



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Modelování vlivu úprav na akustické vlastnosti víceúčelového sálu

**Modelling of Influences of Modifications to Acoustic Parameters of
Multi-purpose Hall**

Diplomová práce

Studijní program: Inteligentní budovy

Vypracoval: Bc. Ondřej Simon
Vedoucí práce: prof. Ing. Ondřej Jiříček, CSc.

Praha 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Ondřej Simon**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Modelování vlivu úprav na akustické vlastnosti víceúčelového sálu**

Název tématu anglicky: **Modelling of Influence of Modifications to Acoustic Parameters of Multi-purpose Hall**

Pokyny pro vypracování:

Na základě rešerše akustických parametrů učeben, poslucháren a prostorů pro poslech hudby proveďte návrh úpravy konkrétního víceúčelového sálu. Vytvořte model v programu Odeon, ve kterém navrhnete několik návrhů na zlepšení stávající akustiky. Proveďte citlivostní analýzu modelu na modifikace sálu.

Seznam odborné literatury:

- [1] KUTTRUFF, Heinrich: *Room acoustics*. 5th ed. London: Spon Press/Taylor, 2009.
- [2] ČSN EN ISO 3382-1. *Akustika. Měření parametrů prostorové akustiky: Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [3] LONG, Marshall: *Architectural acoustics*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2006.

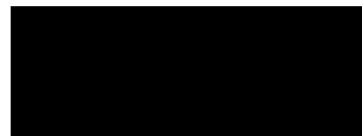
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Ondřej Jiříček, CSc. (K 13102)

Datum zadání diplomové práce: 13. února 2017

Platnost zadání do¹: 30. září 2018



Prof. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 13. 2. 2017

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Prohlášení

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

V Praze dne 20.5.2017

Ondřej Simon

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval prof. Ing. Ondřeji Jiříčkovi, CSc., za věnování jeho času, energie a iniciativy do vedení této diplomové práce. Stejně tak děkuji i panu Ing. Jiřímu Nováčkovi z fakulty stavební ČVUT v Praze za poskytnutí licence k simulačnímu prostředí nezbytnému k úspěšnému dokončení této práce.

Nemalý dík patří také celé mé rodině a přítelkyni Ivaně za neutuchající morální podporu.

Speciální poděkování bych rád věnoval mému středoškolskému učiteli fyziky, Mgr. Jaroslavu Tejchmanovi, který měl díky svému zápalu a perfektnímu přístupu k výuce zásadní vliv na výběr oboru, který jsem se rozhodl studovat.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá vlivem úprav interiéru víceúčelového sálu na jeho akustické vlastnosti. Jsou zde popsány teoretické základy prostorové akustiky, včetně metod měření impulsové odezvy a definic jednotlivých zkoumaných parametrů. V rámci praktické části bylo provedeno reálné měření impulsové odezvy v konkrétním víceúčelovém sálu, na jehož základě bylo doporučeno několik variant akustických úprav tak, aby prostor splňoval požadavky akustického komfortu pro jeho předpokládané využití. Byl vytvořen 3D počítačový model sálu a v prostředí ODEON byly provedeny simulace za účelem zjištění vlivu úprav na jednotlivé akustické parametry. Závěry takto získané byly porovnány z různých aspektů, ať už akustických, či neakustických. Závěrem byla provedena citlivostní analýza modelu na drobné modifikace sálu a vnitřních podmínek, která měla za cíl odhalit skutečnosti kritické pro relevanci modelových výsledků. Výsledkem této citlivostní analýzy je pak obecný doporučující postup, jak při simulacích měření podobných prostorů postupovat.

