako šíření hmotných částic kontinuálního prostředí. Prostředí, kterým se zvuk šíří, může být pevné, kapalné či plynné. [2] Zvuk se často ohraničuje slyšitelným spektrem, tedy přibližně 20 Hz až 20 kHz. Pro účely této práce je uvažován zvuk slyšitelný a pozorované přenosové médium vzduch.

Zvuk se šíří prostředím od svého zdroje jako vlnění. Šíří se všemi směry podle Huygensova principu. [3] Vlnoplochy (body v prostoru kmitající se stejnou fází) mohou nabývat různých tvarů. Tvar vlnoplochy se odvíjí od rozměrů, tvaru a také směrovosti zdroje. Na základě toho jsou uváděny dva základní tvary vlny. Vlna kulová, jejímž zdrojem je například bodový, všesměrový zdroj a vlna rovinná. Zdrojem rovinné vlny může být rovinná deska. Často se pro zjednodušení uvažují vlnoplochy kulové vlny v dostatečné vzdálenosti jako rovinné.

2 Šíření zvuku v prostoru

2.1 Šíření zvuku ve volném prostoru

Při šíření zvuku ve volném prostoru se akustický výkon P (W) s rostoucí vzdáleností r (m) od zdroje rozprostírá na stále větší plochu S (m²). Tím se snižuje intenzita I (W/m²). [4] Hladina akustického tlaku L v dané vzdálenosti se pak určí jako:

$$L = L_w + 10 \cdot \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (1)$$

kde L_w je hladina akustického výkonu zdroje zvuku (dB)
 Q činitel směrovosti (-)
 r vzdálenost od zdroje (m)

Intenzita zvuku se tedy ve volném poli s rostoucí vzdáleností snižuje. Z uvedeného vztahu lze poté odvodit, že pro bodový zdroj klesne hladina akustického tlaku o 6 dB se zdvojnásobením vzdálenosti od zdroje.

2.2 Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

V uzavřených nebo částečně uzavřených prostorech se zvuk od zdroje k posluchači nešíří pouze přímo, ale také odrazem od stěn a překážek či ohybem na nich. A to proto, že chování zvukových vln odpovídá zákonům obecně platným pro všechny typy vlnění. Při dopadu zvukové vlny na stěnu se část její kinetické energie odrazí pod stejným úhlem, pod jakým vlna dopadla (za předpokladu dokonale rovné a tuhé stěny) a postupuje znovu do prostoru. K odrazům od stěn nebo překážek v uzavřeném prostoru dochází, dokud není zvuková vlna utlumená vlivem prostředí, kterým se šíří či materiálem od kterého se odráží.

2.3 Pohlcování akustické energie

Při každém dopadu vlny na impedanční rozhraní se jí část pohltí. Tato ztráta energie vlny je dána jejím částečným prostupem překážkou do prostoru za ní (prostup zvuku z jedné místnosti do druhé), a zejména přeměnou na jiný typ energie – především tepelnou – ta je odvedena konstrukcí, jejíž je překážka součástí, jinam. Tato přeměna akustické energie na jinou se obecně nazývá pohlcování zvuku a podle způsobu jakým probíhá lze rozdělit na pohlcování vznikající třením, pohlcování vznikající poklesem akustického tlaku a pohlcování vznikající nepružnou deformací těles. [2]

2.3.1 Pohlcování vznikající třením

K přeměně akustické energie v teplo dochází třením částic vzduchu podél plochy. K tomuto tlumení akustické energie dochází v limitní vrstvě jakéhokoli materiálu. Za předpokladu

dokonale rovné a tuhé stěny dochází k tlumení energie téměř nezatelně. K zvýšení tlumícího účinku materiálu je vhodné zvětšit plochu, se kterou přijde dopadající akustická energie do styku, a tím zvětšit také limitní vrstvu, ve které dochází k přeměně energie. Proto se jako pohltivé materiály využívá porézní struktury.

2.3.2 Pohlcování vznikající poklesem akustického tlaku

K přeměně vzniklé poklesem akustického tlaku (takzvanými relaxačními změnami), dochází nesplněním podmínky adiabatického děje. Kladná půlperioda zvukové vlny ohřeje materiál, který část předané energie stihne odvést, záporná půlperioda naopak materiál ochlazuje a ten stihne teplotu dorovnat. Tak přichází akustická vlna o část své energie.

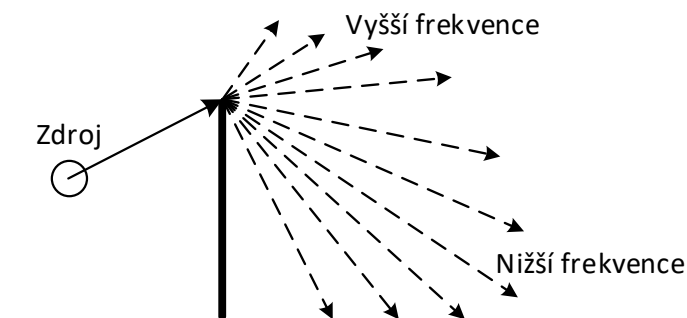
2.3.3 Pohlcování vznikající nepružnou deformací těles

K přeměně zvukové energie vzniklé nepružnou deformací dochází při dopadu zvukové vlny na překážku z materiálu s vysokou hysterezi v jeho pružnosti. Dopadající zvuková energie materiál stlačí a deformuje. Překážka vykazující pružnou hysterezi se poté, co přestane působit tato síla, vrátí do svého původního tvaru po hysterezní křivce. Z toho důvodu je práce vynaložená na jeho deformaci větší než práce vzniklá pružností překážky. Tento rozdíl pak odpovídá vzniklé ztrátě akustické energie.

Praktické použití jednotlivých druhů materiálů k tlumení zvuku je popsáno v kapitole 5.5.

2.4 Dopad zvukové vlny na hranu překážky

V případě, že dopadne vlna na hranu překážky, dochází k takzvanému ohybu vlny. K tomu dochází na základě Huygensova principu – na hraně překážky, kam dorazila vlna, si lze představit vznik nového bodového zdroje (obrázek 1). Jedná se o takzvanou difrakci vlny způsobenou fázovou interferencí [3], která se objevuje u všech typů vlnění, avšak vzhledem k její frekvenční závislosti se u určitých typů vlnění projeví více. Nízké frekvence (dlouhé vlnové délky) se ohýbají více než frekvence vysoké.



Obrázek 1: Difrakce různých frekvencí přes překážku. Upraveno z [5]

3 Řešení akustického prostoru

V dnešní době již existuje mnoho metod, jak objektivně, ale i subjektivně, hodnotit akustiku prostoru. V následující části jsou rozebrány tři hlavní objektivní metody, které jsou uváděny v literatuře, a vycházejí ze základních fyzikálních principů.

3.1 Geometrická akustika

Geometrická akustika přistupuje k šíření zvuku v místnosti za pomoci zjednodušujícího předpokladu, že všechny zvukové vlny se od zdrojů šíří jako paprsky, které se od překážek odrážejí. Úhel odrazu takového „paprsku“ je roven úhlu dopadu, přičemž oba paprsky leží ve stejné rovině – rovině dopadu.

Toto zjednodušení je možné především pro zvuk o vyšších kmitočtech. Zároveň platí, že čím větší jsou rozměry překážky, tím více se blíží chování zvukových vln při odrazu chování světelných paprsků. [2] Geometrická akustika poté sleduje dráhy paprsků od zdroje k přijímači. Při každém odrazu od překážky vznikne nový virtuální zdroj vysílající nižší energii, než byla energie dopadajícího paprsku.

Konstrukce paprsků se provádí mnoha způsoby, například zrcadlovou metodou či metodou ray-tracing.

Geometrická akustika je také hojně využívána v simulačních programech, jakým je například i v této práci použitý software EASE.

Pro představu uvádí F. A. Everest [3] kalkulaci počtu odrazů zvukové vlny za pomoci geometrické akustiky v prázdné místnosti o rozměrech $7 \times 5 \times 3$ m. Pokud je v takové místnosti průměrná doba dozvuku 0,3 s a střední volná dráha 2,9 m (průměrná vzdálenost, kterou zvuk urazí mezi odrazy určená z poměru $4V/S$, kde V je objem místnosti a S je celková plocha místnosti), pak v místnosti dojde k minimálně 35 odrazům během poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB.

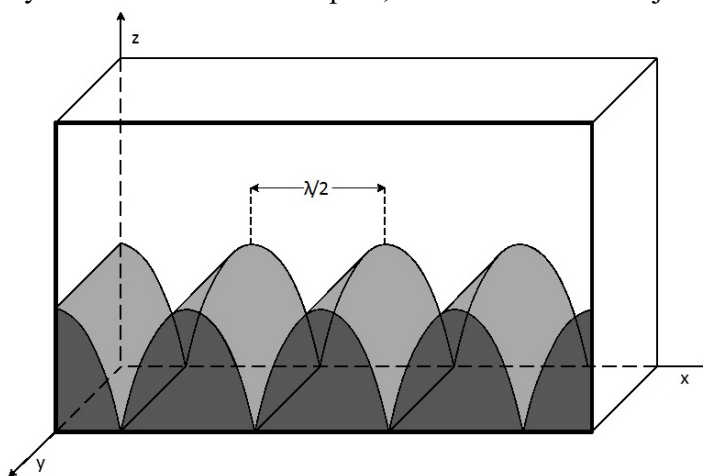
3.2 Vlnová akustika

Vlnová akustika modeluje zvukové pole pro nízké kmitočty pomocí vlnové rovnice a jejími okrajovými podmínkami. Vlnová rovnice popisuje časové změny hustoty částic vzduchu, kterým se vlna šíří. Obecný tvar vlnové rovnice pro jeden rozměr (x) a čas (t) v závislosti na akustickém tlaku p je dle [6]:

$$c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

Základem numerických metod vlnové akustiky je rozdělení prostoru na mnoho malých oblastí o velikosti mnohem menší než zkoumaná vlnová délka. Tyto oblasti se vzájemně ovlivňují. Nejběžněji se používají metody FEM (Finite Element Method), BEM (Boundary Element Method), a FDTD (Finite-Difference Time-Domain method). [7] Řešení vlnové rovnice je výpočetně velice náročné i pro jednoduché a pravoúhle tvarované prostory. Proto tato metoda vychází z číselné aproximace výsledku vlnové rovnice. [7]

Ve vlnové akustice se pozorují fázové rozdíly vlny, která dopadla a která se odráží zpět do prostoru. Tento rozdíl závisí na kmitočtu vlny a prostoru, ve kterém se vlna šíří. [8] Dopadající a odražená energie akustické vlny se může sečíst a způsobit tak vznik stojatého vlnění (obrázek 2). Takové vlnění se vyznačuje tím, že má v některých místech prostoru na daném kmitočtu maxima (kmitny) a jinde (ve vzdálenosti $\lambda/2$) minima (uzly). Tento jev je jednou z příčin nevyrovnaného akustického pole, které zásadně zhoršuje kvalitu poslechu.



Obrázek 2: Zobrazení stojatého vlnění v místnosti – ve směru osy Z je vyjádřena hladina akustického tlaku v daném bodu prostoru x, y. [9]

3.2.1 Vlastní módy místnosti

Řešením vlnové rovnice pro triviální prostor s rovnoběžnými protějšími stěnami, které jsou uvažovány jako tuhé, nepružné, lze získat rovnici pro stanovení vlastních módů místnosti. [3]

$$f_N = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz}) \quad (3)$$

kde c_0 rychlost šíření zvuku ve vzduchu (ms^{-1})
 l_x, l_y, l_z rozměry prostoru (m)
 n_x, n_y, n_z celá nezáporná čísla

Vlastní módy místnosti jsou dány jejími rozměry a určují rezonanční kmitočty místnosti. Tyto vlastní módy (kmitočty) jsou nežádoucí, protože zvyšují amplitudu zvuku o této frekvenci proti ostatním frekvencím v prostoru. Cílem návrhu správného rozměru prostoru je vytvořit co nejvyšší počet vlastních kmitů v celém slyšitelném spektru, aby nedocházelo k zesilování jen některých a vytvořilo se tak homogenní zvukové pole. [3]

V oblasti nízkých kmitočtů je zvukové pole nevyrovnané a frekvence vlastních módů jsou od sebe ve spektrální oblasti hodně vzdálené, je vhodné nalézt takzvaný kritický neboli Schroederův kmitočet. Převzato z [9].

3.2.2 Schroederův kritický kmitočet

Tento kmitočet určuje hranici, do které je zvukové pole nevyrovnané, a tedy vlastní módy místnosti jsou od sebe ve spektru vzdálené. Od tohoto kmitočtu dále je možné považovat zvukové pole v prostoru za difuzní, což je základním bodem pro akustiku statistickou. [2] Kritický kmitočet lze určit pomocí objemu zkoumaného prostoru V a známé doby dozvuku T pomocí vztahu:

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz}) \quad (4)$$

Převzato z [9]

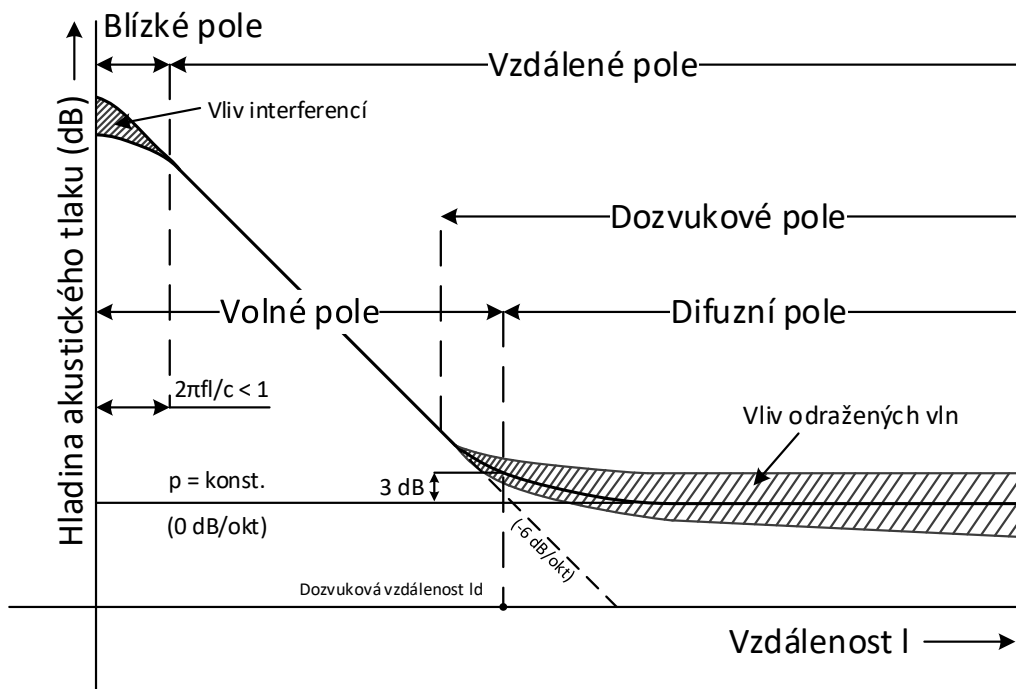
Pro velké sály je však kritický kmitočet velmi nízký, a proto je to jen okrajový problém (pro sál o objemu 8000 m^3 a průměrnou dobou dozvuku $1,6 \text{ s}$ je kritický kmitočet pod 30 Hz).

3.3 Statistická akustika

Statistická akustika platí nad kritickým kmitočtem f_k a je základem praxe v prostorové akustice. Klíčové u tohoto přístupu je zprůměrování všech akustických veličin. Poté je možné se zabývat hustotou energie v daném prostoru. Celý tento princip je založen na předpokladu existence takzvaného difuzního pole, které vzniká pouze v uzavřených prostorech. Difuzní pole je částí zvukového pole, ve kterém převládá energie odražených vln nad energií vln přímých (více v popisu obrázku 3). V otevřených prostorech nikdy nenastane případ, kdy by v nějakém místě byla větší hustota odražených vln než těch přímých. V difuzním poli je energie zvuku rozložena rovnoměrně. Převzato z [9]

Statistická akustika předpokládá tyto důležitá zjednodušující pravidla [2], která zároveň definují vlastnosti difuzního pole.

- Velikost energie v jakémkoli bodě je dána součtem středních hodnot energie, která do tohoto bodu dorazila po odrazu.
- Hustota zvukové energie je ve všech bodech stejně velká – předpoklad difuzního pole.
- Úhly příchodu zvukové energie do daného bodu jsou všechny stejně pravděpodobné.
- Vyzařování a pohlcování je kontinuální.



Obrázek 3: Rozložení akustického pole v uzavřeném prostoru jako funkce vzdálenosti od zdroje. Nejbližze zdroji je blízké pole, na které mají zásadní vliv interference – dochází ke skládání různých fází akustického tlaku – a proto je vyjádření okamžitého akustického tlaku poměrně složité. S větší vzdáleností dochází ke zmenšení vlivu různých fází a blízké pole přechází do pole volného. Ve volném poli platí pokles hladiny akustického tlaku o 6 dB s dvojnásobkem vzdálenosti až do dozvukové vzdálenosti l_d , kde již převládne vliv odražených vln nad vlnami přímými a vzniká difuzní pole. [9]

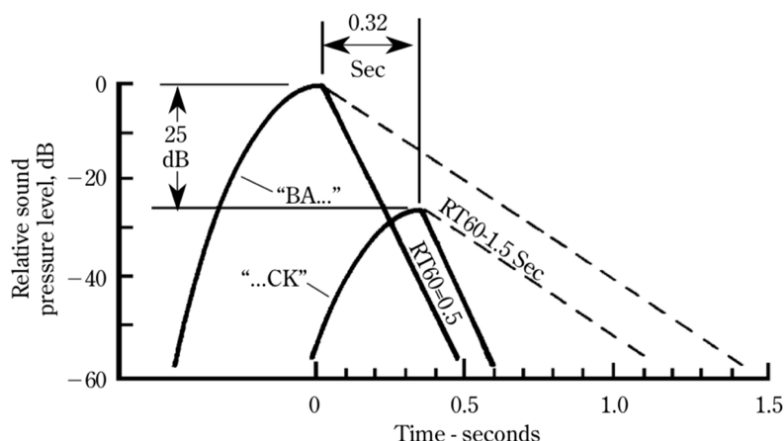
3.4 Doba dozvuku

Dozvuk je zvuk, který se šíří místností po utichnutí prvotního zdroje zvuku. Obecně je doba dozvuku definována jako doba, za kterou po vypnutí zdroje poklesne hladina intenzity zvuku v prostoru o 60 dB. Energie zdroje zvuku je pohlcena především materiály v místnosti, zvláště u větších prostorů se projeví také útlum zvuku ve vzduchu. [3]

Doba dozvuku je klíčovým parametrem pro návrhy akustických úprav. Lze podle ní provést základní objektivní hodnocení akustických vlastností místnosti a jejich vliv na poslech hudby či srozumitelnost.

Tento vliv na srozumitelnost je doložen v *Master Handbook of Acoustics* [3].

Příklad je pro anglické slovo „back“. Toto sestává ze slabiky „ba“, která je standardně vyslovována důrazně a slabiky „ck“ která je vyslovována slaběji. Podle měření je mezi slabikami rozdíl 25 dB SPL. Maximum slabiky „ck“ přichází 0,32 s po maximu „ba“. Na obrázku níže je patrný vliv doby dozvuku na srozumitelnost. Za předpokladu místnosti s dobou dozvuku 0,5 s (pro pokles akustické energie o 60 dB) stihne slabika „ba“ odeznít pod úroveň slabiky „ck“ dříve, než je vyslovena, a proto je slovu „back“ rozumět. Při době dozvuku 1,5 s však již první slabika doznít nestihne a druhá slabika zůstane zamaskována. Slovu tedy nebude rozumět. Toto maskování je ilustrováno na obrázku 4.



Obrázek 4: Ilustrace efektu dozvuku na srozumitelnost slova „BACK” [3]

Podobný vliv má doba dozvuku také na hudbu.

Níže jsou uvedeny jednotlivé metody teoretického výpočtu doby dozvuku, každá se hodí pro různé hodnoty celkové pohltivosti materiálů v místnosti.

3.4.1 Doba dozvuku podle Sabina

V úvodu zmíněný fyzik W. C. Sabine jako první definoval dobu dozvuku a na základě nespočtu experimentů určil její spojitost s objemem místnosti a množstvím pohltivých materiálů.

Sabine předpokládal, že zvuková energie je stěnami obklopujícími uzavřený prostor pohlcována plynule [4] a na tomto základě stanovil odhad doby dozvuku následovně:

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad (s) \quad (5)$$

kde V objem místnosti (m^3),
 α činitel pohltivosti (-),
 S celkový obsah ploch materiálů (m^2)

Pokud je v měřené místnosti více ploch s různým činitelem pohltivosti, je průměrný činitel pohltivosti α definován pomocí rovnice:

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S} \quad (s) \quad (6)$$

kde α_i je pohltivost stěny o obsahu plochy S_i .

Vztah podle Sabina se používá pro prostory s malým koeficientem pohltivosti α , s vyšším koeficientem α roste chyba. Teoreticky pro $\alpha = 1$ by měla být doba dozvuku nulová, což ovšem podle Sabinova vztahu neplatí. Z toho důvodu byl zaveden nový vztah, známý jako doba dozvuku podle Eyringa.

3.4.2 Doba dozvuku podle Eyringa

Jelikož předpoklad, že zvuková energie je pohlcována postupně pro vyšší hodnoty α , již neplatí, přichází Eyring s předpokladem, že se dopadající vlna oslabí skokově. Poté je doba dozvuku podle Eyringa definována jako:

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (s) \quad (7)$$

kde V objem místnosti (m^3),
 α činitel pohltivosti (-),
 S celkový obsah ploch materiálů (m^2)

V praxi se ukázalo, že ani Eyringův vzorec nedává uspokojivé informace v těch případech, kdy jsou hodnoty činitele zvukové pohltivosti větší než 0,8, a proto je vhodnější použít vzorec Millingtonův [2].

3.4.3 Doba dozvuku podle Millingtona

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_1^n S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (s) \quad (8)$$

kde V objem místnosti (m^3),
 α_i jednotlivé příspěvky činitelů pohltivosti (-),
 S_i obsah ploch materiálů pro odpovídající α_i (m^2)

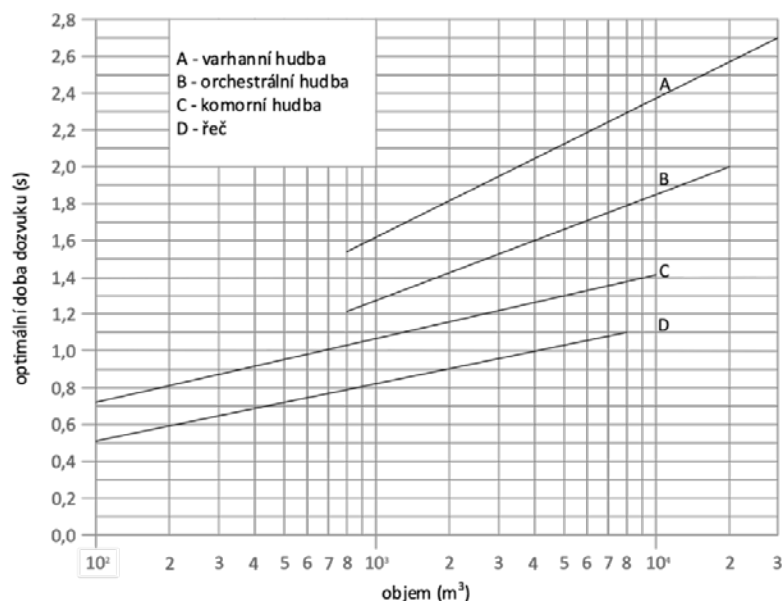
Ve výsledku se pak v praxi ještě u všech vzorců přičítá ke jmenovateli člen $4mV$, který je velmi důležitý především při šíření v prostorech s velkým objemem, jakými jsou koncertní sály nebo haly. Tento člen vyjadřuje vliv útlumu zvuku při šíření prostředím. Činitel útlumu m je závislý na relativní vlhkosti, teplotě a kmitočtu, V je objem místnosti.

Výsledný vztah pro výpočet doby dozvuku podle Sabina je poté uváděn jako:

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S + 4mV} \quad (s) \quad (9)$$

Doba dozvuku je v praxi základním objektivním kritériem pro hodnocení akustiky prostoru, není však zdaleka jediným. Pro komplexnější hodnocení akustiky daného prostoru se využívá mnoha dalších parametrů, které berou v potaz například poměr přímých a odražených zvukových vln v prostoru, případně frekvenční rozložení podporovaných spektrálních složek v sále. Tyto hodnoty jsou dány uspořádáním zkoumaného prostoru jeho velikostí a vlastnostmi použitých materiálů. Obecně je možné tyto kritéria rozdělit na časová a energetická.

Optimální hodnoty doby dozvuku v závislosti na objemu místnosti jsou podle české normy ČNS 73 0525 pro koncerty varhanní, orchestrální, komorní hudby a pro přednes řeči stanoveny diagramem níže (obrázek 5). Hodnoty doby dozvuku T_{30} , T_{20} a EDT se podle [10] zpravidla příliš neliší, takže je možné toto doporučení dané normou vztáhnout i na ně.



Obrázek 5: Optimální doba dozvuku v závislosti na objemu místnosti podle normy ČNS 73 0525

V této kapitole byly části převzaté ze zdroje [9].

4 Objektivní kritéria kvality zvuku

4.1 Časová kritéria

Časová kritéria vycházejí z časového průběhu dozvukové křivky. Patří mezi ně již zmíněná doba dozvuku, počáteční doba dozvuku (EDT) nebo také Bass Ratio a High Frequency Ratio [11].

4.1.1 EDT

Počáteční doba dozvuku EDT je čas dozvuku pro pokles hustoty energie o prvních 10 dB. Tato doba je důležitá pro odhadnutí, jak bude člověk subjektivně vnímat dobu dozvuku v daném prostoru.

Studie [12] k parametru EDT zmiňuje, že tato hodnota je citlivá na geometrické změny v místnosti (právě na hodnotě EDT se zásadně projeví změna směru prvotních odrazů). V prostorech, kde se hodnota EDT a doby dozvuku víceméně shodují, je možné předpokládat velmi difuzní zvukové pole, naopak v místě, kde je hodnota EDT nižší, převládá zvuk přímý s prvotními odrazy.

4.1.2 BR

Poměr nízkých frekvencí (Bass Ratio), kde T_x odpovídá době dozvuku pro dané oktávové pásmo. L. Beranek tímto parametrem hodnotí vřelost hudby (Warmth). [13]

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (10)$$

4.1.3 HFR

Poměr vysokých frekvencí (High Frequency Ratio), kde T_x odpovídá době dozvuku pro dané oktávové pásmo.

$$HFR = \frac{T_{500} + T_{1000}}{T_{2000} + T_{4000}} \quad (11)$$

4.2 Energetická kritéria

Energetická kritéria zkoumají poměr přímých a odražených vln z vybraného časového úseku impulzové odezvy prostoru [11].

4.2.1 D_{50}

Zřetelnost (Definition) je poměr energie $p(t)$ přichází v prvních 50 ms ku celkové energii.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty}} \quad (12)$$

4.2.2 C_{50}

Míra zřetelnosti (Clarity) se využívá jako kritérium srozumitelnosti pro mluvené slovo a je dána poměrem zvukové energie přicházející do 50 ms ku energii přicházející po této době. Udává se v dB.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}} \quad (13)$$

Kritéria D_{50} a C_{50} jsou důležitým faktorem při hodnocení srozumitelnosti řeči.

4.2.3 C_7

Míra přímého zvuku je definována jako poměr zvukové energie přicházející do prvních 7 ms ku energii přicházející po této době.