Klíčová slova

prostorová akustika, impulsová odezva, víceúčelový sál, doba dozvuku, počáteční a pozdní akustická energie, síla zvuku, akustická simulace, modelování v akustice, ray tracing

Abstract

This diploma thesis deals with influences of interior modifications of a multi-purpose hall to its acoustic parameters. Theoretical background of room acoustics is presented in this thesis, including the impulse response measurement methods and particular acoustic parameters definitions. In the practical part, a real impulse response measurement of a multi-purpose hall is described, which creates the base for suggesting several variations of interior modifications. These modifications are made to reach relevant acoustic comfort in the hall. A 3D computer model of the room is created, on which acoustic simulations in ODEON software take place to get more detailed results of modification influences to the acoustic comfort. These results are then compared from different aspects, both acoustic and non-acoustic. At the end of the thesis, sensitivity and resolution analysis of the model is done, to reveal facts critical to relevant modelling results. A general suggesting procedure of measuring and modelling such rooms in acoustics is then presented.

Key words

room acoustics, impulse response, multipurpose hall, reverberation time, clarity measures, early and late sound energy, sound strength, acoustic simulation, acoustic modelling, ray tracing

Seznam použitých zkratk a symbolů

α	činitel zvukové pohltivosti
$\delta(t)$	Diracův impuls
A	pohltivost
BR	Basový poměr (z anglického <i>Bass Ratio</i>)
C_{50}	Míra zřetelnosti (dB)
C_{80}	Míra jasnosti (dB)
D_{50}	Zřetelnost
EDT	Počáteční doba dozvuku (z anglického <i>Early Decay Time</i>)
f_{vz}, f_s	Vzorkovací frekvence
G	Síla zvuku (dB)
$IACC$	Činitel interaurální vzájemné korelace (z anglického <i>Inter-aural Cross Coefficient</i>)
$iTSP$	Inverzní průběh TSP signálu
IR	Impulsová odezva (z anglického <i>Impulse Response</i>)
J_{LF}, LF	Míra počáteční boční energie
LTI	Lineární časově invariantní (z anglického <i>Linear Time Invariant</i>)
MLS	Pseudonáhodná posloupnost maximální délky (z anglického <i>Maximum Length Sequence</i>)
SDK	sádrokarton
SNR	Poměr signál-šum (z anglického <i>Signal to Noise Ratio</i>)
T, T_{30}, T_{20}	Doba dozvuku
T_s	Čas těžiště
T_{vz}	Vzorkovací perioda
TSP	Puls roztažený v čase (z anglického <i>Time Stretched Pulse</i>)

Obsah

Obsah	6
1. Úvod	8
2. Impulsová odezva a její měření v akustice	10
2.1 Metody měření impulsové odezvy v akustice	10
2.2 Porovnání jednotlivých metod měření IR v akustice	14
3. Objektivní akustické parametry prostoru	15
3.1 Doba dozvuku.....	15
3.2 Počáteční doba dozvuku <i>EDT</i>	17
3.3 Síla zvuku <i>G</i>	18
3.4 Vyváženost počáteční a pozdní energie	19
3.5 Basový poměr <i>BR</i>	21
3.6 Míra počáteční boční energie J_{LF}	22
3.7 Binaurální míry <i>IACC</i>	22
3.8 Další objektivní akustické parametry	23
3.9 Shrnutí.....	24
4. Metody výpočtů v prostorové akustice	25
4.1 Empirické (statistické) výpočty na základě dozvukové rovnice	25
4.2 Softwarové modelování a simulace prostorové akustiky.....	26
4.3 Shrnutí metod	27
5. Zakotvení prostorové akustiky v legislativě ČR	28
5.1 Technické normy o prostorové akustice	28
5.2 Zákony ČR obsahující témata prostorové akustiky	31
5.3 Kategorizace víceúčelových sálů a optimální pásmo jejich doby dozvuku.....	32
6. Zkoumaný prostor – Kulturní dům Bechlín	34
6.1 Obecné problémy prostorové akustiky víceúčelových sálů	34
6.2 Kulturní dům Bechlín – představení prostoru	35
6.3 Důvody a cíle optimalizace prostorové akustiky KD v Bechlíně	38
6.4 Uvažované varianty optimalizace.....	38
7. Měření doby dozvuku a vyhodnocení stávajícího stavu prostorové akustiky KD Bechlín	40
7.1 Měření doby dozvuku v KD Bechlín.....	40
8. Tvorba počítačového 3D modelu sálu	43
8.1 Představení prostředí SketchUp.....	43
8.2 Jednotlivé modelované varianty	44
9. Simulace prostorové akustiky v prostředí Odeon	48
9.1 Představení prostředí Odeon	48
9.2 Import a kalibrace modelu v prostředí Odeon	51
9.3 Výpočet objektivních akustických parametrů	55
9.4 Shrnutí závěrů simulace	65
10. Optimalizace prostorové akustiky kulturního domu Bechlín	67
10.1 Postup optimalizace	67
10.2 Varianta 1 – materiály na minerální bázi	70
10.3 Varianta 2 – materiály na bázi perforovaného sádkokartonu	78
10.4 Varianta 3 – solitérní, volně zavěšené prvky.....	83
10.5 Varianta 4 – modulární řešení.....	89