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{7 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_7}{E_{\infty} - E_7} \quad (14)$$

4.2.4 C_{80}

Míra jasnosti udává poměr zvukové energie přicházející do 80 ms ku energii přicházející po této době.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} = \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}} \quad (15)$$

Kritéria C_7 a C_{80} jsou důležitým faktorem při hodnocení poslechu hudby. Ideální hodnoty jsou pro parametr C_{80} podle [10] uváděny podle typu hudby takto:

- Varhanní hudba, pomalejší hra na dechové nástroje 0 ± 2 dB
- Hra na smyčcové nástroje (i v rychlejším tempu), sborový zpěv 2 ± 2 dB
- Hra na drnkací a trsací nástroje (i v rychlejším tempu) 4 ± 2 dB
- Hra na nástroje s perkusním průběhem 6 ± 2 dB

4.2.5 G

Síla příchozí energie (strength of arriving energy) je důležitá pro hodnocení efektu sálu na hladiny zvuku v něm. Je možné ji definovat jako subjektivně vnímanou hlasitost v měřeném sále. Tento parametr vychází z poměru zvukové energie v daném měřicím místě a ve vzdálenosti 10 m od téhož zdroje umístěném ve volném poli. Z podstaty této hodnoty je jasné, že se při různých měřeních může hodnota lišit z důvodu jiné kalibrace reference. Pro určení referenční hodnoty se využívá různých metod. L. Beranek uvádí, že to může vést k rozdílu změřených hodnoty až o 1 dB.

Dále také tvrdí, že nejdůležitější hodnota je pro kmitočty 500 a 1000 Hz, která by měla být v rozsahu 4 až 7,5 dB. [14] Beranek také uvádí, že je možné využít takzvaný Bass Index k popisu vřelosti hudby místo BR. Bass index se rovná rozdílu hodnoty G pro 125 Hz a pro střední kmitočty. [13]

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} g^2(t) dt}{\int_0^{\infty} g_A^2(t) dt} \quad (16)$$

4.2.6 ST

Parametr vyjadřující podporu sálu (support) určenou z poměru přímé a odražené energie.

ST_{early}

Tento parametr vyjadřuje vnímání vlastní hry a je měřen ve vzdálenosti 1 m od zdroje zvuku. Jeho hodnota je určena z impulzové odezvy jako rozdíl mezi zvukem, který je označován jako prvotní odraz – časové rozmezí 20 až 100 ms po příchodu přímého zvuku a zvukem přímým v součtu s odrazem od podlahy – časové rozmezí 0 až 10 ms. [15]

ST_{late}

Tento parametr vyjadřuje vnímání dozvuku a je měřen ve vzdálenosti 1 m od zdroje zvuku. Jeho hodnota je určena z impulzové odezvy jako rozdíl mezi zvukem odraženým, který je naměřen v časovém rozmezí 100 až 1000 ms po příchodu přímého zvuku a zvukem přímým v součtu s odrazem od podlahy – časové rozmezí 0 až 10 ms.

4.2.7 LF

Míra boční energie (LF) je definována jako poměr energie přicházející k posluchači odrazem v prvotní fázi šíření zvuku od zdroje ku celkové energii v prvotní fázi. Vyjadřuje to, jak moc je posluchač obklopen prvotními odrazy v daném prostoru – to odpovídá subjektivnímu parametru známému jako ASW (viz níže). Důležitost této hodnoty byla vyzdvihována především

H. Marshalllem a M. Barronem [16]. Hodnota LF je získána z měření impulzní odezvy mikrofonom s osmičkovou směrovou charakteristikou p_L a mikrofonom s všesměrovou směrovou charakteristikou p .

$$LF = \frac{\int_{5\text{ ms}}^{80\text{ ms}} p_L^2(t) dt}{\int_{0\text{ ms}}^{80\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (17)$$

4.2.8 IACC

Činitel interaurální vzájemné korelace (InterAural Cross Correlation Coefficient) udává korelaci mezi signály přicházející do pomyslného levého a pravého ucha umělé hlavy. Využívá se k vyjádření množství zvuku přicházejícího odrazem od bočních stěn místnosti. Vysoké hodnoty IACC pak značí malou prostorovost. [6] [17]

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int p_r^2(t) dt}} \quad (18)$$

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, \quad -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms} \quad (19)$$

kde p_l je impulzová odezva prostoru snímaná u levého ucha

p_r je impulzová odezva prostoru snímaná u pravého ucha

t značí časový posun mezi body vyhodnocení impulzových odezev z levého a pravého ucha

t_1 a t_2 značí různé integrační časové meze

t_1 je nejčastěji = 0 ms, t_2 = 80 nebo 100 ms tak, aby byly zahrnuty pouze prvotní odrazy.

4.3 Další často používaná kritéria

K těmto obecně používaným objektivním kritériím existuje řada dalších, které jsou významné pro hodnocení konkrétních prostor. Jako příklad uvedme 7 základních bodů, které zdůrazňuje L. Beranek v práci Concert Hall Acoustics 2008 [18] pro akustiku koncertních sálů (vše uvádí na příkladu Boston Symphony Hall).

Patří k nim:

- Doba dozvuku – u které samozřejmě platí, že velmi záleží, jaký konkrétní typ skladby je v sále hrán.¹
- ITDG – doba, kdy k posluchači dorazí první odraz. Pokud je tato hodnota nad 35 ms, bude znít sál spíše jako hala nebo aréna. Optimální hodnota je okolo 15 ms.
- Zákon první vlnoplochy zabývající se rozpoznáním směru přicházejícího zvuku před uběhnutím 100 ms.
- ASW – „zdánlivá šířka zdroje“ je subjektivní kritérium vypovídající o velikosti zdroje zvuku vnímané posluchačem. Ta je ovlivněna množstvím energie v prvních 100 ms přicházející k posluchači ze stran a je měřena buďto pomocí IACC (interaural cross correlation coefficient) nebo pomocí LF (lateral fraction).
- ELV – míra obklopení posluchače po uplynutí 100 ms. Po tomto časovém úseku by měl být posluchač již obklopen zvukem a zároveň tak již není schopen správně určit směr odkud jednotlivé zvuky přišly.²
- Energie přímého zvuku nesmí být v poměru k celkové energii nižší než -10 dB. V tomto tvrzení vychází Beranek ze studií provedených Griesingerem, který také tvrdí, že příliš nízká úroveň přímého signálu nebo příliš vysoká úroveň prvotních odrazů přispívá k dojmu vzdáleného a nečistého (doslova „muddy“) zvuku. [19]
- Textura – jak subjektivně působí jednotlivé odrazy před uběhnutím 100 ms na posluchače. Dobrá textura značí velký počet brzkých odrazů rovnoměrně časově vzdálených a amplitudově vyrovnaných.

Hodnoty objektivních kritérií vypovídají o zkoumaném prostoru a lze z nich odhadnout možné příčiny. Faktorům ovlivňujícím akustický prostor se věnuje následující kapitola. Pro uzavření kapitoly o kritériích, kterými objektivně hodnotíme akustiku zkoumaného prostoru uvedme citaci z prezentace „Why do concert halls sound different“ D. Griesingera [20]. Ta v několika bodech uvádí vliv odrazů v místnosti na zkoumaná kritéria:

- „Odrazy v časovém rozsahu 10 až 100 ms snižují zřetelnost. Prvotní odrazy jsou nejproblematictější.“
- „Odrazy od zadní stěny jeviště jsou jedny z prvotních a interferují silně s přímým zvukem, čímž snižují zřetelnost“
- „Odrazy od bočních stěn jsou žádoucí v předních částech sálu, v zadních jsou opět více na škodu.“
- „Odrazy frekvencí nad 700 Hz směřující do hlediště mohou v zadních částech sálu zvětšit hodnotu poměru přímých ku odraženým vlnám a tím zlepšit poslech.“

¹ Doba dozvuku by se pro koncertní sály měla pohybovat v rozmezí 1,8 až 2,2 s v pásmu 500 až 1000 Hz. Kratší časy jsou žádoucí pro hudbu období klasicismu a delší pro hudbu období romantismu [29]

² V tomto bodě se Beranek odvolává na výzkum, který provedl Morimoto a spol. [62]

5 Faktory ovlivňující akustický prostor

5.1 Rozměry a tvar prostoru

Rozměr prostoru a také poměr délek jednotlivých stěn prostoru má vždy silný vliv na akustické vlastnosti prostoru. To se může nejvíce projevit na nízkých kmitočtech, kvůli nerovnoměrnému rozložení vlastních módů místnosti pod Schroederovým kritickým kmitočtem. Z toho důvodu je žádoucí toto zohlednit již při samotném návrhu dispozice prostoru a vyhnout se soudělným poměrům délek jednotlivých stran, tedy zvolit poměr například 5:3:2. V případě soudělného počtu poměrů délek nastane situace, kdy jeden rezonanční kmitočet bude módem místnosti pro více než jednu stranu a jeho účinek se tak bude násobit. Takovéto nedostatky je pak velmi obtížné opravit akustickými úpravami. [2] Samotný objem a s ním spojený počet diváků je také velmi zásadní pro celkové akustické vlastnosti prostoru. Pro hudební a divadelní sály, kterými se tato práce zabývá, se nejčastěji počítá se sály o kapacitě necelého tisíce diváků až po několikatisícové sály. M. Barron [21] rozděluje sály podle kapacity – do 800, do 1500 a nad 1500 diváků. Sály do 800 diváků je akusticky poměrně jednoduché ošetřit, ale zároveň je takové ošetření těžko ekonomicky udržitelné, takže se příliš často nestaví – alespoň ne pro komerční využití. Sály střední velikosti (800 až 1500 diváků) mohou prý být považovány za optimální pouze s několika málo nutnými kompromisy v rámci akustického návrhu. U velkých sálů (nad 1500 diváků) uvádí, že je nutné počítat s kompromisy. Zadní řady již mohou být ve větší než optimální vzdálenosti od hlediště a balkóny mohou zasahovat hluboko do prostoru sálu.

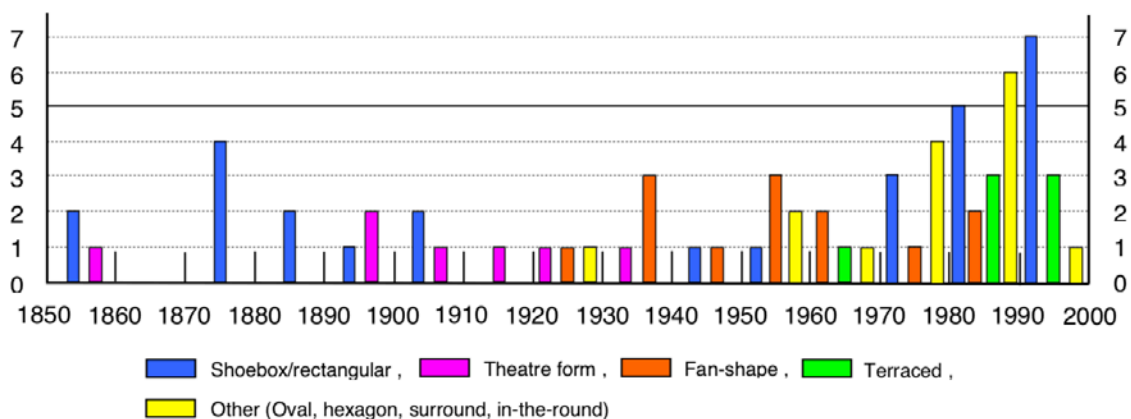
Tvar místnosti má téměř srovnatelný vliv na výslednou akustiku prostoru jako jeho rozměr. Tvarem lze především ovlivnit směr odrazů dopadající akustické energie. Tohoto se často využívá v divadlech či koncertních sálech. Je zde stanovené odkud a jakým směrem je třeba, aby se propagoval zvuk co nejlépe a rovnoměrně. Za tímto účelem se tak používá například orchestrální mušle, jejíž tvar se postupně rozevívá směrem k hledišti a směřuje tak velké množství prvotních odrazů od hudebníků a herců tímto směrem. [22]

Prvotní odrazy nejsou posluchačem vnímány jako oddělený zvuk, ale jsou v lidském sluchovém ústrojí spojeny s přímým zvukem a do určité míry tak mohou posílit vnímanou celkovou hlasitost zvuku. [23] Toto je často popisováno jako Haasův jev. [6] Rovnoměrná distribuce zvuku k divákům je navíc podpořena správně umístěnými rozptylovými prvky.

Nejen na rozměr sálu, ale i tvar je tedy nutné dbát již v počátečních fázích návrhu a nelze počítat s tím, že jakýkoli akustický nedostatek vzniklý unikátním architektonickým návrhem bude možné vyřešit v pozdější fázi projektu, jak bylo potvrzeno například ve studii z roku 2016. [24] Proto také platí, že ani za použití stejných, v jiném případě velmi dobře fungujících materiálů, nemusí být výsledná akustika v pořádku. Zároveň je nutné říct, že k vyhodnocení navržených tvarů pomocí existujících metod je nutné stanovit přesné parametry použitých materiálů, což může být v rané fázi projektu obtížné.

Na téma použitých materiálů a různých tvarů sálů vznikl výzkum „*Relationship between room shape and acoustics of rectangular concert halls*” [25], ve které A. K. Klosak vytvořil akustickou simulaci 24 koncertních sálů tvaru „shoebbox“ za použití stejných materiálů, ale s jinými tvary. Jedním z výsledků této studie je potvrzení, že použité tvary v koncertních sálech mají obrovský vliv na akustické parametry (C80, G atd.).

V dnešní době se ve světě nachází nespočet koncertních sálů různých velikostí i tvarů, většinu z nich je však možné rozdělit do několika kategorií podle tvaru prostoru. Tvary nově vznikajících sálů se postupně vyvíjely. Podle údajů nashromážděných v práci Barrona [26], zahrnující koncertní sály vzniklé od 19. století až do současnosti, se oblíbenost různých typů sálu v průběhu času u architektů lišila. Z grafu (obrázek 6) níže je patrný časový vývoj stavby jednotlivých typů sálů. Jiné tvary než základní „krabice od bot“ se začaly objevovat až ke konci první poloviny 20. století. V této době se objevuje větší množství sálů ve tvaru vějíře. Ke konci minulého století se s tvary sálů více experimentuje a objevují se sály terasovité ale i s naprosto novými a unikátními tvary [27].



Obrázek 6: Počet a typ koncertních sálů během let 1850 až 2000 [26]

Běžně rozdělujeme koncertní sály podle tvaru prostoru na tyto 3 základní skupiny.

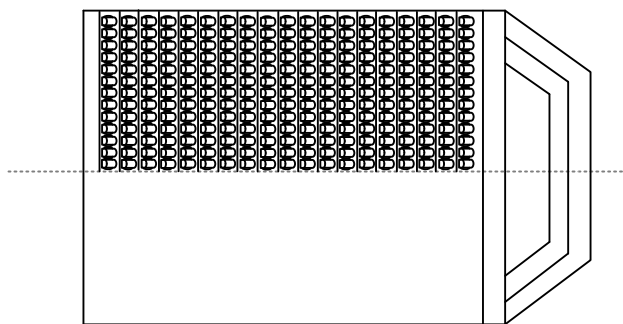
5.2 Sály s pravoúhlým tvarem

Někdy nazývaný „shoebox – krabice od bot“ je základní tvar používaný již mnoho století a je možné, že inspirací mu byly i původně taneční sály jakým je například vídeňský Redoutensaal z roku 1752 [26].

Sály tohoto typu se vyznačují rovnoběžnými stěnami, které zajišťují krátký čas prvotních odrazů, zajišťujících dobré obklopení posluchače. Zároveň však mohou tyto často rozsáhlé rovné plochy způsobit vznik stojatého vlnění a ozvěny [28], z toho důvodu jsou na boční stěny sálů umísťovány difuzní prvky [29].

Je také značný rozdíl mezi tím, kdy je hlediště stupňované směrem nahoru, a kdy je v jedné rovině. Pokud hlediště stoupá, dochází k velmi rychlému utlumení postranních odrazů v publiku, což má za následek menší obklopení posluchačů, na druhou stranu toto uspořádání velmi pomáhá potlačit vznik stojatého vlnění. [21]

Ve výčtu nejlepších koncertních sálů z pohledu akustiky v několika studiích L. Beranka dominuje vždy právě tento typ sálu, a to nejen kvůli velkému množství odrazů přicházejících k posluchači velmi brzy (hodnoty LF), ale také proto, že akustika je téměř v celém sále neměnná [30].



Obrázek 7: Typický tvar sálu s pravoúhlým půdorysem [28]

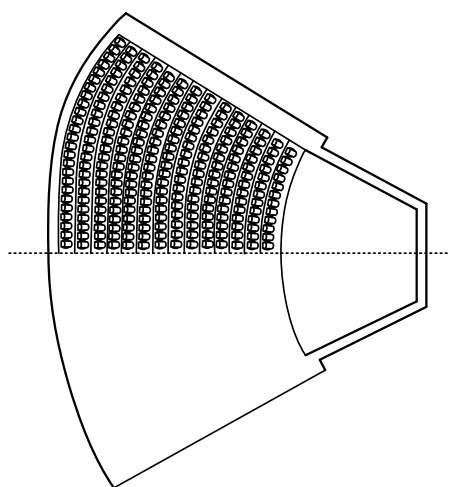
5.3 Sály tvaru vějíře

Sál tohoto typu se směrem od jeviště postupně rozvírá, boční stěny tak nejsou rovnoběžné. V sále je díky zaoblenému tvaru sezení možné zajistit dobrou přímou viditelnost pro velký počet diváků. Tvar bočních zdí velmi snižuje možnost vzniku stojatého vlnění a zadní zaoblená zeď snižuje množství odraženého zvuku přímo zpět na pódium. Zároveň je zde ale

menší množství prvotních odrazů od bočních stěn, které jsou mnohdy uváděny jako velmi důležité pro celkový dobrý dojem z akustiky sálu (především k obklopení posluchače). [28] Právě kvůli méně difuznímu poli v prvotní fázi je v těchto sálech velmi rozdílná akustika v závislosti na místě v hledišti (navíc rozdíly nejsou systematické, nýbrž lišící se místo od místa). Zároveň jsou patrné systematické rozdíly v akustické charakteristice od přední do zadní části sálu. [31] K tomu může přispět také zaoblení zadní stěny, která může soustřeďovat zvuk ve velmi malém prostoru hlediště. [21]

J. S. Bradley [32] porovnal akustické vlastnosti Salle Wilfrid Pelletier tvaru vějíře s vysoce hodnocenými sály typu „shoobox“ a dospěl k těmto závěrům: Hodnoty G jsou o 6 dB nižší, takže stejný zdroj zvuku by byl slyšet v tomto sále slaběji čímž je snížen i dynamický rozsah. Zadruhé jsou v sále SWP nižší hodnoty LF, což značí, že zvuk neobklopuje posluchače tolik, jako v ostatních sálech.

Tyto sály nejsou povětšinou hodnoceny příliš kladně co se jejich akustických vlastností v porovnání se sály typu „krabice od bot“ týče. Předností těchto sálů je větší počet diváků blíže jeviště.



Obrázek 8: Typický tvar sálu s půdorysem ve tvaru vějíře [28]

5.4 Sály typu vinice

Speciálním případem jsou pak sály typu vinice (vinyard), někdy taky označovány jako „surround“, ve kterých je orchestr uprostřed sálu a diváci sedí okolo pódia na stoupajících terasách obklopující jeviště podobných těm na vinicích. Akustika v těchto sálech může být problematická, některé zdroje uvádějí, že zvuku v sálu může chybět pocit obklopení, zdroj zvuku působí díky nedostatku odrazů jako zdánlivě malý a pocitově působí dozvuk v sále jako velmi krátký. [33] Beranek [30] hodnotí jako nejlepší sál tohoto typu Berlin Philharmonie Hall z roku 1963, tedy období, kdy se stávaly stavby těchto unikátních a často komplikovaných sálů populární. V tomto sále sedí téměř polovina obecnstva za jevištěm nebo po jeho stranách a Beranek poznamenává, že vyvážení orchestru se značně mění s pozicí v hledišti. Tento nedostatek sálu přikládá tomu, že vyzařovací charakteristika jednotlivých nástrojů orchestru je velmi rozdílná. [6] Tento fakt uvádí Beranek na příkladu klavírního koncertu (křídlo s otevřeným víkem), kdy v zadní části sálu (při pohledu na čelo jeviště za ním, nezávisle na vzdálenosti od samotného jeviště) jsou slyšet pouze nízké tóny, ty vysoké se k posluchači vůbec nedostanou.³ Další vliv na tyto nevyváženosti má samozřejmě také to, že posluchači sedící po stranách sálu jsou mnohem blíže jedné části orchestru. Podobně jako sály typu vějíře se i u tohoto sálu dostává posluchači menší množství prvotních odrazů a nejsou používány pro potřeby opery či muzikálů.

³ Tento závěr vychází pravděpodobně ze studie Takayuki Hidaka, na které se Beranek podílel. [64]

5.5 Akustické úpravy prostoru

Správně fungující akustiku není ve většině případů možné vytvořit pouze pomocí správných tvarů prostoru. Pro zlepšení akustických vlastností se využívá akustických prvků. Akustické prvky se umísťují především do prostorů, kde je kladen zvýšený důraz na poslech hudby, přednesu či jiné performance. Tyto prvky jsou navrhovány s ohledem na zmíněná objektivní kritéria v závislosti na určení prostoru. Akustické prvky lze rozdělit do tří hlavních kategorií podle jejich funkce.

Zprvu jde o prvky absorpční, které pohlcují značnou část dopadající zvukové vlny a její energii přeměňují na energii tepelnou. Toho je docíleno například vysokou porézností materiálu, v jehož malých dutinkách se energie postupně utlumí, jak bylo nastíněno v kapitole 2.2.

Tyto prvky se používají především v menších prostorech, kde je nežádoucí příliš mnoho akustické energie. Ve velkých koncertních sálech je naopak akustická energie vysoce ceněna, protože orchestr jí vyprodukuje pouze omezené množství, a tak se absorpční prvky používají výrazně méně. [34]

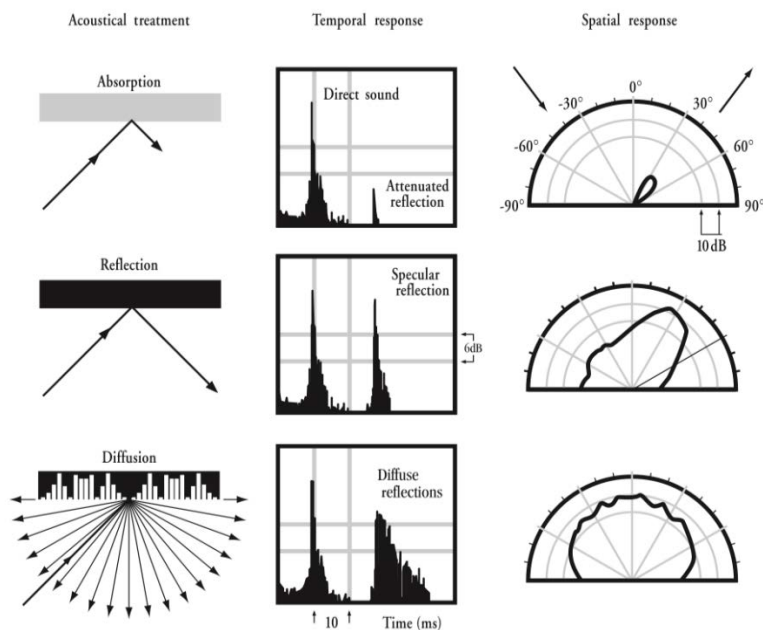
Další jsou prvky rezonanční, které jsou tvořeny pružnou deskou či membránou. Ta při dopadu akustické vlny začne rezonovat svým rezonančním kmitočtem. Za rezonančním prvkem je vzduchová mezeza, která po dopadu akustické energie postupně tlumí kmitání rezonátoru, a tím potlačuje onen rezonanční kmitočet (či jeho okolí), na který je prvek naladěný. Tyto prvky se často využívají ve spojitosti s prvky porézními. Na stěnu je umístěn rezonanční prvek odsazený vzduchovou mezerou, za kterou je porézní prvek. Tímto způsobem je docíleno lepších tlumících účinků tohoto prvku. [2] Těchto prvků je využíváno především k tlumení nízkých kmitočtů, které jsou jinak obtížně utlumitelné prvky porézními.

Posledními prvky jsou takzvané difuzory. Tyto prvky slouží k rozptýlení akustické energie do prostoru, nikoli k jejímu utlumení. Jako difuzor funguje v podstatě cokoli z materiálu, který má nízký koeficient pohltivosti a zároveň je velmi členitý. Přicházející akustické vlny s vlnovou délkou menší, než je velikost jednotlivých částí difuzoru jsou odrazeny do prostoru různými směry podle tvarování difuzního materiálu.

V menších prostorách se difuzory využívají k rozptýlení zvuku, který by se jinak odrazil příliš rychle přímo směrem k posluchači a s velkou intenzitou, což by mohlo vést k zabarvení tónů zvuku („coloration of the timbre“). [34] Pomáhají také k vytvoření difuzního pole a potlačují vznik hřebenového filtru. V menších prostorech může přidáním difuzních prvků dojít k pocitovému zvětšení místnosti.

Použití difuzních prvků a jejich pozitivní efekt nebyl vždy znám. Například v Londýnské Royal Festival Hall byl k zamezení vzniku ozvěny od zadní stěny použit absorpční materiál, nikoli difuzor, a prostor tak v sále přichází o tolik nutnou energii zvuku. [34]

Jako difuzní prvek v prostoru často působí i to, co na první pohled jako akustický prvek nevypadá. V době vzniku jedné z nejvíce oceňovaných koncertních sál, vídeňské Grosser Musikvereinssaal, difuzory nebyly používány, avšak v sálech z této doby byla i přesto velmi dobrá akustika. To proto, že většina volných ploch byla zdobená, a tedy tvarově nepravidelná – difuzní.



Obrázek 9: Časové a prostorové charakteristiky pohltivých, odrazných a rozptylných prvků. [22]

6 Šíření zvuku a prostorová akustika velkých sálů

Pro uvedení této kapitoly je citována pasáž z díla L. Beranka k tomu, jak velkou váhu má pro celkový dojem z vystoupení samotný sál.

„Vzrušení z poslechu Bachovy Mše h moll, Beethovenovy Deváté nebo Mahlerovy Osmé symfonie není určeno jen kvalitou orchestru a interpretací dirigenta, ale je nesmírně ovlivněna dynamickou odezvou samotného sálu. Odezvou je míněna jak podpora tiché pasáže pianissima, tak majestátní úrovně fortissimo.“ [1]

Prostorová akustika velkých sálů je velmi komplexní, závisí na mnoha aspektech a ve výsledku, jak tvrdí sám Beranek, může ovlivnit samotnou skladbu stejně jako samotní hudebníci nebo dirigent.

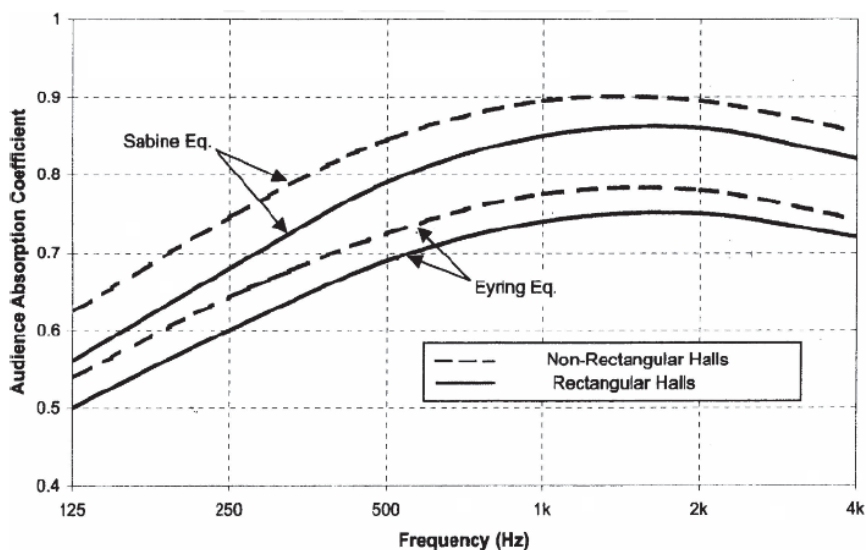
V koncertních sálech, orchestrech a ostatních prostorech tohoto typu je vždy dáno, kde se bude nacházet hlavní zdroj zvuku. To napomáhá při návrhu prostoru tak, aby byla zvuková energie vyzařována co nejlépe a rovnoměrně z tohoto místa směrem k posluchačům. K těm musí směřovat dostatečné množství prvotních odrazů, čehož je dosahováno pomocí tvarování orchestrální mušle – velmi pomáhá lichoběžníkový tvar pódia a sklon stropu. [35] Tvarové řešení samotného prostoru pódia je také velmi důležité pro samotné hudebníky, kteří jsou schopni ve správně akusticky navrženém prostoru lépe vnímat svou hru a své okolí, což přispívá k celkové souhře hudebního tělesa. V prostorech pro hudebníky je třeba brát ohled na to, že v případě rovnoběžnosti stěn či stropu a podlahy hrozí vznik stojatého vlnění na určitých kmotočtech, a tedy hřebenového filtru. V důsledku stojatého vlnění může hráč vnímat svou hru jako nevyrovnanou.

Dalším důležitým poznatkem je podle V. L. Jordana [36], že již na pódium by mělo dojít k propojení jednotlivých hudebních nástrojů. Z toho vyvozuje, že hodnota EDT by měla být nižší na pódium než v místě posluchačů. Jako první dorazí k posluchači přímá vlna od hudebního tělesa. Na jejím základě si posluchač dělá podle Zákona první vlnoplochy (Law of the first wavefront) přehled o tom, odkud zvuk přichází. Následující podstatnou částí šíření zvuku sálem k posluchači jsou prvotní odrazy. To jsou odrazy žádoucí. Odrazy, které dorazí v prvních 100 ms utváří zdánlivý dojem velikosti zdroje (ASW). V tomto čase také posluchač přijde o možnost lokalizace zdroje, neboť by již mělo docházet k jeho obklopení

(Envelopment). Prvotní odrazy přicházejí (kromě přímé vlny) po nejkratší možné cestě, odrazem od stropu a od bočních stěn. V konkrétních případech samozřejmě závisí na výšce stropu a šířce sálu. Ve většině sálů je proto snaha tyto odrazy co nejlépe distribuovat směrem k posluchačům. Na strop a stěny v blízkosti pódia se z tohoto důvodu umísťují především odrazné a někdy rozptylné prvky. Uzpůsobení těchto prvků vždy záleží na rozměrech daného prostoru a nelze stanovit jednotné a vždy funkční řešení.

Další odraz zvuku nastává od zadní části jeviště, což například v případě opery či divadla z části vyřeší dobře navržené kulisy. Ještě kritičtější je však odraz od zadní stěny sálu. V sálech, které vznikaly před několika stoletími, byly na zadních stěnách často umístěné členité zdobné prvky, které ve výsledku působí jako difuzní povrch. Při stavbě nových moderních sálů se naopak přihlíželo k čistému a jednoduchému designu s rovnými křivkami bez zdobení. Takové povrchy mají jen velmi malé možnosti rozptýlit zvuk, a hrozí tak vznik stojatého vlnění či ozvěny (především v případě rovné zadní stěny – viz tvary prostorů), a tak se v některých sálech přišlo s řešením v podobě mírného (přibližně 5°) naklonění zadních stěn tak, že směřují odrazy směrem vzhůru. [37] Další využívanou možností je umístit na zadní stěnu absorbující prvky, které vzniku ozvěn také zamezí, ale zároveň sníží celkovou úroveň hlasitosti v sále, což je ve velkých sálech nežádoucí.

Neméně podstatnou částí jsou sedadla a publikum samotné. To se ve velkých sálech, které jsou povětšinou jen málo obloženy pohltivými materiály, výrazně podílí na útlumu akustické energie. Beranek v mnoha svých pracích tvrdí, že pohltivost nezávisí tolik na počtu diváků, ale především na ploše, kterou zaujmají. To také potvrdil Barron a Coleman ve své práci. [38] Beranek dále upozorňuje na to, že tato pohltivost se mění v závislosti na konkrétním sále, protože se sály liší v tlumení vícenásobných odrazů v hledišti. To je způsobeno především různým tvarem bočních stěn a tím, zda je hlediště stupňovité, či nikoli.



Obrázek 10: Koeficient pohltivosti pro Sabinův, respektive Eyringův vzorec pro dva typy sálů. Klasický obdélníkový (průměr z 9 různých sálů) a neobdélníkový (průměr z 11 různých sálů). [1]

V sále samozřejmě dochází k velkému množství odrazů, nejen prvotních. Sekundární a následující odrazy mohou také velmi přispět celkovému pocitu obklopení posluchače, záleží však na tom, jak rychle k divákovi dorazí. Zároveň s přibývajícím počtem odrazů se zvuk tlumí a tvoří dozvuk samotného sálu. Je však jasné, že příliš mnoho odrazů, a tedy dlouhá doba dozvuku, může zastříť srozumitelnost a jasnost v sále – to však záleží i na typu přehrávané hudby.

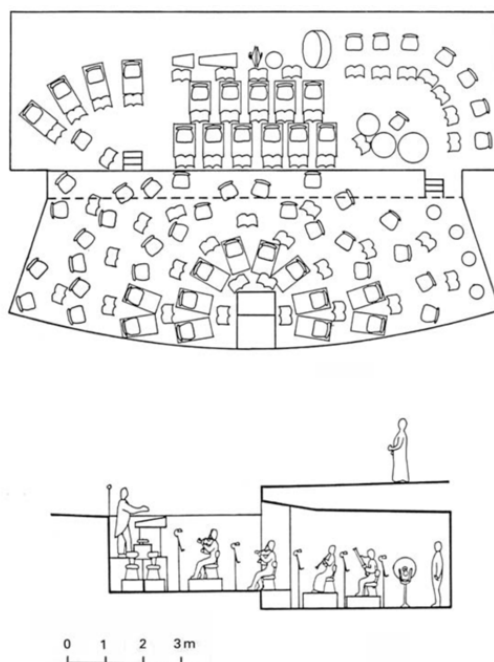
7 Orchestřiště

Podobně jako u koncertních sálů, i v divadlech jsou vysoké nároky na akustiku. V těchto prostorech je navíc velmi důležité dosáhnout vyvážení hudby a mluveného slova. Speciálním prostorem, kde je třeba řešit tvar, umístění v sále a použité materiály, jsou orchestřiště. Tento prostor pro muzikanty bývá upozaděn na úkor jeviště, kde se pro běžné diváky odehrává to nejdůležitější, a tak se nachází před jevištěm, velmi často navíc pod jeho úrovní. Vždy se také liší to, jak je z orchestřiště distribuována energie do prostoru sálu v závislosti na jeho konstrukci. Každé orchestřiště má pochopitelně jinou velikost, ale také hloubku, samotný tvar a použité materiály.

7.1 Základy konstrukce orchestřiště

Orchestr byl umístěn poprvé do vlastního vyhrazeného prostoru před jevištěm pravděpodobně na konci 16. století v době vzniku opery jako nové hudební formy. Prvním sálem, který vznikl pro účely veřejných (nejen pro vybranou šlechtu) operních představení a měl vyhrazený prostor pro hudebníky před jevištěm byl Teatro San Cassiano postavený roku 1637 v Benátkách. [21]

Umístění orchestřiště pod úroveň jeviště je dnes již standardem. Finální provedení se vždy liší a v závislosti na tom také akustické vlastnosti daného prostoru. Pro orchestřiště se většinou vymezí v sále velmi malý prostor, ve kterém jsou tak muzikanti velmi blízko sobě. Jedním ze základních bodů konstrukce orchestřiště je dobrá viditelnost dirigenta pro všechny hudebníky. To velmi často vede k tomu, že je v orchestřišti několik pohyblivých plošin a hudebníci tak nesedí v jedné výšce, jak je patrné na obrázku 11. [21]

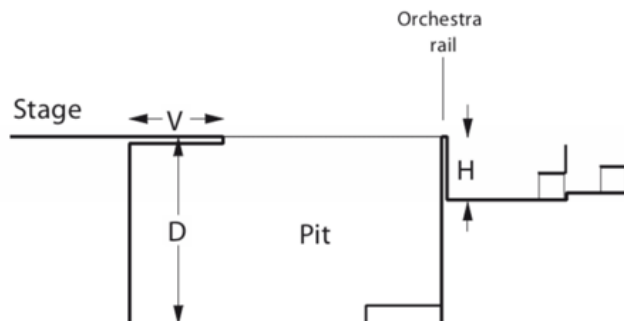


Obrázek 11: Příklad plošin v orchestřišti a rozmístění jednotlivých nástrojů [21]

Jak již bylo řečeno, rozměry orchestřišť se velmi různí. M. Barron uvádí typické rozměry orchestřiště na obrázku 12. Přední stěna oddělující hlediště a orchestřiště je obvykle v podobné výšce, jako jeviště. Pokud je tato stěna zaoblená podobně jako okraj předscény, na toto zaoblení je nutné dbát při výběru obkladového materiálu přední stěny. Čistě odrazný materiál by mohl způsobit koncentrování odrazů od konvexní stěny do jednoho místa a vytvářet tak nevyrovnanou akustiku v prostoru orchestřiště.

Překrytí orchestřiště V by standardně nemělo přesahovat 40 % celkové plochy orchestřiště. Míra zakrytí orchestřiště se však v různých sálech liší. Velikost překrytí by se měla spolu

s hloubkou D orchestřiště řídit tím, aby byl pro všechny muzikanty zajištěn alespoň nějaký vizuální kontakt se sálem. [21] Co se celkového rozměru týče G. Naylor [39] uvádí objem $1,5 \text{ m}^2$ na jednoho hudebníka. Podle průzkumu, který provedl A. Gade [40] byl průměrný objem dokonce $1,7 \text{ m}^2$ na jednoho hudebníka. Barron také uvádí, že rozměry orchestřiště by neměly být příliš velké. Šířka orchestřiště by podle něj měla být méně než čtyřnásobek délky orchestřiště (měřeno na ose sálu).



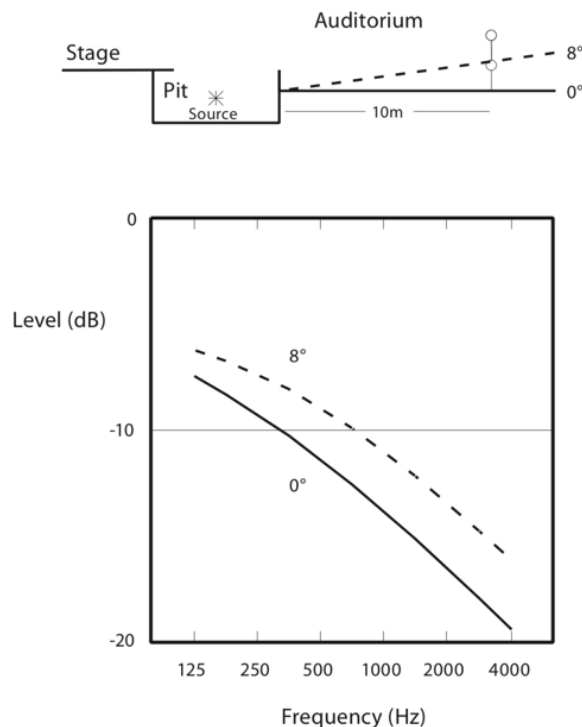
Obrázek 12: Rozměry orchestřiště podle M. Barrona. Typická velikost přesahu jeviště V 1-2 m, hloubka D 2,5-3,5m, výška zábradlí H 1 m [21]

Prostor orchestřiště může být také částečně zakryt předscénou, jak bylo zmíněno výše. Tím se jednak může dostat herec blíže publiku, a navíc se zmenší celková velikost vyzářovací plochy orchestřiště. Část zvuku z něj se nešíří rovnou ven, ale nejprve se odráží uvnitř, čímž se částečně utlumí, než unikne ven. Tyto odrazy mohou napomoci hudebníkům, protože ti tak lépe slyší sami sebe. Umístěním orchestřiště pod úroveň jeviště a jeho částečné zakrytí je provedeno právě z důvodu lepšího vyvážení orchestru a herců. To vše je ale na úkor toho, že v zakrytém orchestřišti může být hladina akustického tlaku nebezpečně vysoká, jak bylo prokázáno měřením. [41]

Blair [42] ve své práci z roku 1998 tvrdí, že dobrému šíření zvuku z orchestřiště pomůže zvětšení hloubky orchestřiště a šikmý strop – podobně jako je tomu v Bayreuth Festspielhaus. Podle jiné práce z téhož roku nemá zakrytí orchestřiště příliš vliv na poměr zvuku z orchestřiště a jeviště. Poměr se podle simulace provedené v rámci této studie Kodaňského královského divadla změnil jen pro část balkónů, kam se od nově přidané předscény odrážel hlas zpěváků. [43]

S šířením zvuku z orchestřiště také souvisí difrakce vlny na hraně výstupního otvoru orchestřiště. Difrakcí se část energie vystupující z orchestřiště ohýbá směrem do sálu. Obecně platí, že nízké kmitočty se „ohýbají“ lépe než ty vysoké, které se ve výsledku z orchestřiště šíří přímo, podle již zmíněné teorie šíření paprsků. Jak moc se zvuk ohýbá a tlumí na hraně orchestřiště v závislosti na frekvenci uvádí M. Barron na obrázku 13.

Akustické výpočetní programy často pracují právě za pomoci geometrické akustiky, která ve svém základu s difrakcí nepočítá. Jsou ovšem modely, které tento fenomén berou v potaz. Pro příklad uveďme „Biot-Tolstoy exact solution for wedge diffraction“ a „Stephenson’s uncertainty based diffraction model“, jejichž studii se věnuje například článek [44] a [45].



Obrázek 13: Útlum a ohyb zvuku vlivem difrakce na hraně zábradlí orchestřiště v závislosti na frekvenci [21]

Důležité při konstrukci akustiky tohoto prostoru je také zamezit úniku zvuku z orchestřiště do navázaných prostorů, a to hned ze dvou důvodů. Zaprvé je jakákoli ztráta uniklého zvuku nežádoucí, jelikož je v orchestřišti často menší počet hudebníků o celkovém nízkém akustickém výkonu. Zadruhé by se uniklý zvuk mohl vrátit zpět do orchestřiště s poměrně velkým zpožděním, a tedy jako dlouhá ozvěna, která by znesnadňovala hru orchestru.

7.2 Orchestřiště a šíření zvuku z něj

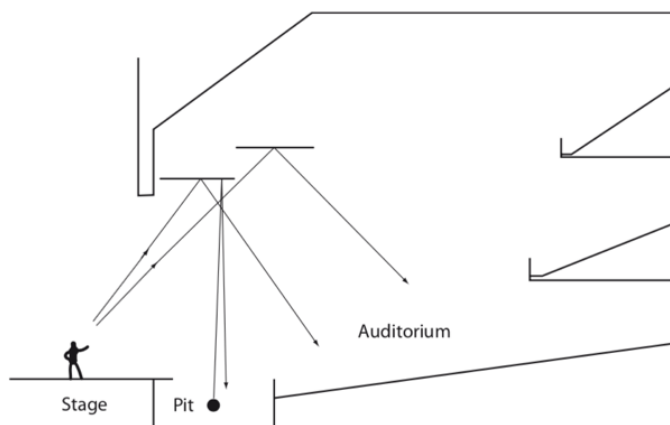
Do akustických úprav orchestřiště promlouvá množství velmi významných faktorů, které je nezbytně nutné brát v potaz. Hlavním cílem při akustickém ošetření je již zmíněné rovnoměrné šíření zvukové energie k divákovi a vyváženost hudby a zpěvu.

V předních řadách sálu může docházet k nerovnoměrnosti úrovně jednotlivých skupin nástrojů na vysokých frekvencích, jelikož jejich šíření lze do jisté míry zjednodušit na šíření paprsků. [6] V takovém případě je zřejmé, že k posluchači například zvuk od smyčcových nástrojů na jedné straně a žesťových na druhé, dorazí po úplně jiné dráze, a tedy i v rozdílný čas. Dalším úskalím šíření zvuku z orchestřiště je podobně jako u klasických sálů správné nasměrování zvuku.

Tak jako u koncertních sálů je dostatečné propagace akustické energie správným směrem možné dosáhnout tvarováním předscény (orchestrální mušle). Postupným rozevíráním jejího klenutí je odražena velká část akustické energie směrem do sálu. [21]

V případě orchestřišť však navíc není mnohdy přímá cesta od hudebního tělesa k divákům, a tak je nutné zvuk k nim distribuovat pomocí odrazných ploch zavěšených nad orchestřištěm. Jak ukazuje Barron [21], odrazné plochy nejsou využívány pouze ke směrování zvuku z orchestřiště, ale také od zpěváka. Rozdíl mezi nimi je dán jejich tvarem a také výškou ve které jsou zavěšené.

Na obrázku 14 je také znázorněno, že taková odrazná plocha může pomoci i muzikantům v orchestřišti odrazem části jejich zvuku směrem k nim. Takový odraz může zajistit žádaný kontakt hudebníka se sálem [21].



Obrázek 14: Použití reflektorů k podpoře hlasu zpěváků a poskytnutí zpětné vazby hudebníkům [21]

Tím, že prostor pro posluchače postrádá přímý zvuk, je komplikovanější určování objektivních kritérií, které zmínil Beranek [18] pro hodnocení akustiky sálů. Ta vycházejí právě z času, kdy k posluchači dorazí přímý zvuk a porovnávají ho s prvotním odrazem.

Vyvážení hlasitosti orchestru a zpěváků na scéně je druhý úkol, kterého je úpravou orchestrálního prostoru třeba dosáhnout. Je pochopitelné, že se zpěvák na jevišti silou svého hlasu nemůže rovnat množství energie generované mnohdy až stočlenným orchestrem. [21] Z pohledu hlediště je orchestr navíc před jevištěm, a tedy k posluchači blíže. To by mohlo vést k utopení zpěvu či mluveného slova z jeviště v hudbě. V neprospěch herců pracuje velmi často i samotné jeviště, na kterém může být často mnoho kulis, které jejich hlas utlumí, jak bylo prokázáno měřením několika německých operních sálů. [41] Pokud se zdroj zvuku na jevišti nacházel v zadní části a scéna byla převážně z pohltivých materiálů, zdroj byl velmi špatně slyšitelný.

Vyvážení obou složek lze samozřejmě ovlivnit mnoha způsoby. Prvním je změna počtu jednotlivých nástrojů orchestru. Menší počet hudebníků nebude vytvářet tak velký akustický výkon, čímž se sníží i celková akustická intenzita.

Vliv na tuto problematiku má ale také dirigent a jeho subjektivní dojem. Právě dirigent v orchestrálním prostoru působí jako propojení mezi orchestrem a děním na scéně. Dirigent by tak teoreticky měl zajistit, aby obě složky představení spolupracovaly a nepřevažovala jedna nad druhou.

Ani dirigent však nemůže tímto přístupem zachránit vše. Hudební nástroje mají své limity, jak tiše je na ně možné hrát, proto je důležité přistupovat k řešení otázky vyvážení jinak. Dirigent by měl mít za úkol pouze doladit drobné nesrovnalosti.

Samotná akustika orchestrálního prostoru, šíření zvuku v něm i směrem do sálu, je dána především velkým množstvím odrazných a rozptylných prvků, které zajistí nejen dobrou vzájemnou komunikaci, ale mohou i navodit hudebníkům dojem práce ve větším, ne tak stísněném prostoru, jakým orchestrální prostor je.

Použití různých typů prvků se liší sál od sálu. V orchestrálním prostoru se zřídka, pokud je to možné, vyskytují prvky absorpční, které by příliš ubíraly na síle orchestru. Jejich využití je tak především lokální pro utlumení nejhlasitější hrajících nástrojů – zejména perkusních. Použití absorpčních prvků tak přichází v úvahu pro ztlumení stropu orchestrálního prostoru za účelem snížení celkové hlasitosti v této části prostoru, ale také snížení hlasitosti v hledišti, pokud je nutné orchestr utlumit ve prospěch zpěvu z jeviště. [21] Příhodné místo pro použití pohltivých prvků je tedy v přední části orchestrálního prostoru, případně pokud je orchestrální prostor zakrytý, také na stropě. Jak bylo ukázáno ve studii částečně uzavřených orchestrálních prostorů R. Mackenzie [46], ztlumení stropu mělo za následek snížení hlasitosti v hledišti o 3 dB. Zároveň také platí, že hudebníkům se nehraje příliš dobře v přetlumené místnosti, chtějí slyšet odezvu sálu. Přílišné přetlumení místnosti by pak mělo za následek jejich o to hlasitější hru. [21] To potvrdila také výše zmíněná studie Kodaňského královského divadla, kde po přidání pohltivých prvků na

přední stěnu nedošlo k zamýšlenému zlepšení poměru orchestru a zpěváků. Hudebníci po této změně slyšeli méně sami sebe a hráli paradoxně hlasitěji než před provedenou úpravou. [43] Pohltivé materiály pracují nejlépe na vyšších kmitočtech a je tak také vhodné s nimi pracovat opatrně, aby nedošlo k přílišnému „otupení“ zvuku potlačením jeho vyšších frekvencí. Barron [21] dále poukazuje na studii [47], ve které se osvědčilo použití laděných tlumících prvků. Takovéto prvky byly umístěny právě na stropu orchestřiště a pomáhaly redukovat vznikající stojaté vlnění, které velmi negativně ovlivňuje hudebníky. Další možný přístup ke snížení hlasitosti orchestru ukazuje Barron na použití mobilních stěn k oddělení jednotlivých orchestrálních skupin v Sydney Opera House. [48] Tyto stěny zajistily lepší pracovní podmínky především pro hráče méně akusticky silných nástrojů, kteří byli díky nim schopni slyšet svou hru. Velmi užitečné je tak v návaznosti na toto v jakémkoli orchestřišti umístit několik tlumících prvků, které jsou mobilní a je možné je použít variabilně dle potřeby. Takovými prvky mohou být různé paravány nebo závěsy z těžké látky. Důležité je zmínit, že jako velmi pohltivý prvek v orchestřišti působí také samotní hudebníci. Obecně se také z toho důvodu více absorpčních prvků nepoužívá a orchestřiště je z největší části tvořeno kombinací odrazných a difuzních prvků.

7.3 Orchestřiště a pracovní podmínky pro hudebníky

Práce v orchestřišti je velmi náročná. Jak bylo již zmíněno, hudebníkovi ke hře velmi pomáhá, když slyší sám sebe a odezvu z prostoru, ve kterém hraje. To je ale v prostoru orchestřiště velmi komplikované. Barron [21] toto popisuje na teorii vázaných prostorů. Takové prostory jsou nejčastěji popisovány jako dvě místnosti, propojeny akusticky transparentním otvorem, z nichž je jedna s větším objemem a více zatlumená a druhá menší a méně zatlumená. V takovém případě dochází k tomu, že se při šíření zvuku v jedné z místností objeví tzv. double-sloped sound decay. Jedná se o dozvukovou křivku, která je tvořena dvěma částmi. V první části dozvukem daným samotnou vybuzenou místností a v druhé dozvukovou křivkou navázaného prostoru ze kterého se budící signál vrátil se zpožděním.

V případě orchestřiště a sálu má podle Barrona [21] toto vliv na vnímání odezvy sálu především pro hráče v zakryté části orchestřiště. Dozvuk vnímáný hudebníkem je v tomto prostoru tvořen v první části dozvukem samotného orchestřiště, který se standardně pohybuje mezi 0,35 až 0,7 s a až poté je slyšet dozvuk tak, jak ho vnímá posluchač v sále. Z toho plyne, že hráč v orchestřišti slyší odezvu sálu nejčastěji pouze v momentě, kdy nikdo okolo něj nehraje.

Posledním důležitým aspektem k zohlednění je celková úroveň hlasitosti v samotném orchestřišti. Ta může být pro hudebníky nepříjemná až nebezpečná. Existuje mnoho studií, které vycházejí nejen z průzkumů dotazujících se samotných hudebníků na jejich akustickou pohodu v orchestřištích, ale také z objektivních měření poukazujících na mnohdy nebezpečně vysoké hladiny akustického tlaku. [49] [50] Mnoho studií vyvrací vliv práce v orchestřišti na případné zhoršení sluchu (např. [51]), ale je pochopitelné, že vystavení vysoké hladině akustického tlaku vede minimálně k dočasné únavě sluchu a samotného hudebníka, což ve výsledku zhorší jeho celkový výkon. K této problematice vzniklo mnoho dotazníků, níže jsou uvedeny výsledky průzkumu, který vyplnili hudebníci ze 46 operních sálů a jehož výsledky popsaly hlavní problémy v orchestřišti. [52]

- Příliš vysoká hlasitost 69 %
- Málo prostoru 68 %
- Obtížnosti s rozmístěním sezení 48 %
- Neuspokojivá kvalita zvuku 36 %

Jak bylo řečeno výše, správně fungující akustika je důležitá také proto, aby jednotliví hudebníci dobře slyšeli sebe, ale i spoluhráče. V orchestřišti je toto navíc ještě důležitější,

protože hudebníci na sebe kvůli schodovitému uspořádání navzájem ne vždy vidí – nejznámějším příkladem je v tomto sál Festspielhaus Bayreuth.

Pokud je zajištěna dobrá komunikace mezi hudebníky, každému se hraje o poznání lépe. Podobně jako v případě klasického orchestru na jevišti, má hudebník tendenci hrát hlasitěji, pokud špatně slyší svou hru, vlivem například vzniklého stojatého vlnění či maskování. Takové podmínky vedou k nevyrovnanému poslechu pro diváka.

Problém s příliš velkým hlukem v orchestřišti lze někdy vyřešit velmi jednoduše právě tím, že se muzikanti lépe uslyší. K tomuto závěru došla po úpravách akustiky například studie z roku 2002. [53] V tomto případě došlo k mírnému ztlumení orchestřiště, po kterém došlo k výraznému snížení hladiny akustického tlaku během vystoupení. Došlo však také ke ztišení celkové hlasitosti orchestru, které nelze přičítat pouze ztlumením orchestřiště, ale právě tomu, že hudebníci hráli pravděpodobně tišeji.

7.4 Nové řešení orchestřišť

K tématu orchestřišť například v muzikálech se také objevují články, které volají po překonání systému orchestru skrytého pod scénou. [54]

S ohledem na to, že již nyní se občas pro zpěváky i pro orchestr používají mikrofony a nespolehá se tak jen na posílení obou těchto elementů za pomoci akustiky sálu, nabízí se otázka, zda nepřemístit orchestr mimo orchestřiště do odděleného prostoru. V odděleném prostoru nebude orchestr trpět nedostatkem místa a příliš vysokými hladinami akustického tlaku jako v orchestřišti. Tato změna by zároveň zajistila větší „prostor“ zvukovým inženýrům pro vyrovnávání celkového poměru zvuku orchestru a zpěváků.

Na druhou stranu by tím mohl utrpět celkový požitek diváka a autenticita takového představení. Samotné přemístění orchestru může být pak náročné především z hlediska zajištění správné komunikace mezi herci, dirigentem a orchestrem.