10.6	Vzájemné porovnání variant a shrnutí	96
11.	Citlivostní analýza počítačové simulace prostorové akustiky	100
11.1	Počet použitých paprsků pro ray tracing.....	100
11.2	Volba konkrétního materiálu z databáze	103
11.3	Pohltivost publika.....	106
11.4	Teplota vzduchu	108
11.5	Vlhkost vzduchu	110
11.6	Výška svěšení solitérních stropních panelů.....	112
11.7	Shrnutí.....	115
12.	Závěr	116
13.	Použitá literatura	118
14.	Dodatek 1	121
15.	Dodatek 2	124

1. Úvod

Víceúčelové sály jsou v posledních letech velmi rozvíjeny. Díky systémům evropských a regionálních dotací je v současnosti téměř jakékoliv obci umožněno vlastnit prostor, který lze pravidelně využívat jak pro divadelní, hudební a mluvené produkce, tak pro sportovní, vzdělávací, či jiné rekreační účely.

Aby takový prostor mohl správně plnit svoji funkci, je nezbytné zajistit optimální vnitřní podmínky, mezi které spolu s tepelným a světelným komfortem patří i komfort akustický, který zajistí věrný přednes hudby či mluveného slova během produkcí, a současně ochrání uživatele prostoru před příliš vysokými hladinami akustického tlaku.

Akustický komfort je ve většině případů víceúčelových sálů řešen rekonstrukcí interiéru, kdy jsou použity správně zvolené materiály a prvky, které kromě základních požadavků na vzhled, kvalitu, mechanickou a požární odolnost plní ještě akustickou funkci – tedy fungují jako zvukově pohltivé, odrazivé, či difuzní plochy.

Finální návrh interiéru je výsledkem procesu rešerší, měření, výpočtů a simulací. Tato práce si dává za cíl celý tento postup podrobně prozkoumat, odhalit kritická místa a doporučit obecný přístup, jak při návrhu interiéru víceúčelových sálů postupovat.

V první části práce je představena teorie prostorové akustiky. Jsou popsány jednotlivé používané metody měření impulsové odezvy v akustice a definovány objektivní akustické parametry, které je možné ze získaných dat analyzovat. U každého parametru je pak uveden i jeho subjektivní význam na vjem reálného posluchače, a také míra relevance jeho zkoumání u víceúčelových sálů.

Dále jsou představeny různé metody výpočtu akustických parametrů, od jednodušších empirických výpočtů podle Sabinovy/Eyringovy rovnice doby dozvuku až po počítačové simulace pomocí ray tracingu. Jednotlivé metody jsou porovnány z hlediska svých silných a slabých stránek a relevance výsledků jimi získanými. Stručně je také popsána současná legislativa ČR zabývající se otázkami prostorové akustiky.

V praktické části práce je pak popsáno měření impulsové odezvy reálného víceúčelového sálu, které proběhlo v březnu roku 2016 ve středočeské obci Bechlín. Měření tamějšího víceúčelového sálu bylo provedeno za účelem stanovení stávajícího stavu a navržení vhodných akustických úprav k dosažení přijatelné akustické pohody.

Data získaná během reálného měření posloužila jako výchozí pro následné počítačové simulace prostorové akustiky v prostředí ODEON. Simulace prostorové akustiky obecně jsou sofistikovanou možností, jak získat představu o akustických vlastnostech libovolného uzavřeného prostoru i v případě, kdy provedení reálného měření impulsové odezvy není z jakéhokoliv důvodu možné. V našem případě se jednalo o získání více akustických parametrů, které vzhledem k typu použitého měřicího signálu nemohly být z reálného měření určeny, a o prozkoumání akustických vlastností dnes známého sálu po provedení budoucích interiérových úprav.

V prostředí Trimble SketchUp a ODEON byl vytvořen model zkoumaného sálu na základě známých rozměrů a skladby povrchových materiálů. Tento model byl zkalibrován podle dat z reálného měření a následně podroben důkladné simulaci, jejímž výstupem jsou prostorové a frekvenční závislosti relevantních akustických parametrů.

Následně bylo navrženo několik variant akustické optimalizace interiéru. Jednotlivé varianty byly aplikovány do vytvořeného 3D modelu a byl zkoumán jejich vliv na jednotlivé akustické parametry. Všechny varianty byly porovnány z různých akustických i ne-akustických aspektů tak, aby bylo možné nalézt optimální řešení pro konkrétní prostor.

Závěrem práce byla provedena citlivostní analýza vytvořeného počítačového modelu. Byl zkoumán vliv změn nastavení simulace a vnitřních podmínek modelu na jednotlivé parametry. U každého aspektu byly hledány typické body (změna, rozdíl, oblast,...), které mají zásadní vliv na přesnost modelovaných výsledků. Výstupem této citlivostní analýzy je obecné doporučení, jak při simulaci prostorové akustiky podobných prostor postupovat.

Obecně je prvním cílem této diplomové práce poskytnout kvalitní teoretický základ v oblasti prostorové akustiky, včetně postupů výpočtů a reálných měření objektivních akustických parametrů. Tento základ může posloužit jako studijní materiál nebo jako podklad pro další rozvíjení problematiky.

Druhým cílem je představit konkrétní případ optimalizace akustické pohody víceúčelového sálu, včetně provedení reálného měření, tvorby 3D modelu, kalibrace, simulace a různých výsledných variant úprav porovnaných z různých hledisek, ať už akustických, či ne-akustických (finanční, časová, modulární,...).

Třetím cílem práce je prezentovat závěry provedené citlivostní analýzy počítačového modelu a odhalit tak kritická místa a kroky, kterým je vhodné během simulace věnovat dostatečnou pozornost, aby byla zachována vysoká vypovídací hodnota modelových výsledků.

2. Impulsová odezva a její měření v akustice

Obecná systémová teorie říká, že veškeré vlastnosti libovolného lineárního přenosového systému jsou obsaženy v jeho impulsově odezvě IR (z anglického *Impulse Response*) [1]. V případě, že budou vlastnosti takového systému časově stabilní, hovoříme o soustavě *LTI* (z anglického *Linear Time Invariant* – lineární, časově invariantní). Impulsová odezva takového systému poté odpovídá signálu na jeho výstupu v případě, že je celý systém vybuzen Diracovým impulsem $\delta(t)$, jak ukazuje obr. 1:



Obrázek 1: Princip impulsově odezvy LTI soustavy

Akustické vlastnosti uzavřených prostorů jsou dány jejich celkovým objemem, plochou a akustickými vlastnostmi použitých materiálů. Vzhledem k tomu, že všechny tyto vlastnosti jsou ve většině případů stabilní, stačí pouze zavést zjednodušující kritérium linearity a na uzavřený prostor lze z hlediska akustiky a impulsově odezvy nahlížet jako na soustavu *LTI*.