8 Příklady vybraných řešení orchestřišť

8.1 Divadlo J. K. Tyla v Plzni

Divadlo J. K. Tyla pochází z přelomu 18. a 19. století. Jeho sál je kapacitou menší, než zkoumaný sál Janáčkova divadla (cca 440 diváků a 2340 m³). [10]

Orchestřiště divadla J. K. Tyla slouží pro přibližně 40 hudebníků a bylo v nedávné době rekonstruováno. Orchestřiště je otevřené až na poslední pětinu jeho délky, která je překrytá. Na přední stěně je umístěn MLS difuzor, mimo to je možné na přední stěnu umístit dle potřeby mobilní závěsné pohltivé panely pro snížení celkové zvukové energie v orchestřišti. Dále byl na přední stěně použit nízkofrekvenční obklad, tedy rezonátor tvořený tenkou deskou rezonující na nízkých kmitočtech. Pro vysoké frekvence působí jako odrazný povrch. Na zadní stěně jsou opět difuzní MLS panely a nízkofrekvenční obklad. [55]

V prostoru divadla proběhlo měření v rámci prvního dílu publikace Akustika hudebních prostorů v České republice z roku 2008. Tato měření určila hodnoty důležitých akustických parametrů.

EDT

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,48	1,17	1,07	1,02	0,93	0,73

Tabulka 1: Naměřené hodnoty EDT v sále divadla J.K. Tyla

Hodnoty doby dozvuku T30 a EDT jsou téměř srovnatelné, T30 je uvedeno pouze jako průměr hodnot pro 500 a 1000 Hz – $T30_{mid} = 1,09$ s. Hodnoty BR = 1,30 a ITDG = 78 ms.

C80

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	500	1000	2000	4000
C80 (dB)	2,5	3,1	3,8	5,6

Tabulka 2: Naměřené hodnoty C80 v sále divadla J.K. Tyla

G

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
G (dB)	8,0	6,3	6,0	5,9	5,1	3,9

Tabulka 3: Naměřené hodnoty G v sále divadla J.K. Tyla

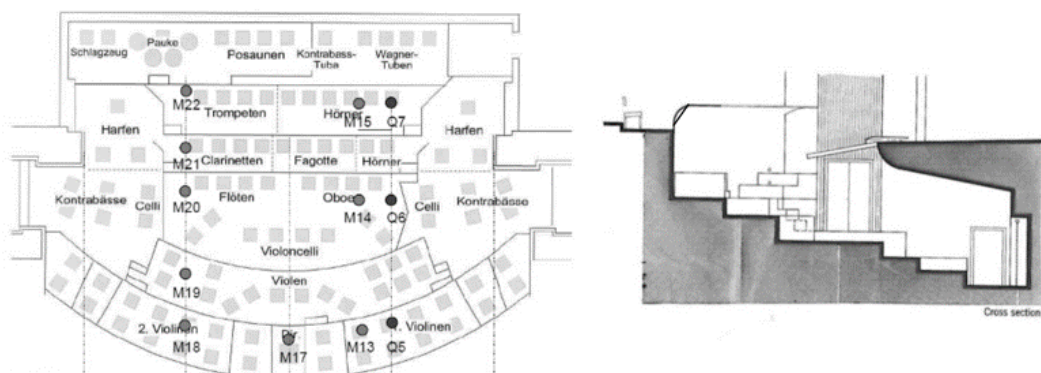
IACC_E

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
IACC _E (-)	0,94	0,79	0,39	0,30	0,27	0,26

Tabulka 4: Naměřené hodnoty IACC_E v sále divadla J.K. Tyla

8.2 Festspielhaus Bayreuth

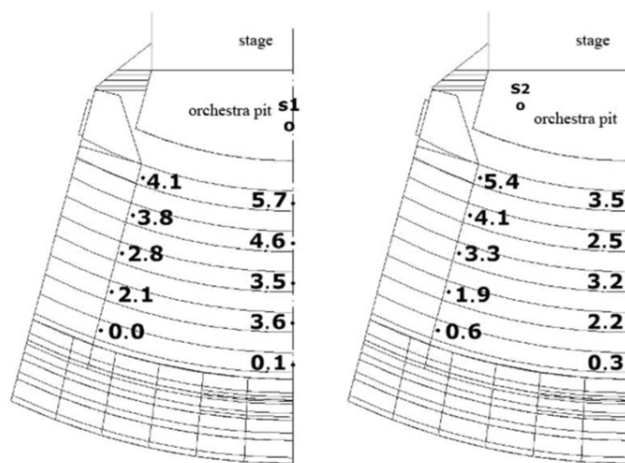
Toto orchestřiště vzniklo na základě požadavků již zmíněného Richarda Wagnera. Pojme až 120 hudebníků a od klasického řešení orchestřiště se liší svou celkovou koncepcí. Téměř celé orchestřiště je překryto, z jeho délky asi 6 m je pouze přibližně jedna čtvrtina otevřená. Orchestřiště také velmi prudce klesá, výškový rozdíl mezi podlahou pro žesťové nástroje a pro dirigenta je 2,5 m. Tímto je docíleno postupného „budování“ celého přednesu, jelikož jsou v tomto orchestřišti i nástroje rozmístěny atypicky, od nejsilnějších po ty slabší. Zvuk se pak otevřenou částí pomocí zahnutého „kšiltu“ odráží směrem na pódium odkud je až pak odražen směrem do hlediště. [41]



Obrázek 15: Bokorys a půdorys orchestřiště v sále Richarda Wagnera s rozmístěním jednotlivých nástrojů. [41]

8.3 Krakow Opera Hall

Orchestřiště o hloubce 3 m slouží pro přibližné 80 hudebníků a je z necelé jedné poloviny zakryto. Přední část podlahy je výškově nastavitelná, přední a zadní stěny jsou obloženy z odrazivého materiálu. Pohltivým materiálem je obložen strop pokrývající část orchestřiště. V rámci studie a měření byly získány hodnoty parametru G, ST_{early} a ST_{late}. Změřené hodnoty G pro kmitočty 500 Hz a 1000 Hz jsou mezi 4 a 5,5 dB. Hodnoty ST_{early} pro dvě různé polohy zdroje 11,2 a 12,7 dB a ST_{late} 19,5 a 19,8 dB. [56]



Obrázek 16: Distribuce parametru G_{mid} v prostoru hlediště sálu v Krakově [56]

9 Janáčkovovo divadlo v Brně

9.1 Sál

Janáčkovovo divadlo bylo vystavěno mezi lety 1961 a 1965 podle návrhu architekta Jana Vášky. Sál Janáčkového divadla má tvar „krabice od bot“. Jeho prostor nyní pojme 1055 diváků [57] a je určen především pro operní a baletní představení. Během jeho rekonstrukce před deseti lety se údajně také uvažovalo o uzpůsobení sálu pro pořádání symfonických koncertů [58]. Z této myšlenky nakonec sešlo. Podle údajů z roku 2008 [10] je však sál využíván pro konání koncertů brněnské filharmonie.

Při objemu sálu 8430 m^3 je objem na jednu osobu 8 m^3 . Barron [21] tvrdí, že pro operní sály je vhodná hodnota $7\text{--}9 \text{ m}^3$, čímž Janáčkovovo divadlo tomuto kritériu vyhovuje.

Sedáky i opěradla hlediště jsou silně čalouněná. Stěny a strop hlediště jsou převážně hladké a odrazivé. [10]

9.2 Orchestřiště

Prostor orchestřiště je z části překryt předscénou. Přední část je zaoblená, vysoká 2,6 m. Z pohledu sálu tak přední stěna orchestřiště vyčnívá nad úroveň podlahy o 55 cm a částečně tak stíní přímé cestě pro akustickou energii od orchestru do předních řad sálu. Prostor předscény překrývá zadní část orchestřiště v délce 3,1 m, otevřená část orchestřiště má na délku v ose 4,85 m, po krajích 3,2 m. Po stranách orchestřiště v zaklpené části je sloup s prostorem za ním. Okolo orchestřiště se nachází portál sloužící jako orchestrální mušle. Orchestřiště je obložené především dřevem s poměrně nízkým koeficientem akustické pohltivosti. Hloubka orchestřiště pod převisem je 2,2 m.

10 Stávající akustika Janáčkova divadla

10.1 Provedené měření

Akustika sálu Janáčkova divadla byla změřena v rámci prvního dílu publikace Akustika hudebních prostorů v České republice z roku 2008. Tato měření určila hodnoty důležitých parametrů. Stručný přehled je uveden níže.

EDT

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,37	1,45	1,55	1,53	1,53	1,25

Tabulka 5: Naměřené hodnoty EDT v sále Janáčkova divadla

T30

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 (s)	1,48	1,42	1,49	1,49	1,45	1,25

Tabulka 6: Naměřené hodnoty T30 v sále Janáčkova divadla

C80

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	500	1000	2000	4000
C80 (dB)	1,2	1,7	1,5	2,5

Tabulka 7: Naměřené hodnoty C80 v sále Janáčkova divadla

G

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
G (dB)	2,5	2,5	4,0	3,9	3,2	2,2

Tabulka 8: Naměřené hodnoty G v sále Janáčkova divadla

IACC_E

Střední frekvence oktáv. pásma (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
IACC _E (-)	0,96	0,90	0,66	0,54	0,42	0,38

Tabulka 9: Naměřené hodnoty IACC_E v sále Janáčkova divadla

BR = 0,97 a ITDG = 22 ms.

Základním problémem akustiky Janáčkova divadla v Brně je nedostatečné šíření zvuku z prostoru orchestřiště k divákům v předních řadách sálu. Toho je nutné dosáhnout s přihlédnutím k tomu, aby byla zachována dobrá komunikace mezi hudebníky a dirigentem (jak vizuální, tak akustická) a zároveň nedošlo k přehlušení herců orchestrem.

11 Model Janáčkova divadla

11.1 Využitý software

Ke zkoumání akustiky orchestřiště je v této práci využíván software EASE, který simuluje šíření akustické energie ve 3D modelu prostoru. Tento software pak vizualizuje slyšitelné zvukové pole podle numerických modelů či naměřených dat. [59]

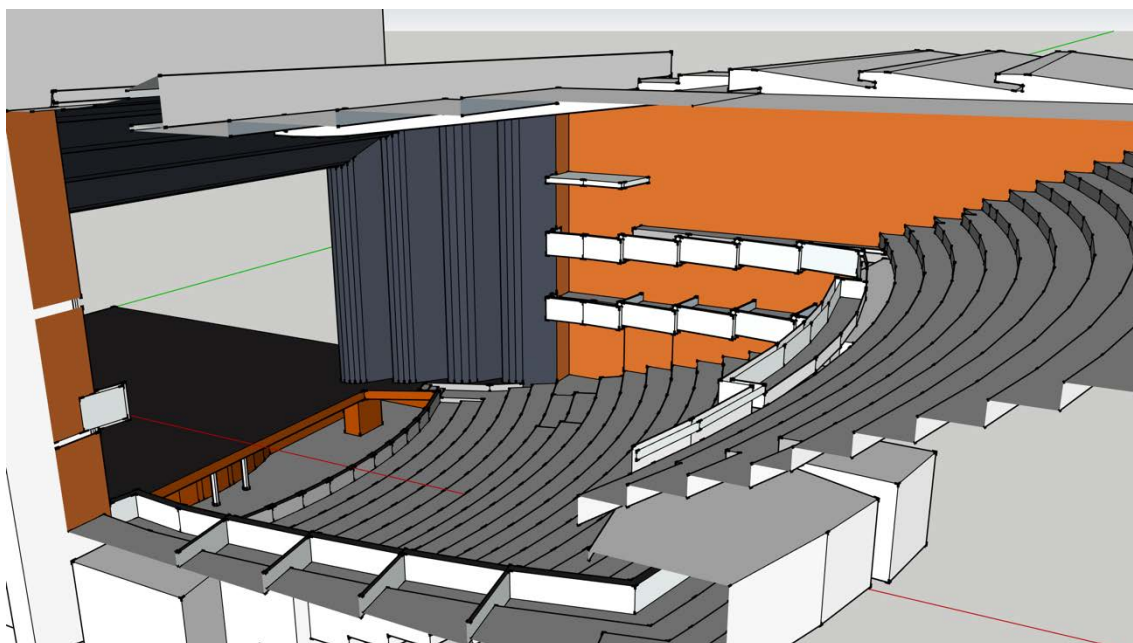
EASE ve spojení s modulem AURA (Analysis Utility for Room Acoustics) využívá hybridního ray-tracing modelu pro sledování paprsků šířících se ze zdroje zvuku, který je složen z deterministického obrazového modelu (Cone Tracing) a stochastických ray-tracing metod. [60] Tento modul umožňuje v modelu sálu spočítat většinu základních akustických parametrů jakými jsou doba dozvuku, EDT, LF, D a G a zobrazit tyto hodnoty ve zkoumaném

3D modelu. K těmto výpočtům využívá hodnoty pohltivosti použitých materiálů v prostoru pro jednotlivá kmitočtová pásma. Zároveň je také možné stanovit takzvaný scattering, tedy jak moc materiál rozptyluje akustickou energii.

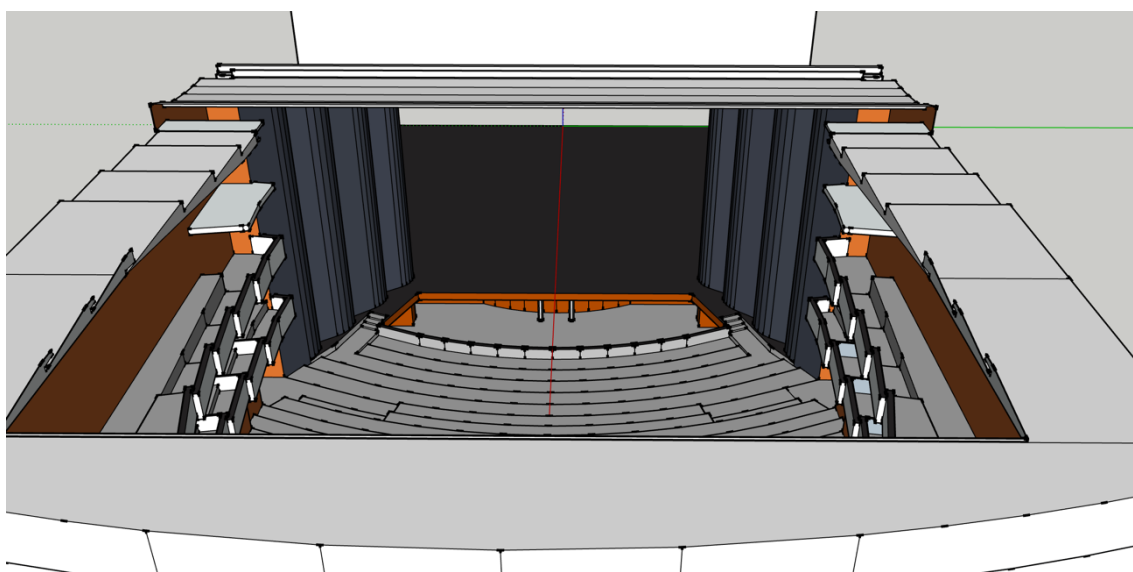
11.2 Vytvoření modelu

Dle architektonického plánu byl vytvořen model v programu SketchUp. Model byl vytvořen tak, aby ho poté bylo možné importovat do programu EASE, ve kterém byly provedeny samotné simulace akustiky.

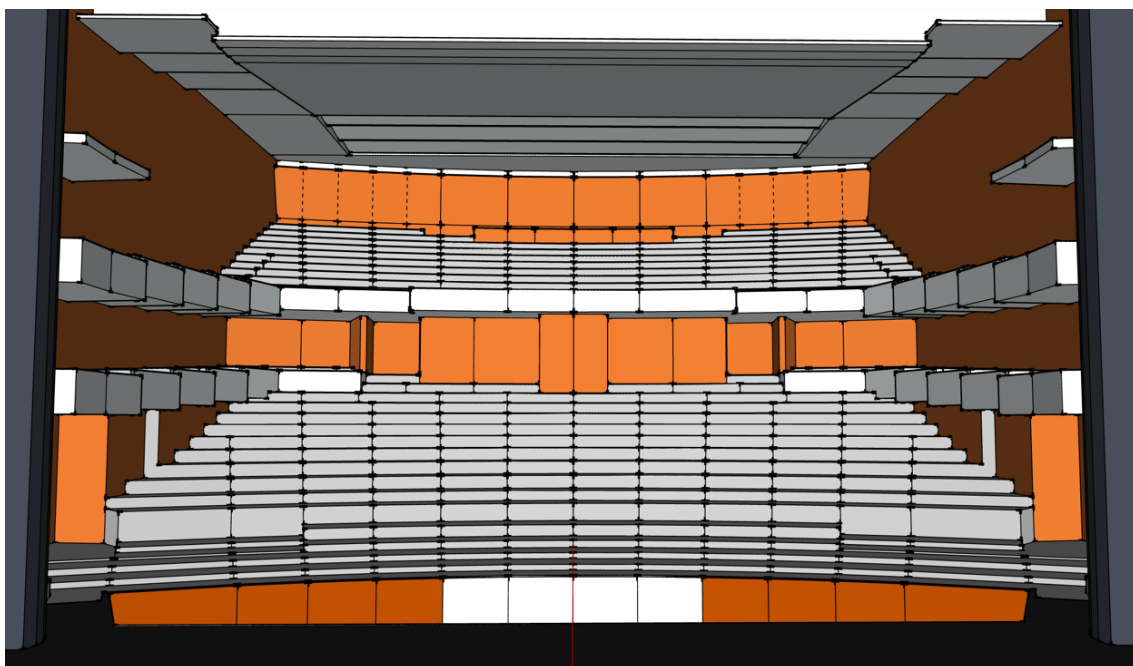
Po vytvoření modelu bylo nutné nastavit akustické parametry všech jeho ploch a toto nastavení korigovat podle skutečného měření provedeného v sále. Po této kalibraci modelu by měly simulace provedené v programu EASE odpovídat reálnému chování akustiky daného prostoru.



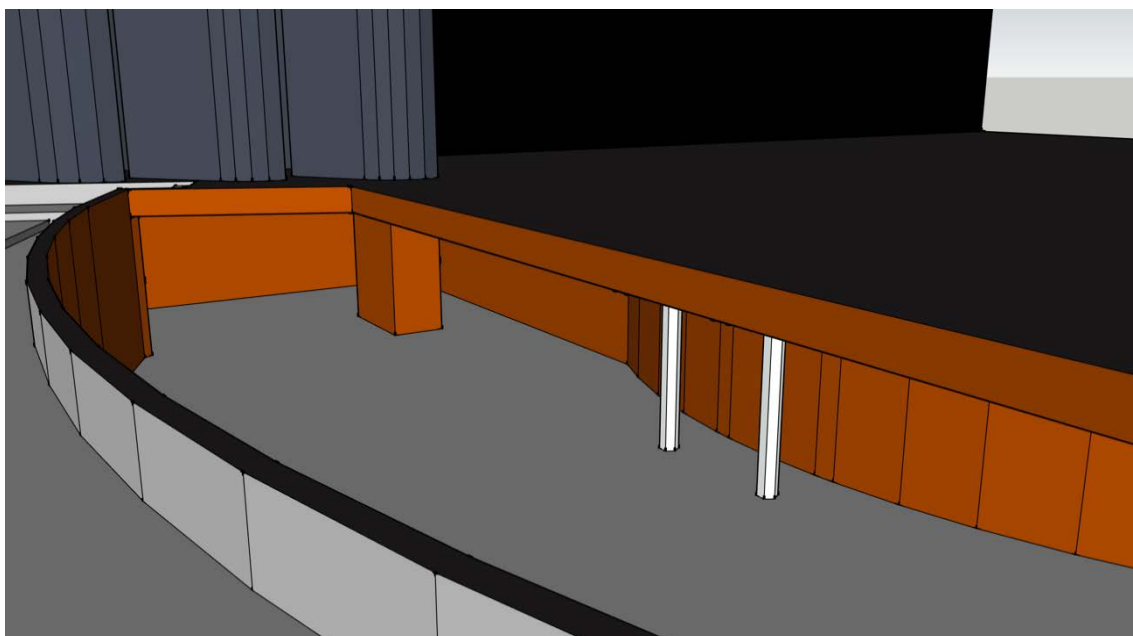
Obrázek 17: Model sálu Janáčkova divadla



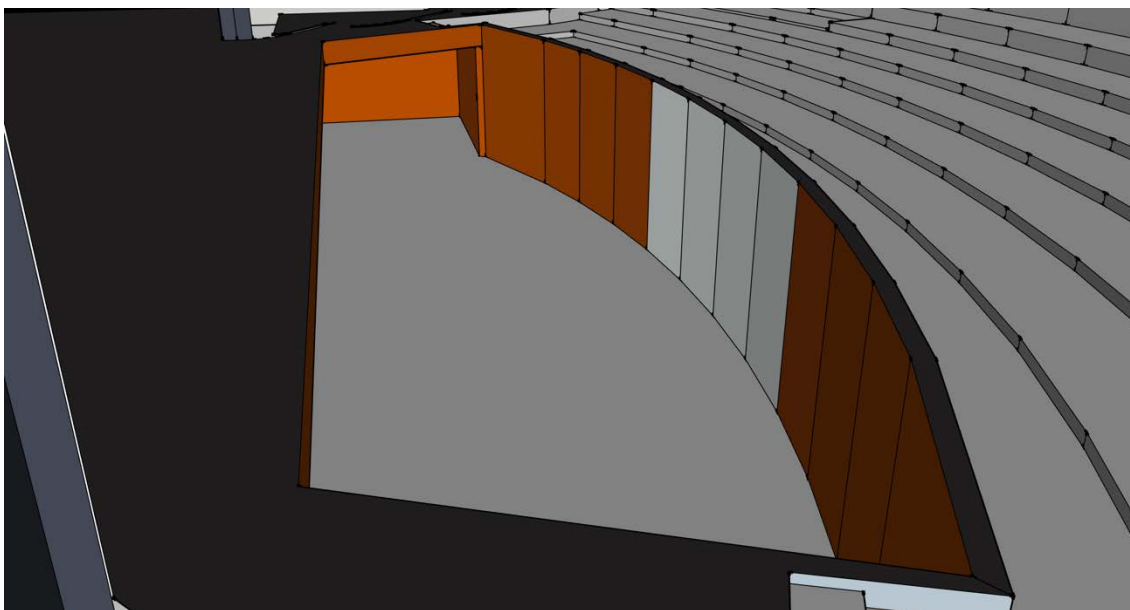
Obrázek 18: Model sálu Janáčkova divadla



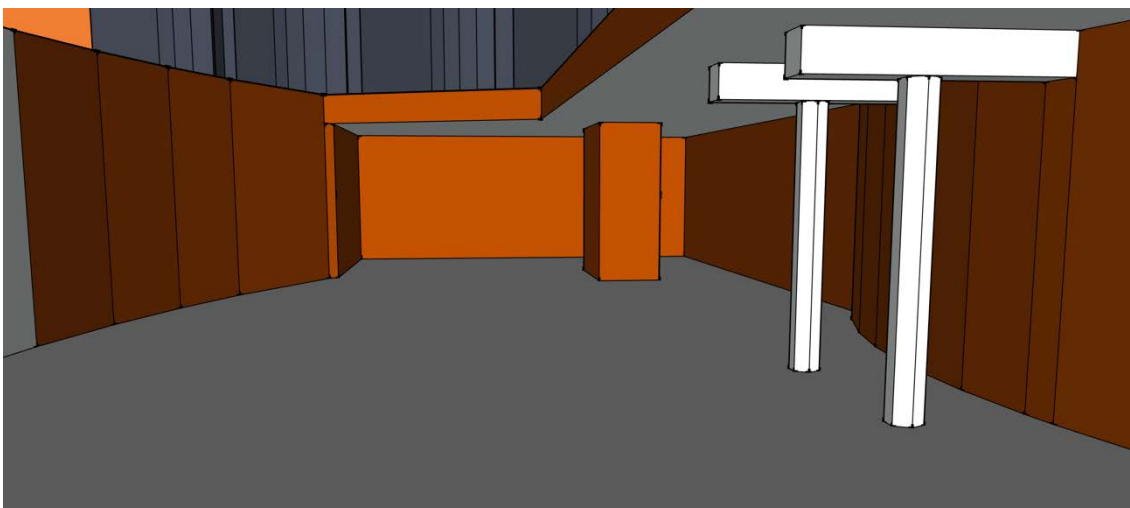
Obrázek 19: Model sálu Janáčkova divadla – pohled z jeviště



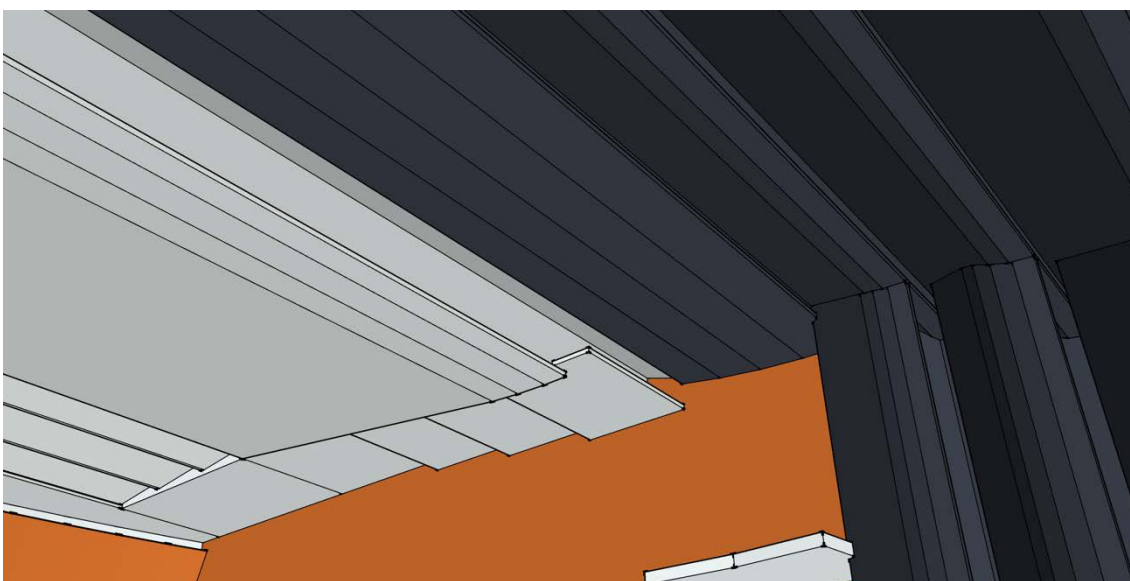
Obrázek 20: Model sálu Janáčkova divadla – pohled na zadní stěnu orchestřiště



Obrázek 21: Model sálu Janáčkova divadla – pohled na přední stěnu orchestřiště



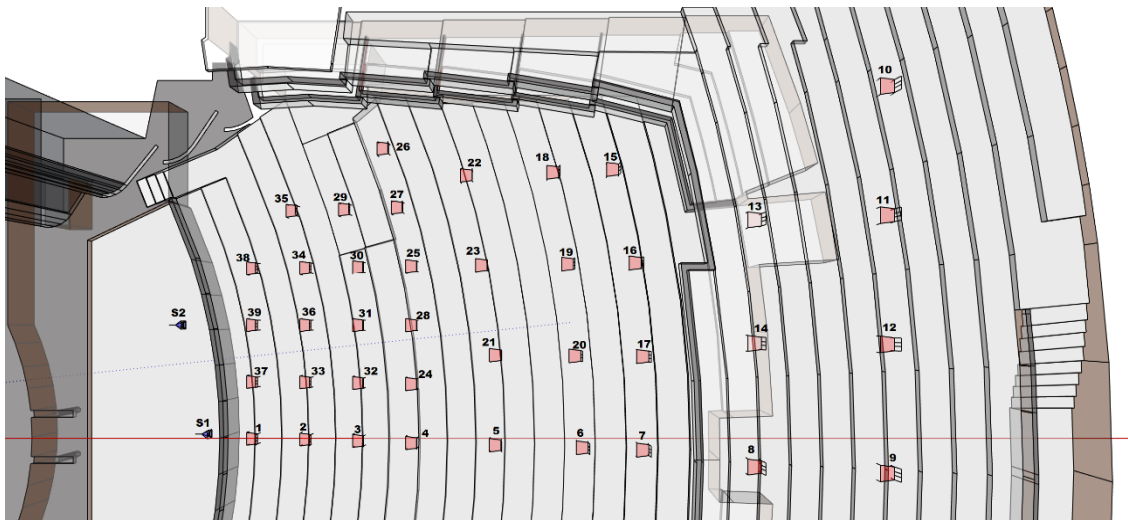
Obrázek 22: Model sálu Janáčkova divadla – pohled na boční stěnu orchestřiště