Diracův impuls (nebo *Diracovo delta*) je obecně matematicky popsán jako funkce, která má v 0 časové osy hodnotu $+\infty$ a všude jinde nulovou [2]. V akustice považujeme za Diracův signál impulsní zvuk, který má v celém zkoumaném frekvenčním spektru stejnou energii a je nekonečně krátký.

2.1 Metody měření impulsově odezvy v akustice

Z výše uvedeného vyplývá, že k získání impulsově odezvy libovolného uzavřeného prostoru by stačilo jej vybudit Diracovým impulsem $\delta(t)$. Z jeho matematické podstaty je však zřejmé, že v reálných podmínkách není možné vytvořit impuls nekonečně úzký s nekonečně vysokou amplitudou. Je tedy nutné jako budící signál použít signál náhradní, který vykazuje alespoň podobné vlastnosti, jako Dirac. Volba vhodného měřicího signálu na základě podmínek během měření je pro přesnost výsledků kritická [3].

Metoda výstřelem

Prvním přístupem, jak nahradit Diracův signál, je použít signál, jehož amplitudová charakteristika je v daném zkoumaném frekvenčním pásmu co nejvíce plochá, a současně je celý signál co nejkratší. Vhodnými zdroji takových signálů mohou být např. výstřely slepých nábojů, prasknutí balonků nebo elektrické výboje. Konkrétní zdroj by měl být volen vzhledem k celkovému objemu měřeného prostoru tak, aby byl dostatečně vybuzen v celém zkoumaném spektru a zároveň aby nedošlo k přebuzení měřicího přístroje, případně poškození sluchu obsluhy vysokými hladinami akustického tlaku. Obecně se doporučuje použití osobních ochranných pomůcek v podobě hluchátek pro eliminaci vysokých hladin akustického tlaku.

Výhodou této metody je její jednoduchost a dostupnost měřicích signálů, hlavní nevýhodou je pak poměrně nízká hodnota parametru SNR (z anglického *Signal to Noise Ratio* – odstup signálu od šumu) a časté nedostatečné vybuzení prostoru na nízkých frekvencích.

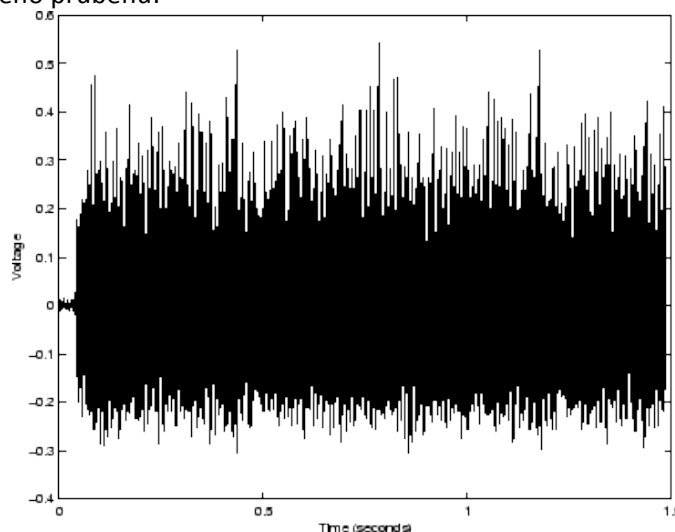
Metoda MLS

Sofistikovanější metodou měření IR v akustice je použití pseudonáhodné posloupnosti maximální délky – MLS (z anglického *Maximum Length Sequence*). Jde o periodickou binární posloupnost, která je do analogového signálu převáděna jednoduchou konverzí:

Tabulka 1: Analogová konverze MLS signálu

Binární hodnota	Analogová amplituda
Logická „1“	+A
Logická „0“	-A
kde A – zvolená amplituda signálu	