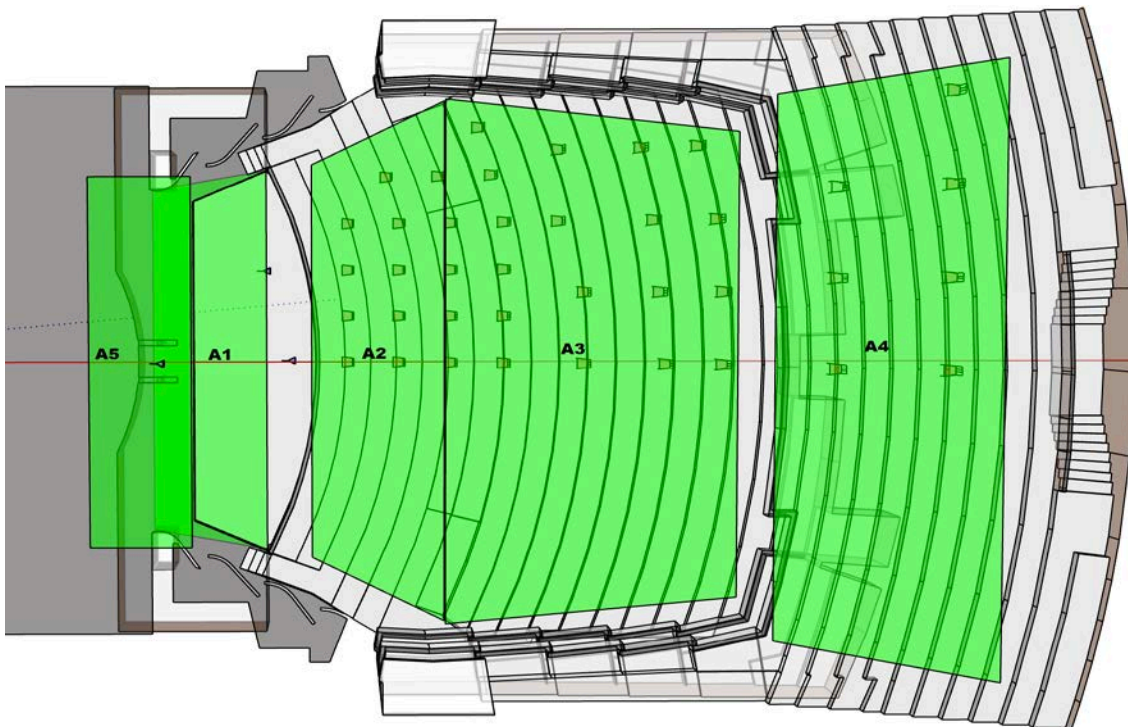
Obrázek 23: Model sálu Janáčkova divadla – pohled na strop a část orchestrální mušle

12 Provedené simulace

Před provedením simulace byly v orchestřišti umístěny všesměrové zdroje zvuku S1 a S2 ve výšce 1 m. Bylo vytvořeno několik pozorovaných prostorů. Tyto takzvané poslechové hladiny – plochy, ve kterých je v simulační programu poté možné vykreslit mapu jednotlivých parametrů – byly nastaveny přibližně ve výšce 1,2 m, tedy v úrovni hlavy sedícího posluchače podle normy ITU-R BS.1116-1. Tyto hladiny se hodí pro zobrazení akustického pole a všech jeho měřených parametrů v daném prostoru. Dále byly v simulaci nastaveny jednotlivé poslechové body (přesné místo v prostoru, ze kterého je možné odečíst jednotlivé parametry simulovaného prostoru). Tyto body se hodí pro porovnání změn v jednom konkrétním místě prostoru. Vzhledem k osově souměrnosti sálu byly umístěny pouze v jedné polovině hlediště. Stejně jako poslechové hladiny byly body umístěny ve výšce 1,2 m. Rozmístění bodů a jejich očíslování je znázorněné na půdorysu sálu (obrázek 24), stejně jako rozmístění poslechových hladin (obrázek 25).



Obrázek 24: Rozmístění měřících bodů v sále.

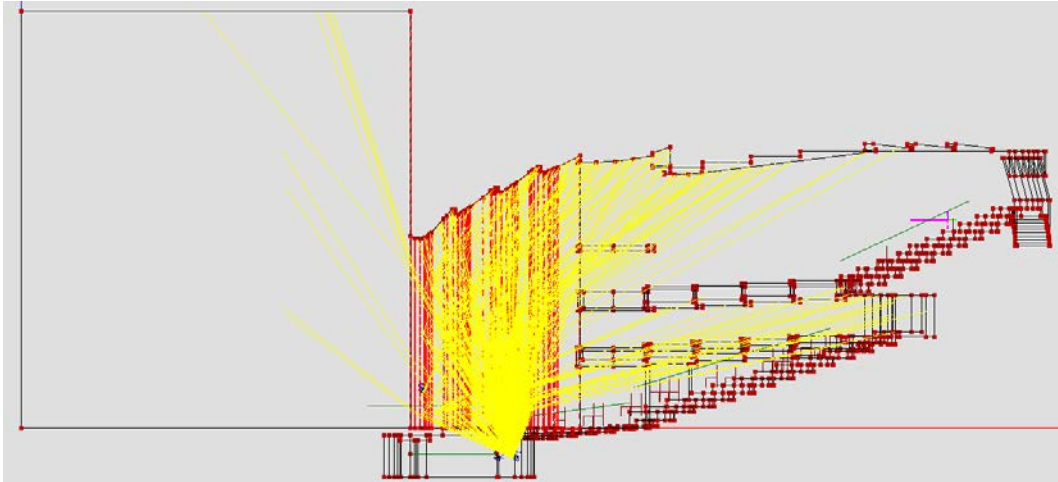


Obrázek 25: Rozmístění měřících hladin, které jsou používány pro vizualizaci akustického pole.

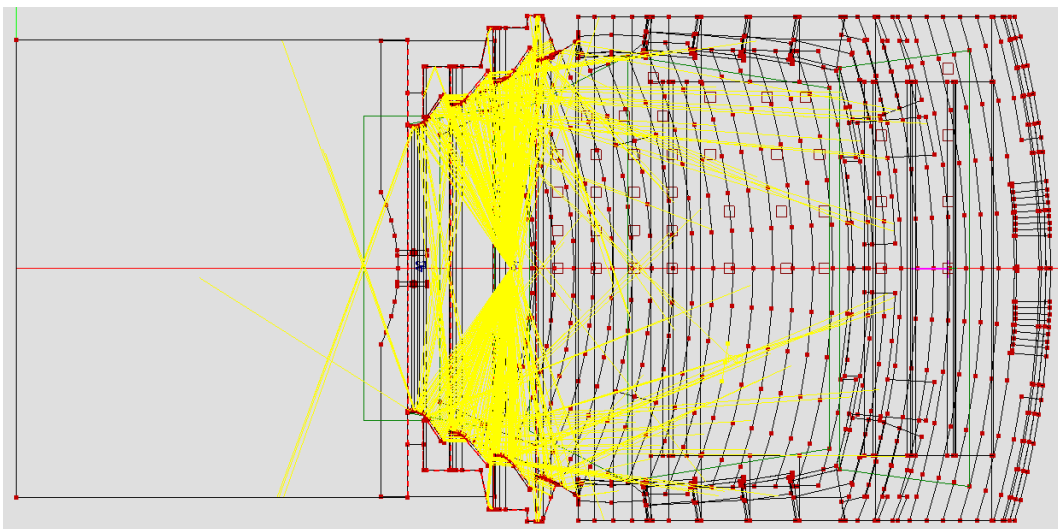
12.1 Simulace stávajícího stavu

12.1.1 Ray-tracing

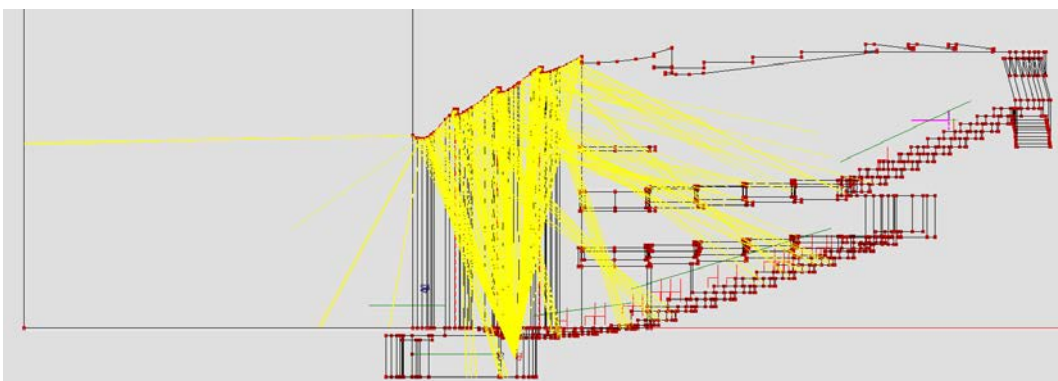
Simulace typu ray-tracing byla zaměřena na bokorys a půdorys sálu (obrázek 26 až obrázek 28). Z těchto pohledů je možné usoudit, jakým směrem je pomocí odrazů distribuován zvuk v prostoru sálu od zdroje v orchestřišti za pomoci orchestrální mušle nad orchestřištěm.



Obrázek 26: 5000 paprsků, zobrazeny jsou odrazy jen od boku mušle



Obrázek 27: 5000 paprsků, zobrazeny jsou odrazy jen od boku mušle



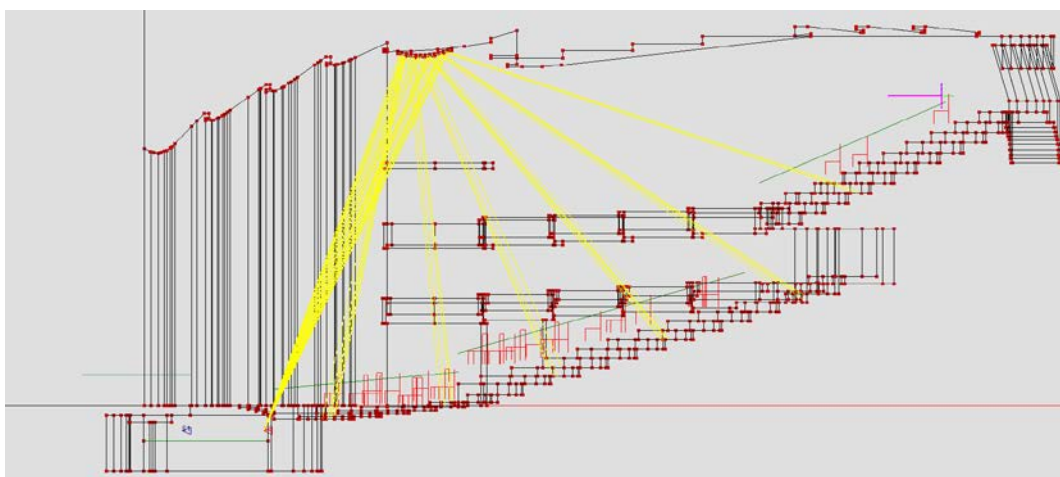
Obrázek 28: 5000 paprsků, zobrazeny jsou odrazy jen od vrchní části mušle

Simulace ray-tracing je silně závislá na umístění zdroje. S posunutím zdroje v orchestřišti by paprsky v simulaci mířily trochu jiným směrem. Pro účel studie funkce orchestrální mušle je toto však dostatečné.

Ze simulace ray-tracing prvního řádu bylo potvrzeno, že do prostoru předních řad se dostává tímto způsobem poměrně malé množství zvuku. Přímý zvuk se do prostoru sálu dostává pouze ze zadní části orchestřiště a ten se i tak dostane především do vyššího patra sálu. Přední řady, na které je tato práce primárně zaměřena, jsou cílem jen malého množství paprsků.

Následně byla ray-tracing simulace pokusně nastavena s parametry 1000 až 2000 paprsků na jeden zdroj, řád simulace 2 až 3 a vykresleny byly paprsky jen do útlumu 30 dB. Až při nastavení ztráty 60 dB jsou i přední řady sálu pokryty větším množstvím paprsků. To odpovídá tomu, že zvuku se do prostoru předních řad dostane, avšak až po větším množství odrazů, s výraznějším zpožděním a útlumem než do jiných částí sálu.

Podstatnou nevýhodou simulace ray-tracing v programu EASE je to, že zakulacené plochy v modelu jsou složeny z mnoha menších, ale rovinných ploch – k odrazu tak nedochází naprosto přesně jako by plocha byla zakulacená. To bylo patrné při testování zakulacených odrazných prvků – distribuce směru odrazů od takové plochy se mění skokově, ne postupně, viz obrázek 29.



Obrázek 29: Ray-tracing simulace modelu JD23 – skoková změna směru odrazu od „kulaté“ plochy

12.1.2 Simulace v modulu Aura

V modulu Aura programu EASE je možné zmapovat akustické pole zkoumaného prostoru a vykreslit v něm jednotlivé akustické parametry.

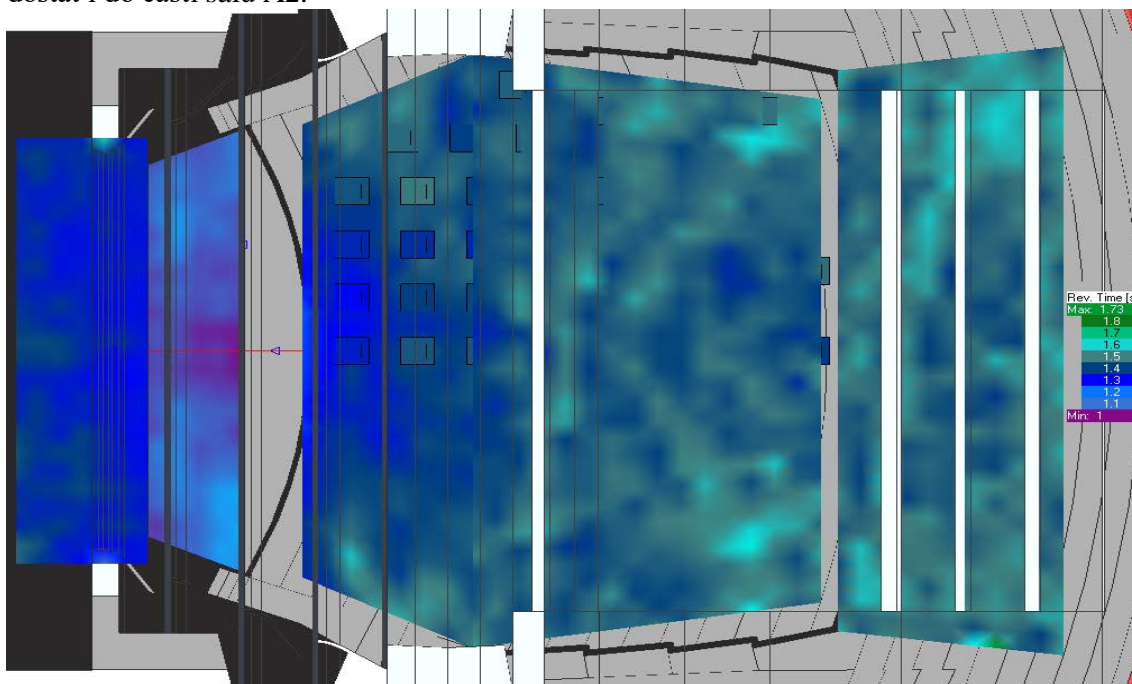
Prvním možným parametrem je „Direct SPL“. Tento parametr vypovídá o přichozím přímém zvuku od zdroje. Ve zkoumaném prostoru je na zdroj v orchestřišti přímá viditelnost pouze z vyššího patra sálu, a proto není tento parametr pro zkoumání akustiky předních řad sálu důležitý. Dalším parametrem je „Total SPL“, určující celkovou hladinu akustického tlaku v prostoru. Tato hodnota ukazuje pokles hladiny akustického tlaku na kmitočtech od 1000 Hz výše. Mezi frekvencemi 1000 a 2000 Hz a mezi 2000 a 4000 Hz dojde k poklesu až o 3 dB. Je přirozené, že hladina akustického tlaku na vyšších frekvencích klesá, tento pokles je však příliš velký a při poslechu může být slyšitelný.

S přihlédnutím k předešlým závěrům z ray-tracing simulace je patrné, že vyrovnanost hladiny akustického tlaku je dána odrazy vyššího řádu a přichodí zvuk v předních řadách je tak z velké části složený z mnohačetných a pozdních odrazů, nikoli z prvotních, které jsou velmi důležité.

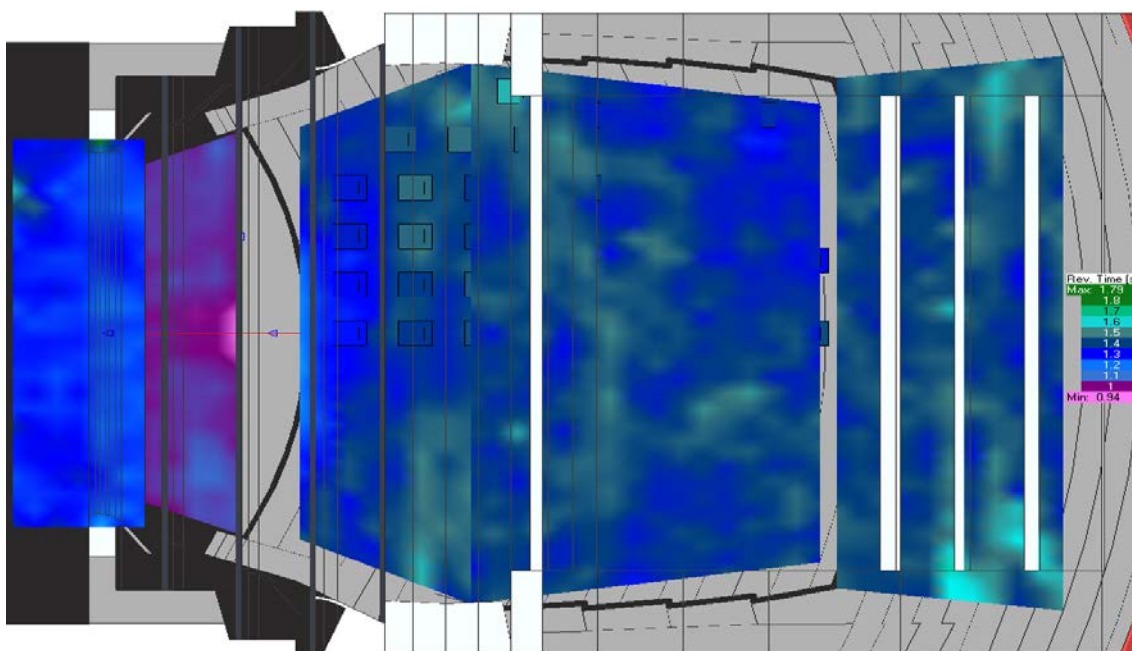
Toto se potvrzuje také zobrazením impulzové odezvy z místa v předních řadách hlediště. Podle té přichází první zvuk do této části sálu v poslechovém bodě 2 v čase 45 ms. Jedná se však o odraz od zadní hrany orchestřiště – od té se k posluchači ale dostane zvuk velmi zřídka. Protože plocha hrany orchestřiště není velká. Odražený zvuk od hrany orchestřiště navíc

nebude tvořit jednotný celek složený ze všech hrajících nástrojů. K teoretickému složení zvuku dochází až nad orchestřištěm. Další výrazné odrazy se v impulzové odezvě téměř nezobrazí.

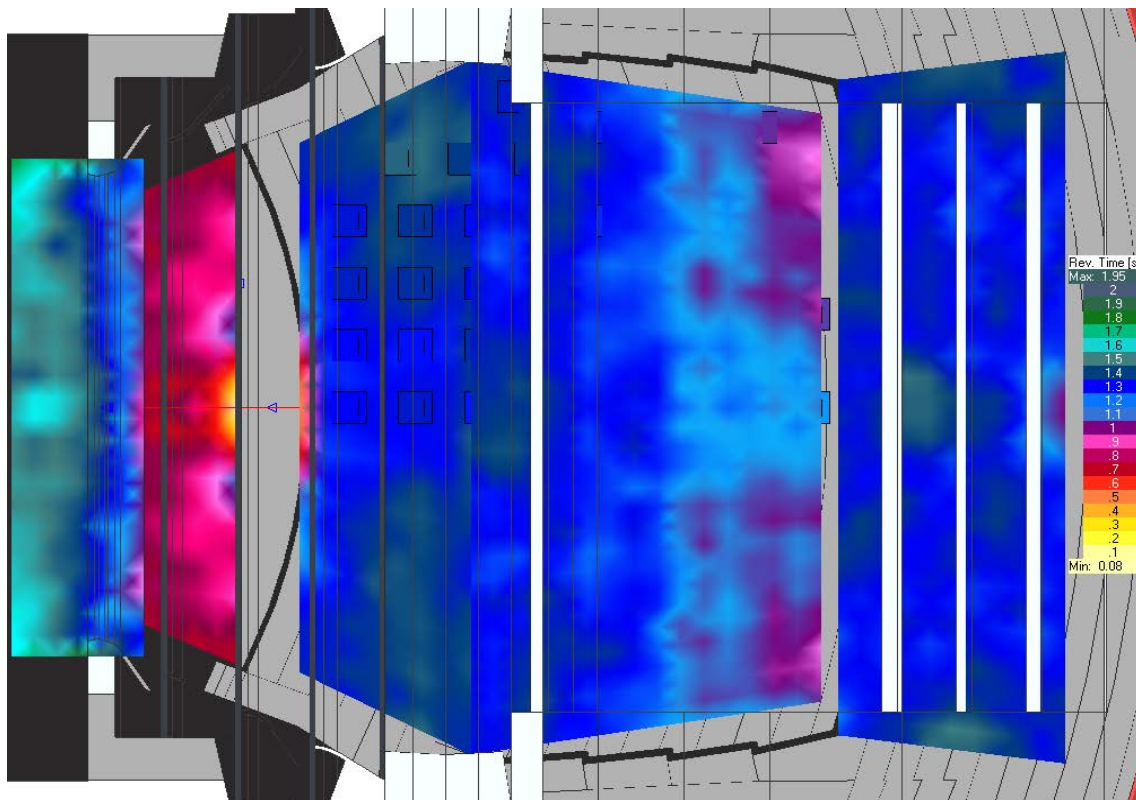
Dalším zkoumaným parametrem je hodnota EDT. Hodnota EDT se v sále pohybuje ve středním kmitočtovém pásmu okolo 1,5 s, což je standardní hodnota odpovídající požadavkům na sál těchto rozměrů a tohoto typu. Jak bylo zmíněno v kapitole 4.1.1, pokud se hodnota EDT výrazně liší od hodnoty T30, může to značit, že v daném místě převládá přímý zvuk s prvotními odrazy. V případě provedené simulace Janáčkova divadla je z obrázek 30 a obrázek 31 patrné, že doba dozvuku T30 je v prostoru sálu vyrovnaná, ale hodnota EDT (obrázek 32 a obrázek 33) se liší v zadní části prostoru A3 (obrázek 25). V tomto prostoru tak pravděpodobně převládá množství prvotních odrazů, které by bylo dobré dostat i do části sálu A2.



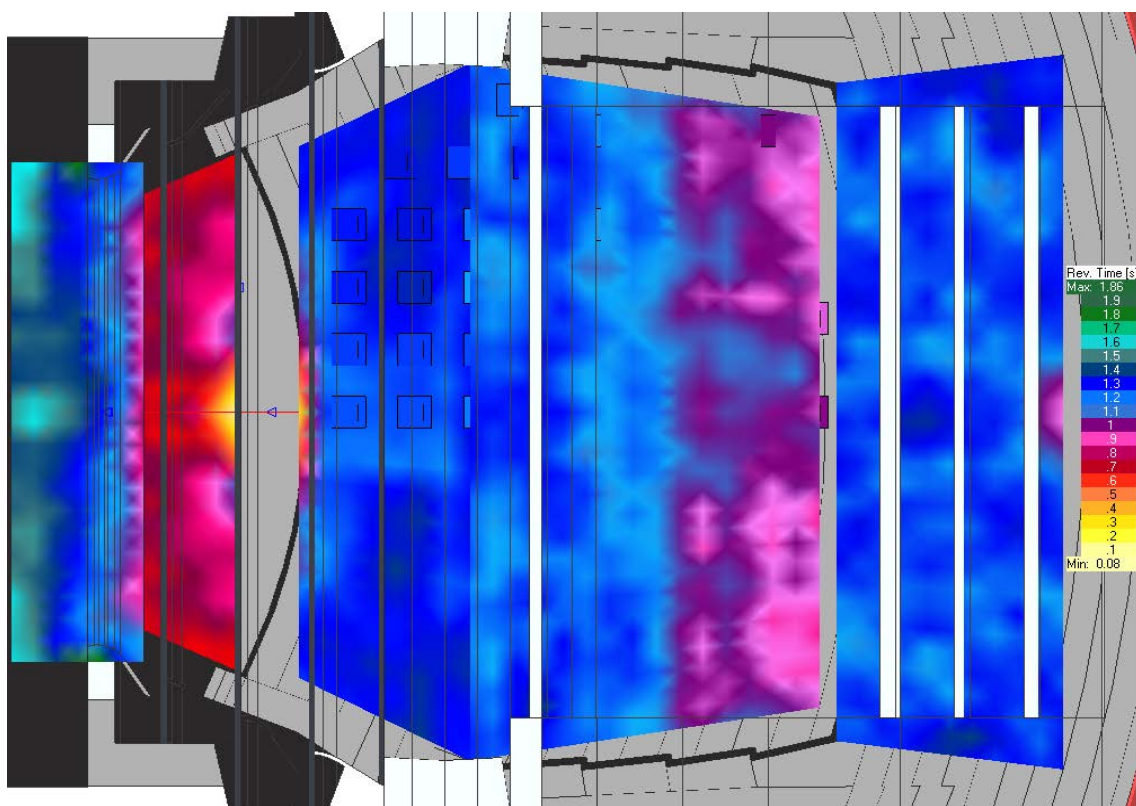
Obrázek 30: T30 pro frekvenci 1000 Hz



Obrázek 31: T30 pro frekvenci 2000 Hz

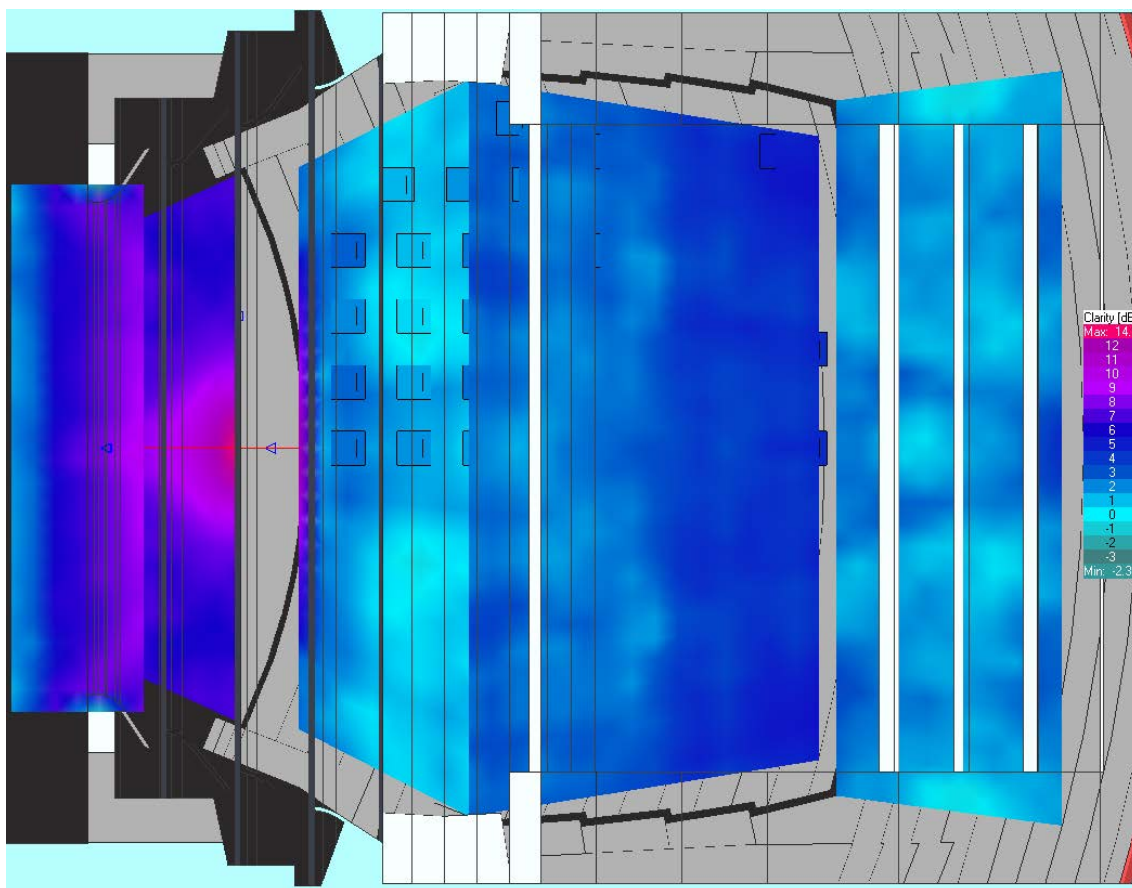


Obrázek 32: EDT pro frekvenci 1000 Hz



Obrázek 33: EDT pro frekvenci 2000 Hz

Rozdíly jsou patrné v hodnotě center time, která pokud je vyšší značí převládající množství zvuku přicházejícího do daného prostoru později. V provedené simulaci Janáčkova divadla byla hodnota parametru center time v předních řadách 80 až 90 ms (pro kmitočet 1 kHz). Hodnota Clarity (C80) se pohybuje v celém zkoumaném prostoru výše než naměřené hodnoty v kapitole 10.1. Rozdíl je 1 až 2 dB v závislosti na místě. Hodnota z kapitoly 11.1. může být průměrem z mnoha měřících bodů a nemusí tak být vhodná pro absolutní porovnání. Opět je ale patrný rozdíl v tomto parametru mezi přední a střední/zadní částí sálu. V přední části sálu se hodnota C80 pohybuje okolo 0 dB, dále je pak okolo 1 až 2 dB. Hodnota parametru C80 opět ukazuje na nižší hodnotu prvotní energie v prostoru prvních řad sálu.



Obrázek 34: C80 pro frekvenci 1000 Hz

Další použitou simulací byla Mirror image impacts, ve které je možné sledovat paprsky přicházející do určitého bodu prostoru a stanovit tak odkud a také za jak dlouho dorazí zvuk do daného místa. Tímto je možné doplnit poznatky získané z impulzové odezvy. Podle této simulace přichází odraz od stropu do měřeného bodu 1 v čase 85 ms.

Na závěr této části jsou doplněny hodnoty Total SPL v různých měřících místech pro porovnání s navrženými úpravami (Tabulka 10). K návrhu JD2 v následující kapitole bylo dále provedeno měření s posunutým zdrojem S1 (o 3 m směrem do středu orchestřiště) tak, aby byla lépe patrná změna v tomto návrhu – tato měření jsou označena jako měření se zdrojem S5.

Frekvence (Hz)	Total SPL – JD1, S1 (dB)					
	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	Bod 5	Průměr
100	74,49	73,50	73,06	72,24	72,23	73,91
125	74,07	72,81	72,51	71,63	71,57	73,37
160	73,55	72,38	72,08	71,10	70,93	72,84
200	73,47	72,37	71,93	70,95	71,01	72,87
250	73,70	72,70	72,38	71,56	71,54	73,36
315	74,19	73,12	72,78	72,13	72,05	73,82
400	74,17	73,13	72,73	72,03	72,07	73,79
500	74,12	73,10	72,79	71,91	72,01	73,72
630	74,63	73,59	73,27	72,52	72,67	74,23
800	74,48	73,38	73,09	72,35	72,46	74,11
1000	74,12	73,10	72,65	71,74	71,85	73,56
1250	74,16	73,10	72,79	71,80	71,94	73,70
1600	73,89	72,83	72,41	71,51	71,76	73,39
2000	73,70	72,65	72,18	71,27	71,56	73,20
2500	72,77	71,78	71,14	70,22	70,32	72,17
3150	72,26	71,06	70,49	69,37	69,76	71,52
4000	71,84	70,67	70,16	68,92	69,07	71,05
5000	71,09	69,71	69,30	67,85	68,08	70,10
6300	70,60	69,31	68,68	67,23	67,29	69,46
8000	69,93	68,51	67,73	66,17	66,34	68,37
10000	68,98	67,55	66,47	65,00	64,95	67,11

Tabulka 10: Hodnoty Total SPL pro různé měřící body modelu JD1 a zdroje S1

Frekvence (Hz)	Total SPL – JD1, S5 (dB)					
	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	Bod 5	Průměr
100	77,60	73,19	72,62	72,45	72,05	72,34
125	77,44	72,66	72,02	71,81	71,16	71,76
160	77,26	72,09	71,49	71,01	70,56	71,80
200	76,98	72,11	71,55	71,14	70,45	72,29
250	77,14	72,35	71,97	71,43	71,13	72,76
315	77,37	73,00	72,56	72,41	71,53	72,73
400	77,39	72,85	72,36	71,97	71,66	72,58
500	77,30	72,79	72,24	72,01	71,54	73,15
630	77,54	73,23	72,83	72,43	72,07	73,03
800	77,39	73,06	72,90	72,29	71,97	72,40
1000	77,16	72,89	72,32	71,84	70,96	72,57
1250	77,26	72,79	72,23	71,80	71,38	72,20
1600	77,02	72,46	72,06	71,65	70,77	72,01
2000	76,90	72,46	71,94	71,63	70,57	70,86
2500	76,35	71,40	70,92	70,16	69,16	70,18
3150	76,13	70,87	70,43	69,32	68,33	69,68
4000	75,91	70,17	69,77	69,05	67,88	68,67
5000	75,51	69,47	69,31	68,00	66,77	67,98
6300	75,30	68,97	68,51	67,30	65,11	66,93
8000	74,99	68,40	67,93	66,17	64,20	65,76
10000	74,67	67,17	66,35	65,24	62,85	72,92

Tabulka 11: Hodnoty Total SPL pro různé měřící body modelu JD1 a zdroje S5

13 Navrhované úpravy akustiky Janáčkova divadla

V rámci této práce bylo vyzkoušeno mnoho různých řešení, která měla za cíl především zlepšit šíření zvuku z prostoru orchestřiště do předních řad a šíření zvuku v samotném orchestřišti.

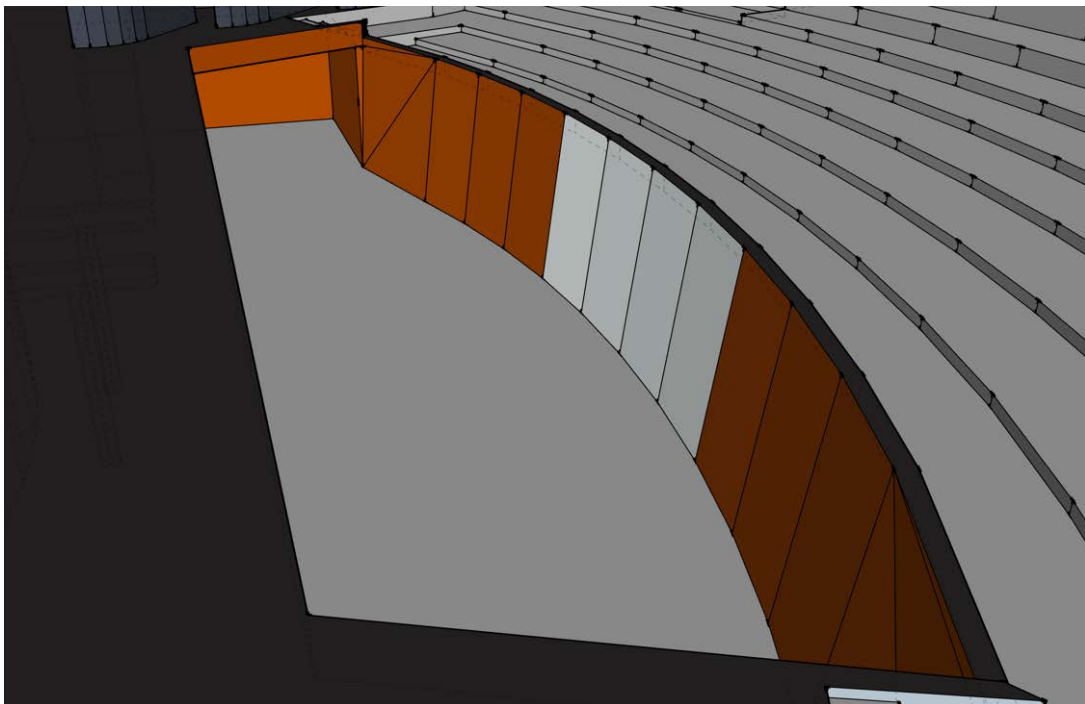
Navrhované úpravy lze rozdělit do několika samostatných částí – podle prostoru, kterého se úprava týká. V následující části této kapitoly jsou rozebrány jednotlivé možnosti úpravy sálu Janáčkova divadla a je uveden jejich vliv na akustiku podle provedených simulací.

13.1 Úprava vnitřního uspořádání orchestřiště

Úpravou samotného vnitřního uspořádání orchestřiště je poměrně složité dosáhnout zlepšení akustiky v přední části divadla. Jak se potvrdilo v provedených simulacích, tyto úpravy jsou většinou vhodné především pro zlepšení akustiky v samotném orchestřišti.

První možnou úpravou sálu Janáčkova divadla za účelem změny akustiky je úprava samotného prostoru orchestřiště, odkud se zvuk šíří do sálu. Prvním krokem při úpravě tohoto orchestřiště by mělo být alespoň částečné uzavření bočních prostorů orchestřiště, kterými může docházet ke zbytečné ztrátě akustické energie. K tomu lze použít mobilní paravány, které lze rozestavět v orchestřišti podle aktuálních potřeb orchestru. Paravány je také možné opatřit z každé strany povrchy s rozdílnými akustickými vlastnostmi a zvětšit tak variabilitu tohoto řešení. Zároveň se použitím mobilního řešení nijak neomezí přístup do bočních prostor. Tato úprava má však relativně malý vliv na šíření zvuku do prostoru sálu, její hlavní efekt je změna akustiky v samotném orchestřišti, tu je však nutné vždy diskutovat především se samotnými hudebníky.

Další možnou úpravou je naklopení přední strany orchestřiště (úhel, který svírá podlaha a přední stěna orchestřiště tak bude větší než 90°). Toto naklopení zajistí lepší šíření zvuku z prostoru orchestřiště. Kvůli naklopení nedojde k tolika odrazům zvuku uvnitř orchestřiště a zvuk tak unikne rychleji do sálu. Toto naklopení však také způsobí odrazení většího množství energie do prostoru jeviště, kde není tolik potřeba. Tohoto je možné využít při návrhu scény s použitím kulís z odrazných materiálů v přední části jeviště distribuovat zvuk do sálu. Možnost správné úpravy scény s ohledem na akustiku se ale jeví ve skutečné situaci jako velmi nepravděpodobná.



Obrázek 35: Model sálu Janáčkova divadla – naklopení přední stěny orchestřiště

Dalším způsobem, jak zlepšit především vzájemnou komunikaci mezi hudebníky v orchestřišti, je umístění difuzorů na přední stěně. Funkčnost simulace rozptylných prvků v programu EASE byla však diskutabilní, proto bylo od použití difuzorů pro účel simulací upuštěno.

Další zkoumanou možností úpravy orchestřiště je zkrácení přesahující části pódia nad orchestřiště. Otevření orchestřiště má vliv především na snížení hlasitosti v orchestřišti, a tedy vytvoření lepších podmínek pro hudebníky. Zkrácení pódia zvýší celkovou úroveň hlasitosti zvuku orchestru, čímž v některých případech dojde také k lepší distribuci zvuku do předních řad, avšak může narušit rovnováhu mezi orchestrem a zpěvákem.

Nejúčinnější metodou pro zlepšení šíření zvuku do předních řad sálu je snížení přední hrany tvořící zábradlí mezi hledištěm a orchestřištěm, případně jeho nahrazení akusticky průzvučným materiálem. Tato možnost byla simulována v řešení JD2. V tomto návrhu je přední hrana orchestřiště snížena o 40 cm. Tato úprava vedla ke zvýšení celkové akustické energie v prostoru sálu, což je patrné na hodnotách Total SPL, které vzrostly například v měřeném místě 1 o 5 dB (Tabulka 12).

Frekvence (Hz)	Total SPL – JD2, S1 (dB)					
	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	Bod 5	Průměr
100	80,40	73,89	73,88	72,90	72,61	74,39
125	80,28	73,17	73,24	72,21	71,87	73,88
160	80,12	72,73	72,80	71,59	71,35	73,35
200	80,10	72,56	72,77	71,62	71,40	73,39
250	80,17	73,01	73,14	72,20	72,17	73,87
315	80,29	73,51	73,59	72,56	72,47	74,30
400	80,25	73,31	73,47	72,38	72,48	74,26
500	80,19	73,22	73,31	72,30	72,29	74,17
630	80,36	73,93	74,15	73,06	72,98	74,65
800	80,30	73,63	73,87	72,94	72,94	74,52
1000	80,21	73,34	73,27	72,20	72,14	73,97
1250	80,22	73,37	73,39	72,24	72,37	74,11
1600	80,15	73,06	73,20	71,87	72,10	73,83
2000	80,04	72,87	72,97	71,71	71,84	73,62
2500	79,85	71,92	72,21	70,58	70,69	72,60
3150	79,71	71,02	71,55	69,62	69,96	71,97
4000	79,60	70,76	71,06	69,21	69,35	71,52
5000	79,46	69,90	70,35	68,19	68,48	70,59
6300	79,32	69,33	69,81	67,67	67,80	69,98
8000	79,11	68,40	68,81	66,71	66,60	68,94
10000	78,87	67,59	67,93	65,41	64,97	67,76

Tabulka 12: Hodnoty Total SPL pro různé měřící body modelu JD2 a zdroje S1

Frekvence (Hz)	Total SPL – JD2, S5 (dB)					
	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	Bod 5	Průměr
100	78,49	76,03	74,88	74,37	73,53	75,34
125	78,22	75,61	74,39	73,94	72,87	74,85
160	77,85	75,31	74,14	73,57	72,54	74,40
200	77,80	75,31	74,02	73,45	72,61	74,43
250	77,86	75,50	74,41	73,74	72,75	74,82
315	78,02	75,68	74,62	74,17	73,40	75,20
400	78,03	75,77	74,78	74,06	73,24	75,14
500	77,96	75,64	74,60	74,26	73,07	75,04
630	78,14	75,95	74,8	74,39	73,61	75,40
800	78,04	75,91	74,75	74,25	73,48	75,31
1000	77,68	75,58	74,41	73,95	72,80	74,80
1250	77,75	75,73	74,55	73,90	72,89	74,95
1600	77,55	75,55	74,43	73,73	72,75	74,67
2000	77,56	75,40	74,40	73,49	72,40	74,49
2500	76,88	74,82	73,47	72,84	71,42	73,59
3150	76,53	74,50	73,18	72,43	70,62	72,98
4000	76,29	74,25	72,95	71,98	70,37	72,60
5000	75,75	73,80	72,43	71,18	69,49	71,74
6300	75,60	73,48	72,01	70,96	68,86	71,22
8000	75,20	73,02	71,34	70,07	68,15	70,34
10000	74,96	72,43	70,69	69,13	67,08	69,32

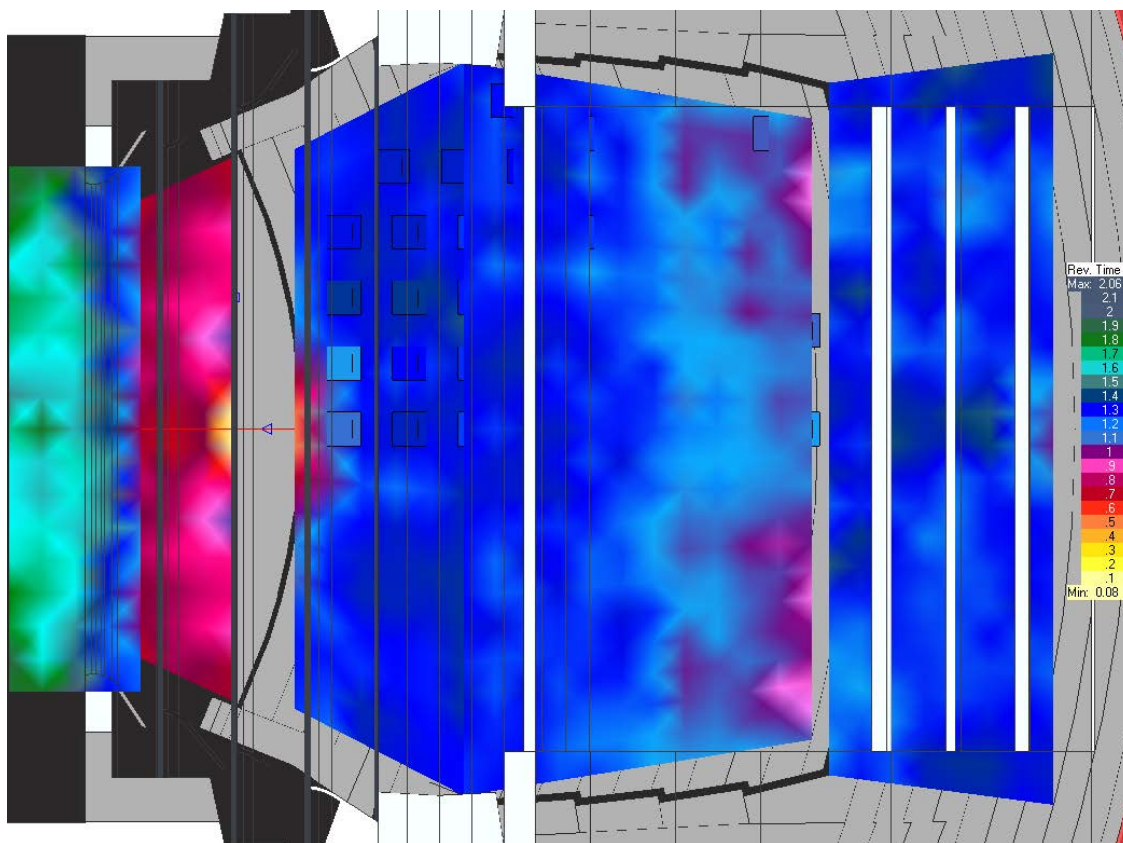
Tabulka 13: Hodnoty Total SPL pro různé měřící body modelu JD2 a zdroje S5

V dalších měřících bodech již není tato změna tak patrná, to je však způsobeno umístěním zdroje velmi blízko přední hrany orchestřiště. Při posunutí zdroje S1 dál od hrany došlo k výrazné změně této hodnoty a zároveň se zmenšil pokles mezi 1000 a 4000 Hz na přibližně 1 dB (Tabulka 13).

Tímto bylo docíleno lepší distribuce vyšších kmitočtu do přední části sálu, která je v sále problematická.

Snížení hrany mělo za následek minimální změnu hodnot EDT a T30. Hodnota EDT se mírně snížila v prostoru předních řad, což je pochopitelné vzhledem k zvýšenému množství přímé energie.

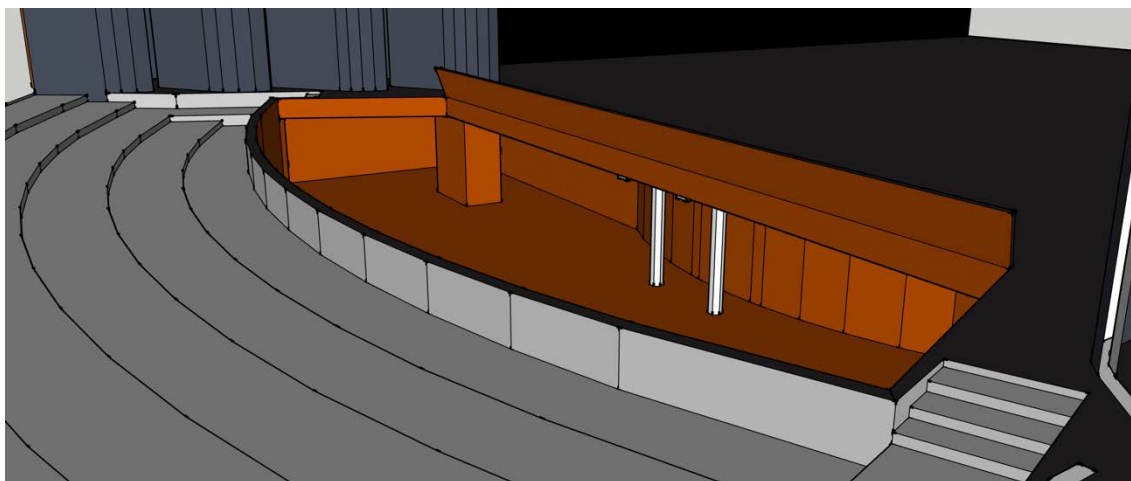
Na druhou stranu snížení přední hrany má za následek zhoršení akustické vazby mezi zpěváky a orchestrem. Ta je umožněna především odrazem energie od přední stěny a její snížení tak zmenší také množství odražené energie. To je na mapě v obrázku 36 patrné zvýšením hodnot právě v prostoru měřící hladiny A5.



Obrázek 36: JD2, zdroj S1, parametr EDT pro frekvenci 1000 Hz – patrná změna hodnoty EDT v prostoru A2 a A5.

Ve všech simulacích provedených na modelu JD2 je patrné, že při takto snížené hraně může dojít k šíření příliš velkého množství energie do prvních řad, a to v závislosti na jednotlivých nástrojích, protože každý má jinou vyzařovací charakteristiku. Takto blízko orchestru není přímý zvuk spojen v kompaktní celek a celkový dojem z hrané hudby by mohl být nevyvážený.

Posledním, velmi radikálním řešením, je umístění odrazné plochy na hranu jeviště. Tato úprava je inspirována studií zabývající se akustikou Krakovské opery, ve které takové řešení znamenalo zvýšení průměrné hodnoty síly příchozí energie G_{mid} o 1 až 2 dB. [56] Toto řešení je samozřejmě extrémní a podobně jako zkrácení zadní stropní části orchestrálního či přední stěny by mohlo mít až příliš zásadní vliv na množství šířené energie z prostoru orchestrálního a přehlučení zpěváků. Ze simulací řešení JD19 je patrné, že v přední části dojde ke zvýšení hodnoty Total SPL a také její celková průměrná hodnota v sále vzroste. Tato úprava může však také znesnadnit vizuální komunikaci mezi dirigentem a zpěváky a narušit akustickou vazbu mezi zpěváky a orchestrem.



Obrázek 37: Model JD19 – odrazná plocha na zadní hraně orchestřiště

Frekvence (Hz)	Total SPL – JD19, S1 (dB)					
	Bod 1	Bod 2	Bod3	Bod 4	Bod 5	Průměr
100	76,11	74,49	74,09	73,25	73,36	74,51
125	75,92	74,09	73,85	72,83	72,71	74,13
160	75,27	73,60	73,07	72,29	72,36	73,52
200	75,07	73,36	73,15	72,32	72,34	73,68
250	75,53	74,19	73,35	73,25	73,00	74,24
315	76,22	74,60	74,42	73,33	73,53	74,83
400	76,19	74,46	74,15	73,63	73,55	74,86
500	76,22	75,04	74,50	73,72	73,97	75,08
630	76,94	75,65	75,11	74,48	74,44	75,75
800	76,92	75,44	75,22	74,24	74,46	75,69
1000	77,17	75,79	75,04	74,20	74,51	75,77
1250	77,33	75,69	75,31	74,29	74,66	75,89
1600	77,23	75,59	74,79	74,10	74,50	75,65
2000	76,96	75,65	75,03	73,90	73,94	75,50
2500	76,62	74,42	74,07	73,23	73,20	74,68
3150	75,97	74,18	73,82	72,30	72,89	74,18
4000	75,72	73,56	73,17	72,06	72,28	73,67
5000	75,02	72,75	72,46	70,99	71,14	72,85
6300	74,55	72,03	71,10	70,20	70,47	72,02
8000	73,45	71,13	70,52	69,17	69,08	70,81
10000	72,11	69,60	68,91	67,38	67,64	69,14

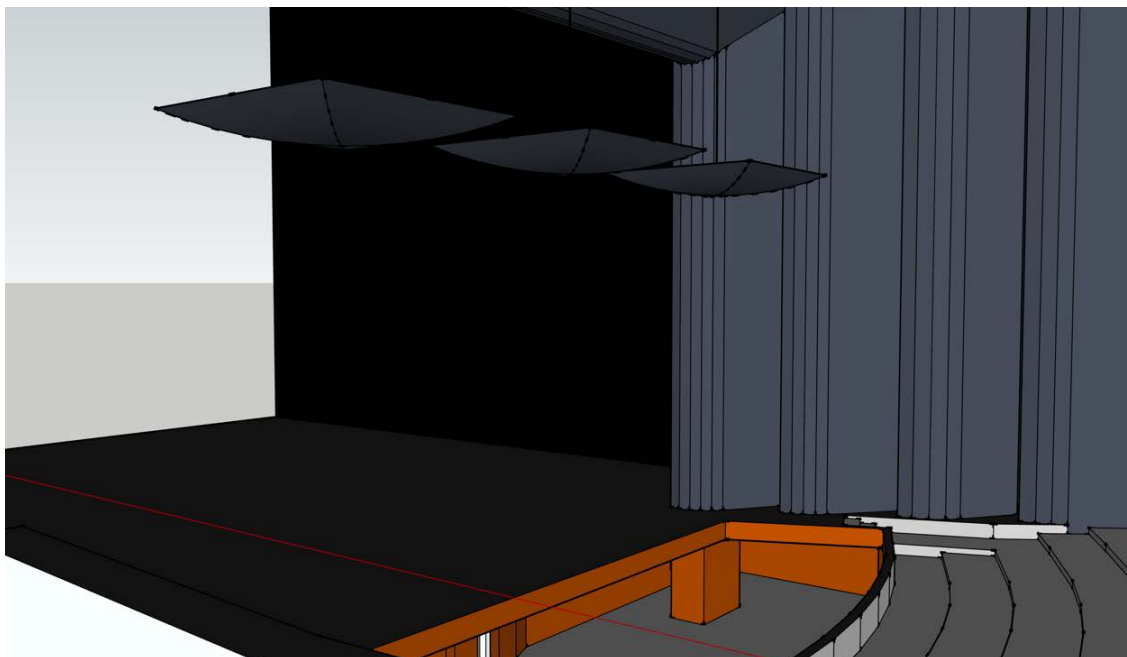
Tabulka 14: Hodnoty Total SPL pro různé měřící body modelu JD19 a zdroje S1

13.2 Zavěšení odrazných ploch nad orchestřiště

Pravděpodobně nejjednodušší a zároveň velmi účinná metoda ovlivnění distribuce zvukových vln od orchestru do sálu je použití závěsných odrazných ploch nad orchestrem. Odrazné plochy jsou vyráběny z materiálů s nízkou pohltivostí, aby byla co největší část energie odrazena do sálu. Tyto odrazné plochy mohou být tvarovány tak, aby odrážely zvuk nejen směrem k posluchačům, ale lze je také využít ke zlepšení akustiky v samotném orchestřišti. K hudebníkům díky těmto plochám dorazí dříve odraz z vrchu od ostatních spoluhráčů a napomůže tak akustice v prostoru orchestru. V případě nedostatečné akustické vazby mezi hudebníky a herci je lze navíc využít k částečné distribuci energie směrem na jeviště.

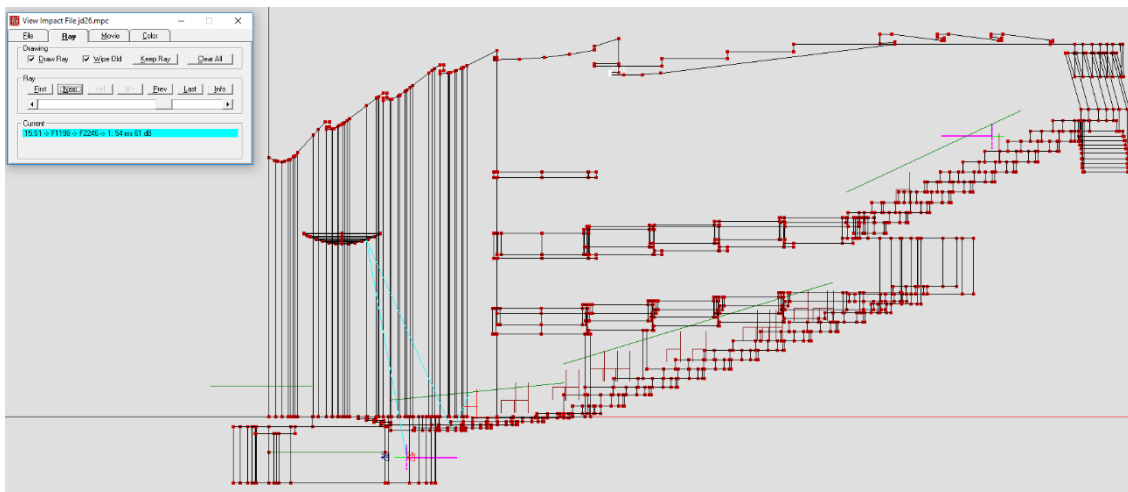
V případě Janáčkova divadla mohou pomoci s šířením zvuku do předních řad divadla, které jsou kvůli vysokému zábradlí u přední stěny v akustickém stínu a nedostává se jim tak příliš mnoho zvuku na středních a vyšších frekvencích. Jejich rozměr by měl být dostatečně velký

na to, aby mělo jejich použití žádoucí akustický efekt a pracovaly v celém frekvenčním spektru, ale zároveň by neměly úplně zamezit funkci stropní části, která je pro akustiku sálu také důležitá.



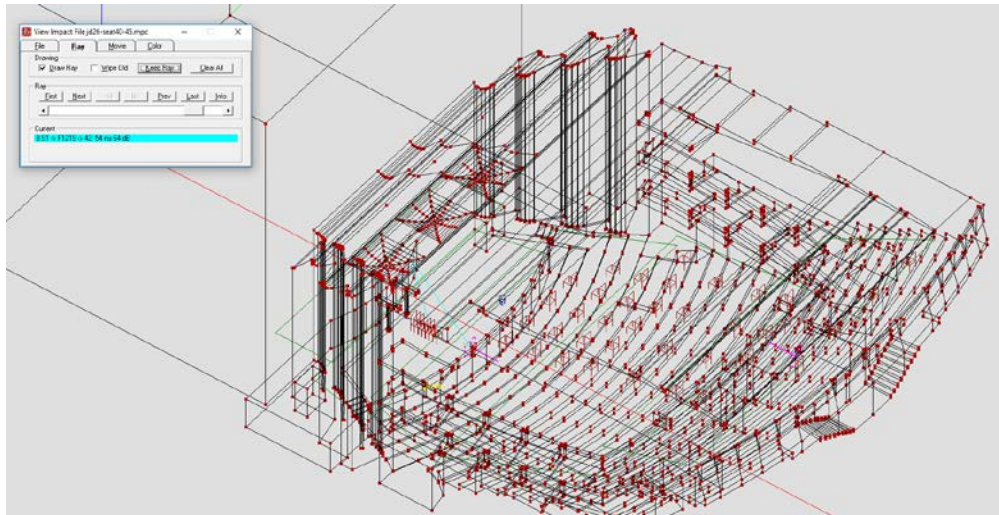
Obrázek 38: Model JD26 – odrazné plochy nad orchestřištěm

V modelu JD26 byl vytvořen odrazný panel nad orchestřištěm ve výšce přibližně 8 m nad orchestřištěm, který má konvexní tvar odrážející dopadající zvuk směrem do předních řad, zpět k hudebníkům a směrem k hercům na jevišti. Materiál panelu byl pro simulaci nastaven jako velmi málo pohltivý. Podle simulace Mirror image impacts dojde k příchodu paprsku odraženého do měřeného bodu číslo 1 v čase 50 ms (obrázek 39). Díky tomuto panelu tak dojde k navýšení počtu paprsků mířících do přední části sálu s minimem odrazů.

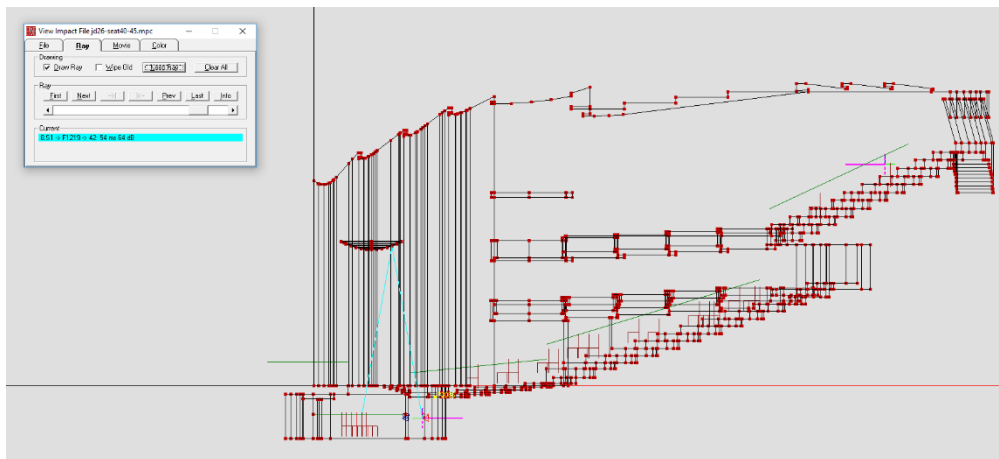


Obrázek 39: Simulace mirror image impacts – sledování paprsku mířícího od zdroje SI k poslechovému místu 1

Zavěšený odrazný panel také zajistí lepší komunikaci mezi jednotlivými hudebníky. Z výsledků metody ray-tracing je patrné, že odrazné plochy zajistí brzký odraz zvuku směrem ke spoluhráčům. Tyto odrazy jsou, jak bylo zmíněno v kapitole 7, žádoucí.



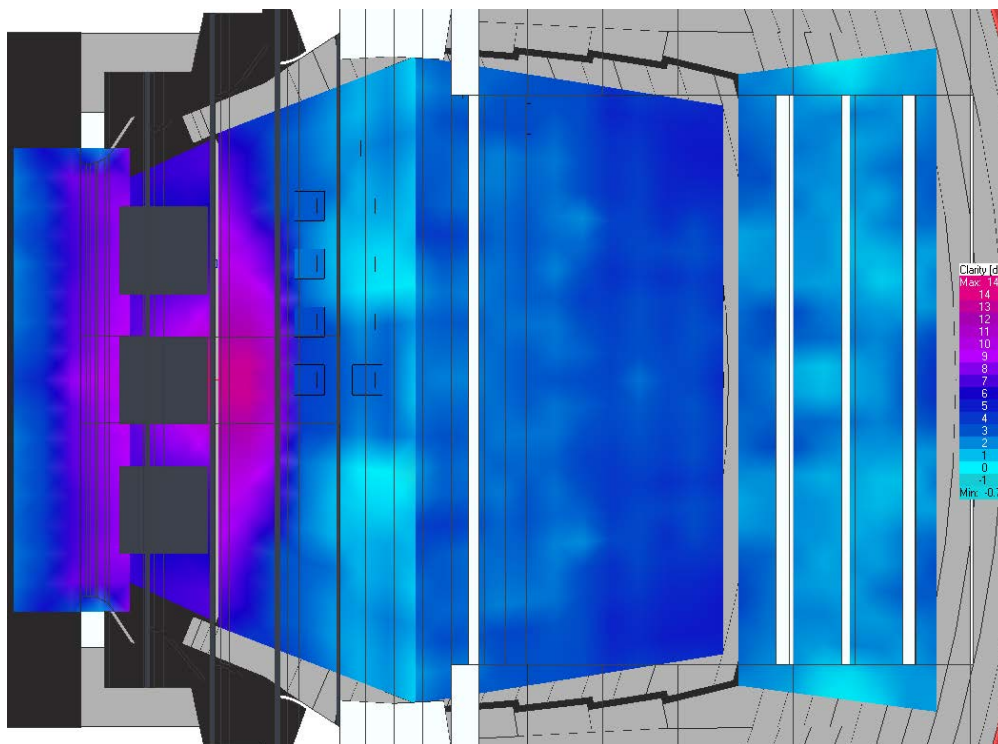
Obrázek 40: Simulace mirror image impacts – sledování paprsku mířícího od zdroje S1 k poslechovému místu v orchestřišti – brzký odraz zpět do prostoru orchestřišťe zajistí lepší vzájemnou komunikaci hudebníků



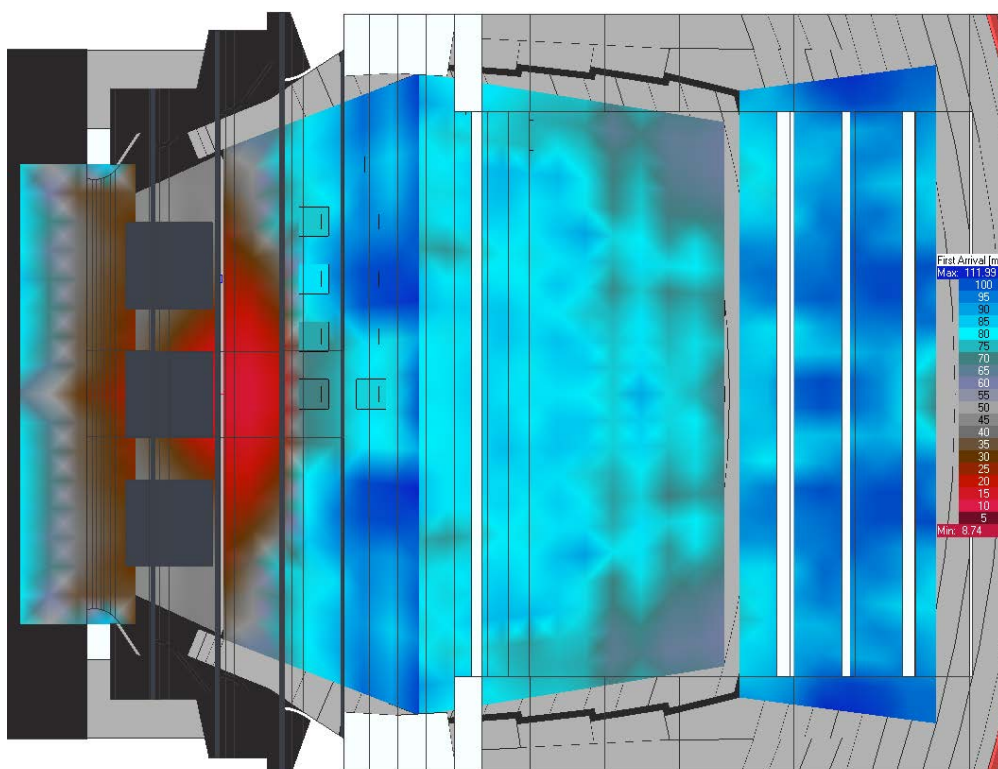
Obrázek 41: Simulace mirror image impacts – sledování paprsku mířícího od zdroje S1 k poslechovému místu v orchestřišti – brzký odraz zpět do prostoru orchestřišťe zajistí lepší vzájemnou komunikaci hudebníků

Změny v akustických parametrech sálu při použití odrazných ploch jsou také patrné z parametrů EDT, T30 a C80.

Zlepšení je prokazatelné především z parametru C80. V místě přední části orchestřišťe (poslechové body 1 a především 2 za použití zdroje S1) dojde ke zlepšení o 1 dB pro frekvenci 1000 Hz v průměru pak asi o 0,5 dB. Zlepšení v přední části hlediště (především na ose s modelovaným reproduktorem) je také patrné z mapování hodnot C80 a center time.

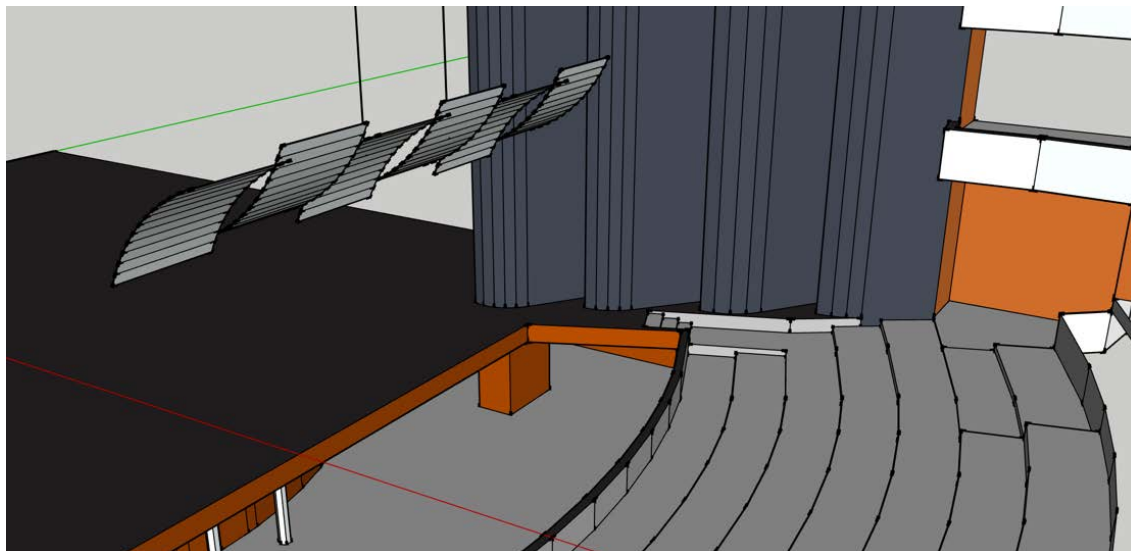


Obrázek 42: Model JD26, zdroj S1, parametr C80 pro frekvenci 1000 Hz



Obrázek 43: Model JD26, zdroj S1, parametr Center time pro frekvenci 1000 Hz

Velmi dobrých výsledků, co se týče distribuce zvuku do prostoru předních řad, dosahoval návrh JD36. V tomto návrhu je kombinace konvexně a konkávně prohnutých odrazných ploch zavěšených přibližně 7,5 m nad orchestřištěm. Odrazné plochy jsou naklopeny tak, aby odrážely zvuk především do prostoru přední části hlediště. Kombinace různě prohnutých ploch byla zvolena proto, aby nedocházelo k přílišné koncentraci zvuku v jednom místě, ale aby docházelo stále i k jeho distribuci do vzdálenějších částí sálu a do nadzemního patra.

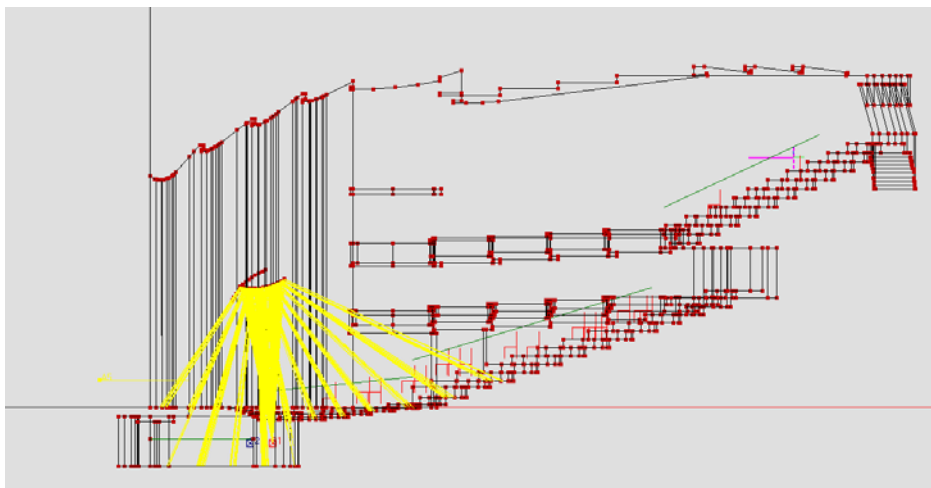


Obrázek 44: Model JD36 – zavěšené odrazné plochy

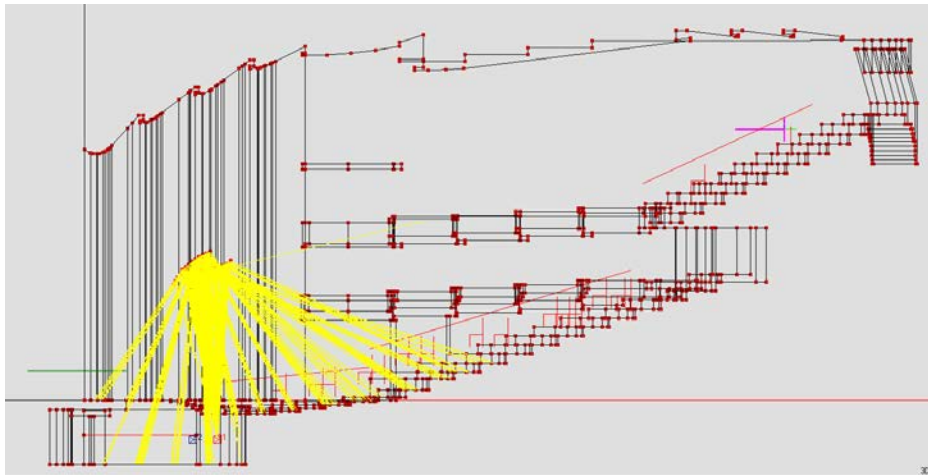
Z mapy hodnoty EDT na frekvenci 1000 Hz je patrné její vyrovnání v prostoru sálu. Hodnota EDT je nižší než hodnota T30, což znamená rychlejší pokles akustické energie o prvních 10 dB. To může značit větší množství prvotních odrazů v takovém místě.

Na základě tohoto návrhu bylo vypracováno několik dalších s různým počtem a naklopením odrazných ploch nad orchestřištěm. Rozdíly jsou patrné ze simulací ray-tracing. Konkávně nakloпенé plochy v modelu JD36 odrážejí příliš mnoho zvuku do zadní části sálu, proto byly upraveny. Velmi dobře z pohledu ray-tracingu dopadly modely JD38 (obrázek 45) a JD40 (obrázek 46). Poslední model se zavěšenými panely, který z pohledu ray-tracingu vychází nejlépe, je JD46.

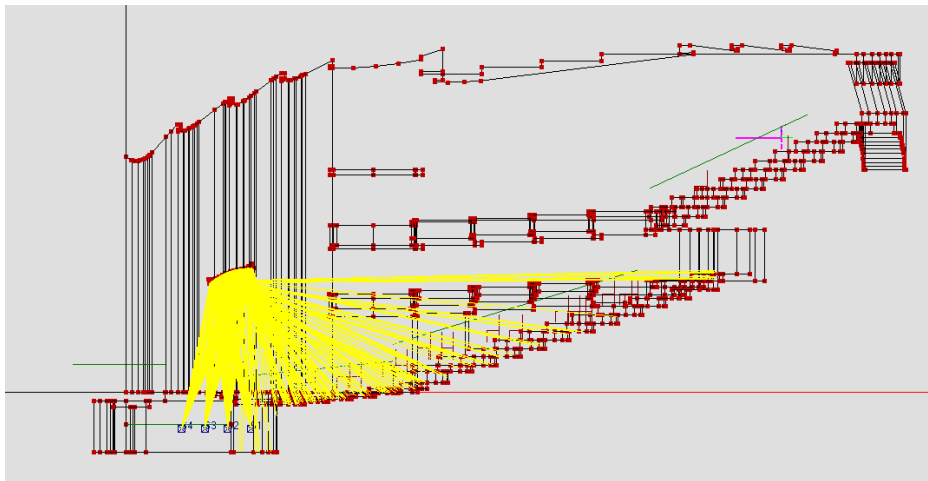
Pro tento model bylo zvoleno mírně větší prohnutí odrazných ploch. Následně byl model JD46 testován za použití zdrojů v různých částech orchestřiště, aby bylo ověřeno jeho správné umístění nad orchestřištěm. Na obrázku 47 až 49 jsou postupně výsledky testu pro oba typy odrazných ploch.



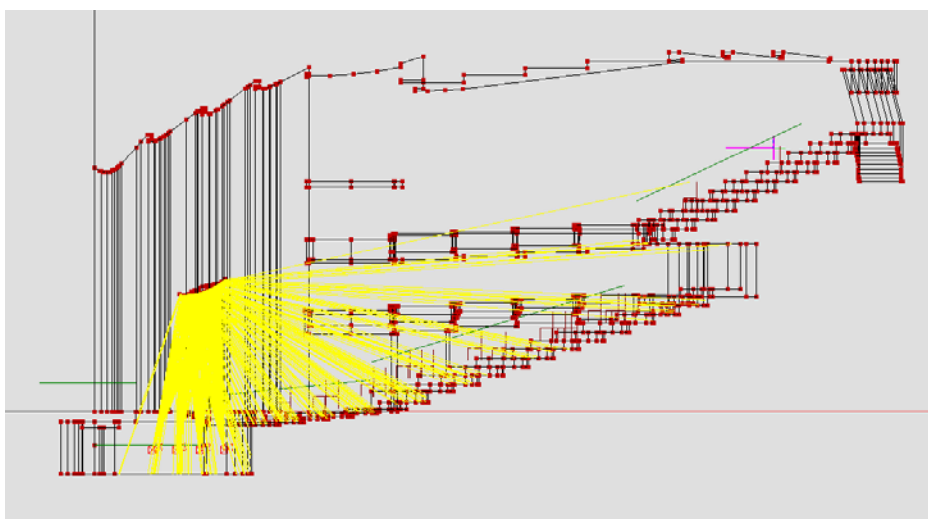
Obrázek 45: Model JD38 – ray-tracing model funkčnosti zavěšených odrazných ploch



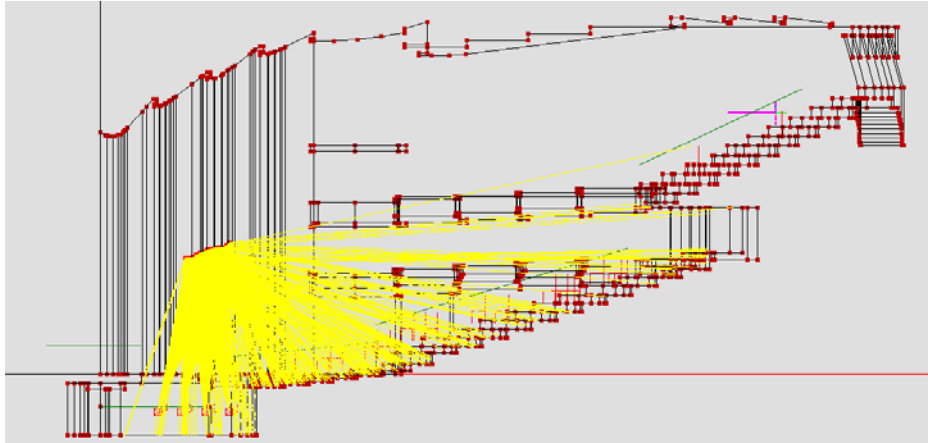
Obrázek 46: Model JD40 – ray-tracing model funkčnosti zavěšených odrazných ploch



Obrázek 47: Model JD46, ray-tracing model konkávních ploch za použití různě umístěných zdrojů



Obrázek 48: Model JD46, ray-tracing model konvexních ploch za použití různě umístěných zdrojů



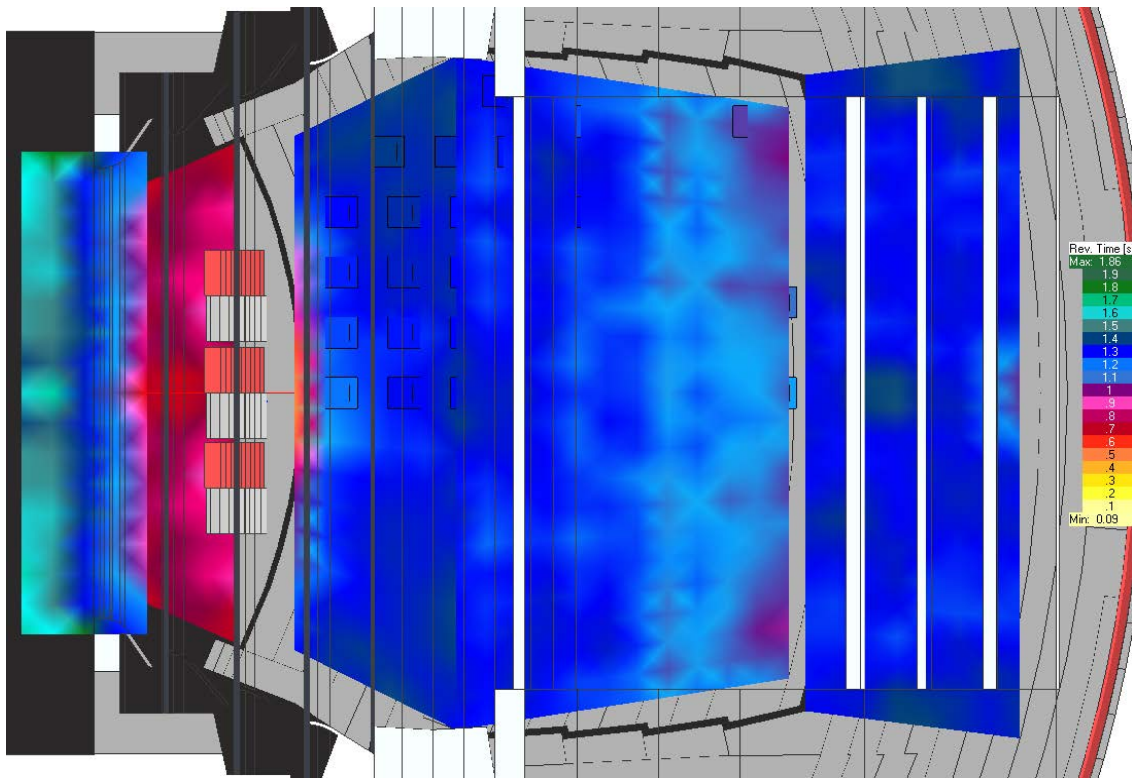
Obrázek 49: Model JD46, ray-tracing model obou typů ploch za použití různě umístěných zdrojů

Na mapě parametru EDT je patrné jeho lepší rozložení v předních řadách a také jeho celkové snížení v těchto místech, které je potvrzené i číselnými hodnotami z měřicích bodů. Naopak hodnota parametru T30 se nezměnila. Z toho důvodu je možné očekávat, že nedošlo k zásadní změně celkové akustiky sálu.

Hodnota C80 se zlepšila v průměru pouze o 0,2 dB, což je na hraně rozeznatelného rozdílu. V měřicích bodech v přední části sálu však došlo k navýšení o 1 až 1,5 dB pro sledované frekvence 1000 Hz až 4000 Hz. Tím se potvrzuje že odrazné plochy mají vliv na akustiku především v přední části.

Hodnoty Total SPL se v měřicích bodech v přední části sálu zvýšily a mezi frekvencemi 1000 až 4000 došlo v některých bodech také k mírnému vyrovnaní.

Konvexně tvarované panely byly naklopeny tak, aby odrážely část zvuku také do prostoru jeviště, což se ukázalo jako mírná změna v mapě parametru EDT a C80. V tomto místě nebyly nastaveny samostatné měřicí body, které by toto potvrdily přesnými hodnotami. Dalším kladem takto nastavených odrazných ploch je zlepšení zpětné vazby mezi hudebníky.

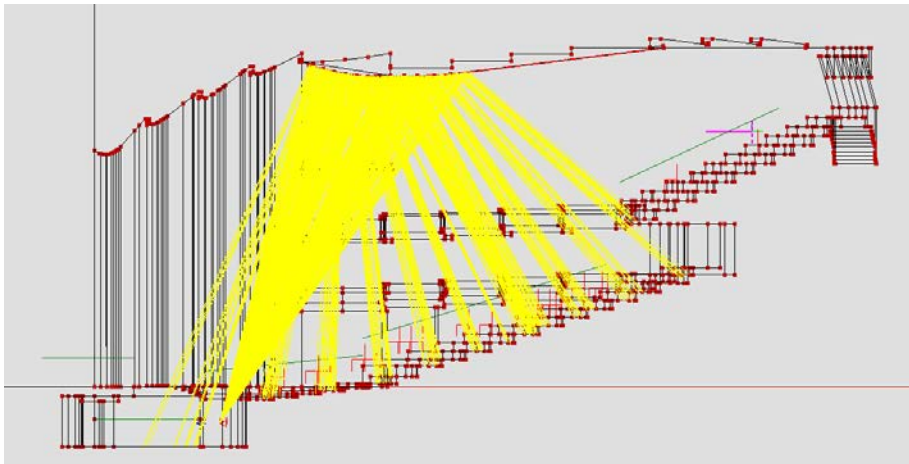


Obrázek 50: Model JD46, zdroj S1, parametr EDT pro frekvenci 1000 Hz

13.3 Úprava stropní části nad orchestřištěm

Strop Janáčkova divadla nad orchestřištěm je tvarován tak, aby odrazil zvuk především do zadní části prostoru a směrem k balkónům. Jeho část může být změněna, aby některé z odrazů od stropu směřovaly také do prostoru prvních řad sálu. Ke správnému směřování odrazů z prostoru orchestřiště byla využita simulace typu ray-tracing. Úprava stropu je poměrně náročná ze stavebního hlediska, proto je v reálné situaci nepravděpodobná. Zásah do stropní části by byl až krajní možností ovlivnění akustiky sálu.

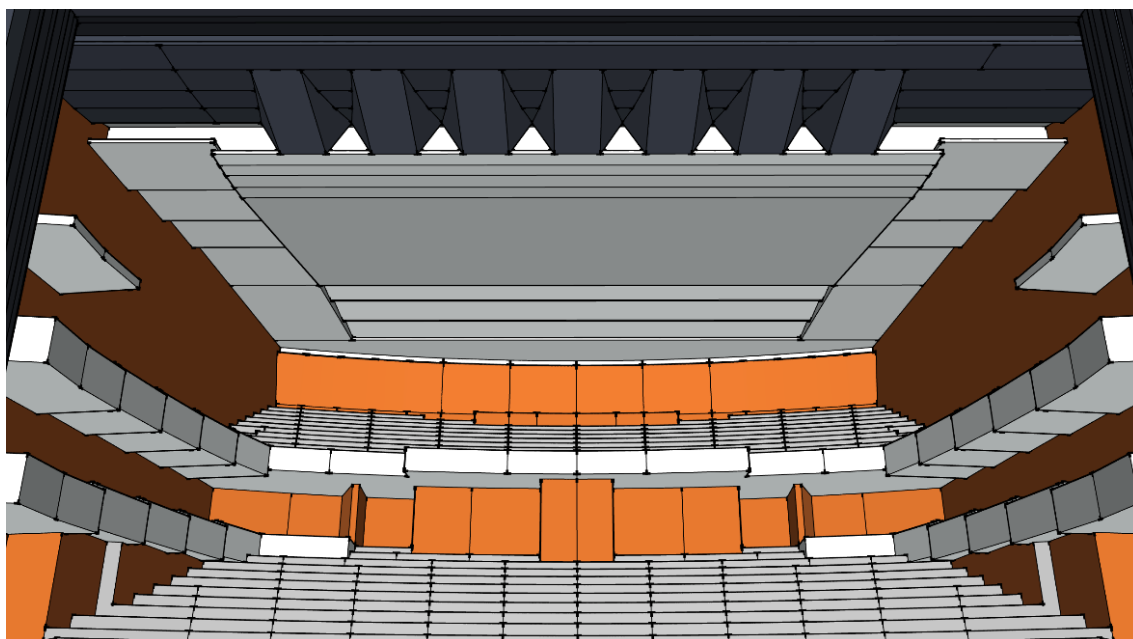
K úpravě stropu byla vybrána část nad prostorem prvního postranního balkónu, která je téměř rovná a její část by mohla být využita pro odraz zvuku do prostoru předních řad sálu. Bylo vytvořeno několik variant a ověřena jejich funkčnost pomocí metody ray-tracing. Úpravou architektury sálu může dojít k výrazným změnám v akustice prostoru, proto byly ověřeny také další akustické parametry ostatních částí sálu s důrazem na střední a zadní část hlediště. V návrhu JD9 byla původně rovná část stropu z části zakulacena. Díky tomu je v ray-tracing modelu patrný odraz části paprsků směrem do předních řad sálu (obrázek 51). Z hodnot parametru C80 je patrné zlepšení například v měřeném bodě 1 o 1 dB. V hodnotách Total SPL však na důležitých frekvencích mezi 1000 a 4000 Hz nedošlo k výraznému zlepšení.



Obrázek 51: Model JD9 – ray-tracing model funkčnosti zavěšených odrazných ploch

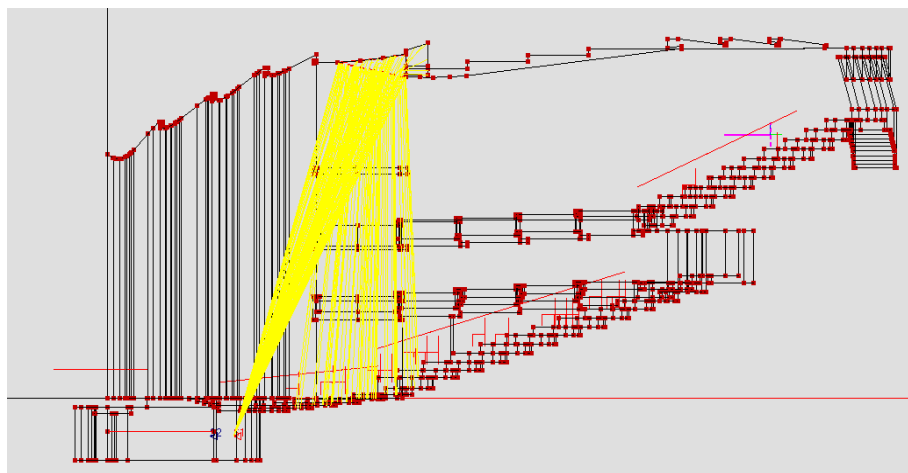
V návrhu JD23 byly na strop sálu umístěny 3 konvexně tvarované prvky. Tyto prvky mají více rozptýlit zvuk mířící na rovnou část stropu divadla. Simulace ray-tracing ukazuje žádoucí odrazy od tohoto prohnutí směrem do prostoru A2 a také zpět do prostoru orchestřiště, avšak v porovnání parametrů, jakými jsou EDT a T30 nedochází k žádným změnám. Největší změna byla zaznamenána v hodnotě parametru C80 v prostoru A3, která však není tak důležitá pro tuto práci. Dále došlo také ke změně hodnot center time, ale opět pouze v prostoru A3. Nedostatečná účinnost tohoto řešení je způsobena pravděpodobně rozměrem použitých prvků ve spojení s jejich vzdáleností od orchestřiště.

V návrhu JD12 (Obrázek 52) jsou umístěny do výše zmíněného prostoru stropu šikmé odrazné plochy, které jsou naklopeny tak, aby odrážely zvuk především do přední části sálu.



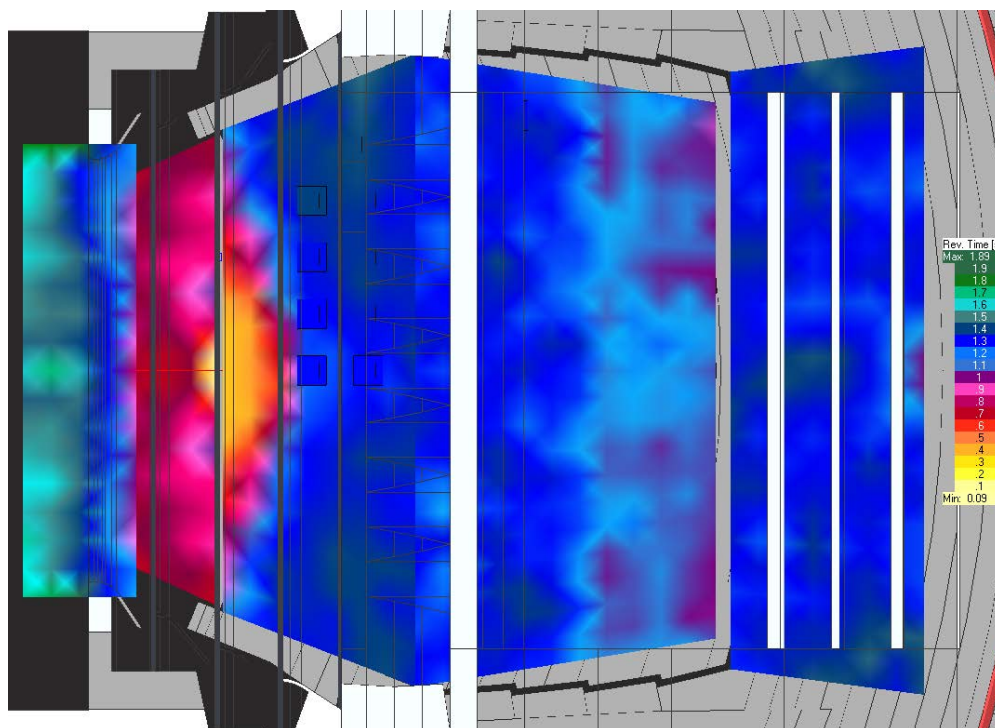
Obrázek 52: Model JD12 odrazné plochy na stropu sálu

Z modelu ray-tracing (obrázek 53) je patrné, že odrazné plochy jsou naklopeny správným směrem a směřují paprsky do prvních řad sálu.



Obrázek 53: Model JD12 – ray-tracing odrazných ploch

Touto změnou bylo docíleno výrazné změny parametru EDT, který se snížil v celém prostoru sálu a zároveň částečně vyrovnal – není již tak velký rozdíl mezi sedadly vpředu a vzadu. Snížení tohoto parametru navíc značí větší množství prvotních odrazů. Zároveň díky naklonění odrazných ploch dochází k lepšímu rozptýlení přichozího zvuku. To je patrné z toho, že u většiny simulací se liší hodnoty v ose sálu, kde je umístěn zdroj S1 proti místu mimo osu. V případě simulace návrhu JD12 je patrné, že i za použití zdroje na ose dochází ke změnám v celém prostoru sálu. K tomu dochází díky šikmým plochám odrážejícím zvuk také do stran, nejen přímo do hlediště. V měřených parametrech T30 a EDT nedošlo k znatelným změnám. Hodnota C80 stoupla např. v měřených místech 2 a 3 na frekvenci 4000 Hz o 1 až 2 dB.



Obrázek 54: Model JD12 zdroj S1, parameter EDT pro frekvenci 1000 Hz – patrné rozptýlení zvuku ze zdroje S1 umístěném na ose sálu

14 Závěr

V rámci této práce byl v programu SketchUp vytvořen prostorový model sálu Janáčkova divadla v Brně podle architektonických výkresů budovy. Tento model musel splňovat pravidla pro import do akustického simulačního programu EASE a musel být následně kalibrován. Kalibrace proběhla podle naměřených parametrů sálu tak, aby nastavené akustické vlastnosti odpovídaly reálné situaci.

V simulačním programu byly dále určeny všechny akustické parametry sálu v jednotlivých zkoumaných bodech a poslechových hladinách. V poslechových hladinách byly vytvořeny takzvané mapy jednotlivých zkoumaných parametrů. Na základě zadání a zjištěných parametrů ze simulací byly vytvořeny návrhy úprav, které by měly zlepšit šíření zvuku z prostoru orchestřiště především do přední části sálu. V této části je problém především s vyššími frekvencemi, které se za hranu orchestřiště šíří hůře. Podle odsimulovaných hodnot Total SPL je hladina akustického tlaku vyrovnaná, od frekvence 1000 Hz klesá o několik decibelů. Tento pokles je nutné zlepšit.

Vytvořené návrhy je možné rozdělit do tří základních skupin podle druhu úprav. Jsou jimi – úprava samotného orchestřiště, úprava stropní části sálu, přidání zavěšených odrazných ploch nad prostor orchestřiště. U každého ze zkoumaných návrhů bylo kromě parametrů prvních řad sledováno, zda nedošlo v jiné části sálu k výrazné změně. Ta by mohla vést ke zhoršení akustické situace a tím by celá úprava vedla pouze k hledání řešení nově vzniklého problému.

Změny uspořádání orchestřiště mohou mít velmi zásadní vliv na celkovou akustiku sálu, jak předvedl návrh JD2. V rámci snížení přední hrany orchestřiště došlo k zvýšení hodnoty celkového akustického tlaku ve zkoumaných prostorech až o 5 dB. Taková změna může zásadně ovlivnit vyrovnanost orchestru a zpěváků. Snížením přední hrany však došlo k lepšímu šíření vysokých kmitočtů do sálu, kterých je jinak v předních řadách nedostatek. Díky tomu hodnota Total SPL neklesá mezi oktávovým pásmem 1000 až 2000 Hz a 2000 až 4000 Hz o několik dB, ale pouze o 1 dB.

Pokud by bylo dosaženo snížení celkové hlasitosti orchestru a zároveň by nevedlo snížení akustické vazby mezi orchestrem a zpěváky, bylo by možné toto řešení použít.

Úprava stropní části sálu se podle provedených simulací návrhů JD9 a JD12 jevila jako méně účinná než ostatní řešení. To je pravděpodobně dáno tím, že celková plocha, na kterou byly tyto úpravy zaměřeny ve spojitosti s její vzdáleností od orchestřiště, již nemá tak zásadní vliv na celkovou akustiku ve zkoumaném prostoru.

Nejlepších výsledků dosahovalo přidání zavěšených odrazných ploch nad prostor orchestřiště. K tomuto řešení bylo vytvořeno několik modelů a otestováno jejich naklopení pomocí ray-tracing modelů. Podle simulace akustických parametrů z modulu Aura dosahoval model JD46 výrazného zlepšení ve zkoumané přední části hlediště. V hodnotě EDT došlo k jeho vyrovnaní a mírnému snížení, naopak hodnota T30 ovlivněna nebyla. Míra jasnosti C80 stoupla na vyšších kmitočtech v měřicích místech 2 a 3 o 1 až 1,5 dB. Přínos tohoto řešení není jen ve zlepšení akustiky v přední části sálu, ale poskytuje také lepší zpětnou vazbu pro samotné hudebníky v orchestřišti. Ti mohou mít často v takto malém prostoru problém hrát jako celek vyrovnaně. Správným naklopením prohnutých odrazných panelů je také možné poskytnout prostor pro komunikaci mezi jevištěm a orchestřištěm.

Vyrovnanost orchestru a zpěváků by použitím odrazných ploch neměla být změněna. U sálu s orchestřištěm pod úrovní jeviště je také zásadní, že zvuk od orchestru se téměř vůbec nešíří k posluchači odrazem od bočních stěn sálu. Tato skutečnost napomáhá zpěvákům na pódiu, kteří jsou ve srovnatelné výškové úrovni s posluchači a jejich hlasu pomohou nejen odrazy od stropu, ale také od bočních stěn sálu.

S přihlédnutím ke zmíněným výsledkům se dá předpokládat, že nejlepším řešením problému akustiky Janáčkova divadla je použití odrazných ploch, případně jejich kombinace se sníženou hranou orchestřiště. Výsledné řešení v této práci je založeno především na

odsimulovaných hodnotách a je nutné ho otestovat v reálných podmínkách a diskutovat změny se samotnými členy orchestru.

15 Literatura

- [1] L. Beranek, Concert Halls and Opera Houses, New York: Springer-Verlag, 2004.
- [2] F. Kolmer a J. Kyncl, Prostorová akustika, Praha: STNL, 1982.
- [3] F. A. Everest, Master Handbook of Acoustics, McGraw-Hill, 2007.
- [4] J. Kaňka, Stavební fyzika 1: akustika budov, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007.
- [5] www.dot.ca.gov, „Noise Paths with Barrier,“ [Online].
Dostupné:
http://www.dot.ca.gov/hq/env/noise/online_training_module1/slides/slide91.htm.
[Přístup získán 10. 05. 2019].
- [6] H. Kuttruff, Room Acoustics, London: Spon Press, 2009.
- [7] D. O. Elorza, „Room acoustics modeling using the ray-tracing method: implementation and evaluation,“ 2005. [Online].
Dostupné:<https://pdfs.semanticscholar.org/165d/16d744fd58056c4fadb497a5937097f1ad14.pdf>. [Přístup získán 3. 12. 2018].
- [8] J. Schimmel, „Objektivní vlastnosti poslechových prostorů a jejich měření - přednáška,“ 2015. [Online].
Dostupné: <http://slideslive.com/38892802/objektivni-vlastnosti-poslechovych-prostoru-a-jejich-mereni>. [Přístup získán 20. 5. 2016].
- [9] F. Nováček, Úprava akustiky učebny, Praha, 2016.
- [10] Akustika hudebních prostorů v České republice 1, Akademie múzických umění v Praze, 2008.
- [11] M. Vondrášek a M. Antek ml., „Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů,“ [Online]. Dostupné: <http://radio.feld.cvut.cz/AES/schuze2004/vondrasek.pdf>.
[Přístup získán 30. 1. 2018].

- [12] V. L. Jordan, „Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques,“ *Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 47, pp. 408-412, 1970.
- [13] B. Markham, „Leo Beranek and Concert Hall Acoustics,“ *Acoustics Today*, 2014.
- [14] L. Beranek, „The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 129, 2011.
- [15] R. H. C. Wenmaekers, C. C. J. M. Hak a L. C. J. van Luxemburg, „On Measurements of Stage Acoustic Parameters: Time Interval Limits and various Source–Receiver Distances,“ *Acta Acoustica united with Acoustica*, sv. 98, p. 776 – 789, 2012.
- [16] M. Barron a H. Marshall, „Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: The derivation of a physical measure,“ 1981.
- [17] M. Vondrášek, M. Mikeš a R. Fleischman, *Akustika hudebních prostorů v České Republice*, Akademie múzických umění v Praze, 2008.
- [18] L. Beranek, „Concert Hall Acoustics,“ *Journal of the Audio Engineering Society*, sv. 56, č. 7/8, 2008.
- [19] D. Griesinger, „Spatial perception of distance, azimuth, and envelopment when the direct to reverberant ratio is below –6 dB.,“ v *Proceedings of the International Congresses on Acoustics*, Madrid, 2007.
- [20] D. Griesinger, „Why do concert halls sound different,“ [Online]. Dostupné: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiwtcCA3ozZAhVMK1AKHX4xDWlQFggoMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.davidgriesinger.com%2Fengagement6.ppt&usg=AOvVaw1iAj50AXv6jwcI5uSWE8xd>. [Přístup získán 30. 12. 2017].
- [21] M. Barron, *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Spon Press, 2009.
- [22] P. D'Antonio a T. Cox, „Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application,“ Florida, CRC Press, 2017, p. 77.

- [23] J. S. Bradley, „The evolution of newer auditorium acoustics measures,“ 1990.
- [24] S. Lu, X. Yan, J. Li a W. Xu, „The Influence of Shape Design on the Acoustic Performance of Concert Halls from the Viewpoint of Acoustic Potential of Shapes,“ 2016.
- [25] A. K. Klosak a A. C. Gade, „Relationship between room shape and acoustics of rectangular concert halls,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008.
- [26] M. Barron, „The development of concert hall design - A 111 year experience,“ *Institute of Acoustics - Spring Conference Futures in Acoustics*, 2006.
- [27] Y. Kwon, „Music Halls from the 18th to 20th Centuries: Changes in Acoustical and Architectural Criteria,“ *Joint ASA/CAA Meeting*, 2005.
- [28] T. Kamisiński, „Acoustic Simulation and Experimental Studies of Theatres and Concert Halls,“ *Acta Physica Polonica*, sv. 118, č. 1, 2010.
- [29] M. Long, „What is so special about shoebox halls? Envelopment, Envelopment, Envelopment,“ *Acoustics Today*, 2009.
- [30] L. Beranek, „Concert hall design: New findings,“ 2014.
- [31] J. S. Bradley, „Comparison of a fan-shaped and a rectangular hall,“ 1987.
- [32] J. S. Bradley, „Comparison of a multi-purpose hall with three well-known concert halls,“ 1991.
- [33] J. Pätynen a T. Lokki, „The Acoustics of Vineyard Halls, is it so Great After all?,“ *Acoustics Australia*, č. 1, pp. 33-39, 15 4 2015.
- [34] T. Cox a P. D'Antonio, „Engineering art: the science of concert hall acoustics,“ *Interdisciplinary Science Reviews*, sv. 28, č. 2, pp. 119-129, 2003.

- [35] M. Vondrášek, „Návrh a realizace akustiky sálu Filharmonie Hradec Králové, FHK,“ [Online]. Dostupné: http://www.fhk.cz/downloads/MV_FHK_Paper_33-IAC_CZ.pdf. [Přístup získán 15. 1. 2018].
- [36] V. L. Jordan, *Acoustical design of concert halls and theatres*, London: Applied Science Publishers, 1980.
- [37] L. Beranek, T. Hidaka a S. Masuda, „Acoustical design of the opera house of the New National Theatre, Tokyo, Japan,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 107, 2 2000.
- [38] M. Barron a S. Coleman, „Measurements of the absorption by auditorium seating - A model study,“ *Journal of Sound and Vibration*, sv. 239, 2001.
- [39] G. M. Naylor a R. K. Mackenzie, „Problems and priorities in orchestra pit design,“ *Institute Of Acoustics Proceedings*, sv. 7, č. 1, pp. 65-71, 1985.
- [40] A. C. Gade, J. Kapenekas, J. I. Gustafsson a B. T. Andersson, „Acoustical problems in orchestra pits - causes and possible solutions,“ v *Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics*, Rome, 2001.
- [41] M. Vercammen a M. Lautenbach, „Stage and pit acoustics in opera houses,“ v *International Symposium on Music and Room Acoustics*, Buenos Aires, 2016.
- [42] C. N. Blair, „Listening in the pit,“ *The Journal of the Acoustical Society of America* 103(5), 1998.
- [43] A. C. Gade a B. Mortensen, „Compromises in orchestra pit design: A ten-year trench war in The Royal Theatre Copenhagen,“ *Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 103, č. 5, 1998.
- [44] C. S. Clay a W. A. Kinney, „A comparison between the Biot-Tolstoy exact solution for wedge diffraction and a related solution that involves the Kirchhoff approximation,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 68, 1980.

- [45] D. Schröder, A. Pohl, U. P. Svensson a M. Vorlaender, „On the accuracy of edge diffraction simulation methods in Geometrical Acoustics,“ v *Proceedings of the Internoise*, New York, 2012.
- [46] R. . K. Mackenzie, „The acoustic design of partially enclosed orchestra pits,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 84, č. S1, p. 237–243, 1988.
- [47] J. Meyer, „Sound fields in orchestra pits,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, sv. 103, p. 337–338, 1998.
- [48] E. L. Harkness, „Performer tuning of stage acoustics,“ *Applied Acoustics*, sv. 17, p. 85–97, 1984.
- [49] E. Emmerich, L. Rudel a F. Richter, „Is the audiologic status of professional musicians a reflection of the noise exposure in classical orchestral music?,“ *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, sv. 265, č. 7, pp. 753-758, 2008.
- [50] A. Boasson, „Sound exposure of musicians in a pit orchestra,“ v *Proceedings of the Internoise*, Dearborn, 2002.
- [51] J. Lee, A. Behar, H. Kunov a W. Wong, „Musicians' noise exposure in orchestra pit,“ *Applied Acoustics*, sv. 66, pp. 919-931, 2005.
- [52] A. C. Gade, „Acoustics for choir and orchestra,“ *Royal Swedish Academy of Music*, sv. 52, pp. 23-43, 1986.
- [53] X. Zha, H. V. Fuchs a H. Drotleff, „Improving the acoustic working conditions for musicians in small spaces,“ *Applied Acoustics*, sv. 63, p. 203–221, 2002.
- [54] J. Deans, „Time for a Change In the Orchestra Pit,“ 15 11 2017. [Online].
Dostupné: <https://www.mixonline.com/live-sound/time-change-orchestra-pit-368914>.
[Přístup získán 28. 4. 2019].
- [55] J. Tuček a V. Moulík, „Rekonstrukce divadla J.K.Tyla v Plzni - Obklady v orchestřišti,“ Soning, Praha, 2012.

- [56] T. Kamiński, M. Burkot, J. Rubacha a K. Brawata, „Study of the Effect of the Orchestra Pit on the Acoustics of the Kraków Opera Hall,” *Archives of Acoustics*, sv. 34, č. 4, pp. 481-490, 2009.
- [57] „Janáčkovovo divadlo - Základní informace o budově,” [Online].
Dostupné: <http://www.ndbrno.cz/o-divadle/budovy/janackovo-divadlo>.
[Přístup získán 30. 11. 2018].
- [58] ČTK, „V Brně se chystá rozsáhlá oprava Janáčkova divadla,” 5 3 2007. [Online].
Dostupné: <https://www.archiweb.cz/n/home/v-brne-se-chysta-rozsahla-oprava-janackova-divadla>.
[Přístup získán 30. 11. 2018].
- [59] D. Alarcão, F. Gonçalves a J. L. B. Coelho, „An auralization procedure for a virtual room acoustics system,” *Congress on Sound and Vibration*, 2010.
- [60] A. Technologies, „AURA: increase accuracy - reduce calculation times!,” AFMG Technologies, [Online]. Dostupné: http://ease.afmg.eu/index.php/AURA_Module.html.
[Přístup získán 18. 12. 2018].
- [61] A. S. o. America, *Acoustical Terminology (ANSI/ASA S1.1-2013)*, Melville, NY, USA, 2013.
- [62] M. Morimoto, M. Jinya, K. Nakagawa a K. Sakagami, „Effects of Frequency Characteristics of Reverberation Time on Listener Envelopment,” *Proc. Forum Acusticum*, 2002.
- [63] L. Beranek, *Music, acoustics & architecture*, New York, 1962.
- [64] T. Hidaka, L. Beranek a N. Nishihara, „A comparison between shoebox and non-shoebox halls based on objective measurements in actual halls,” 2008.

Seznam elektronických příloh

Elektronická verze práce
Popis jednotlivých modelů
Nasimulovaná data jednotlivých modelů