V případě správného nastavení má tento signál velmi ploché spektrum v pásmu 20 Hz až 20 kHz a mnohem lepší hodnotu SNR , než metoda výstřelu nebo exploze. Lidským sluchem je tato posloupnost vnímána jako širokopásmový šum. Vzhledem k tomu, že v rámci praktické části této práce nebyl signál MLS použit, jeho podrobný výklad a matematické odvození přesahuje potřeby této práce, ale může být nalezeno např. v článku [4]. Zde uvedeme pouze příklad jeho typického průběhu:



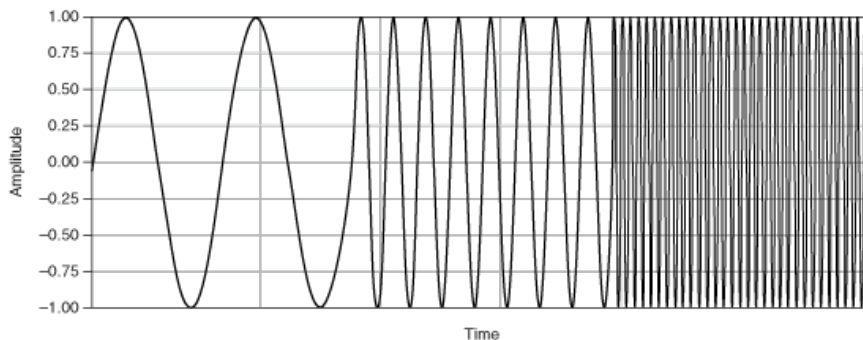
Obrázek 2: Příklad MLS signálu (převzato z [5])

Zásadní nevýhoda této metody je chyba vznikající časovým aliasingem v případě špatného nastavení parametrů měřicího signálu. K její eliminaci je nezbytné, aby délka jedné periody posloupnosti byla delší, než předpokládaná impulsová odezva prostoru, která bude měřena [3].

Metoda přeladovaného sinu

Dalším měřicím signálem impulsově odezvy v akustice je tzv. *swept sine*. Z jeho názvu je již částečně zřejmé, že se jedná o sinusové signály, které jsou v čase přeladovány (zpravidla od nízkých frekvencí k vysokým). Výsledná impulsová odezva prostoru je rovna podílu spektra získané impulsově odezvy systému na *sweep* signál a spektra samotného *sweepu*. Hlavní nevýhodou této metody je možnost jejího použití pouze v časové oblasti. V případě

transformace do frekvenční oblasti dochází k výpočetním chybám způsobeným častým dělením čísly blízkými nule.

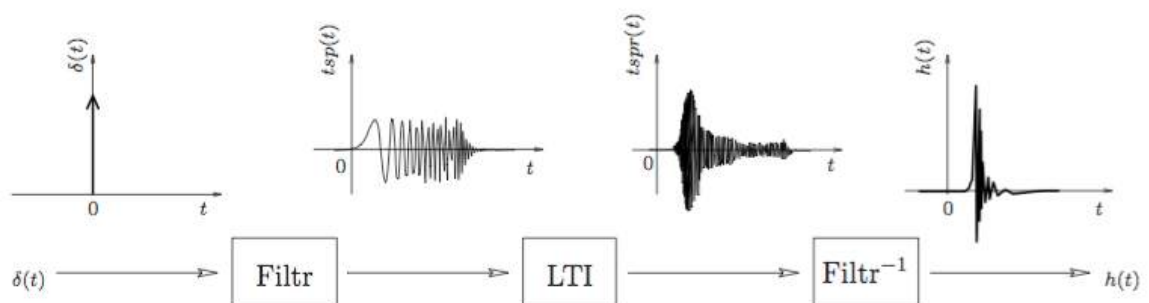


Obrázek 3: Příklad swept sine signálu (převzato z [6])

Metoda TSP

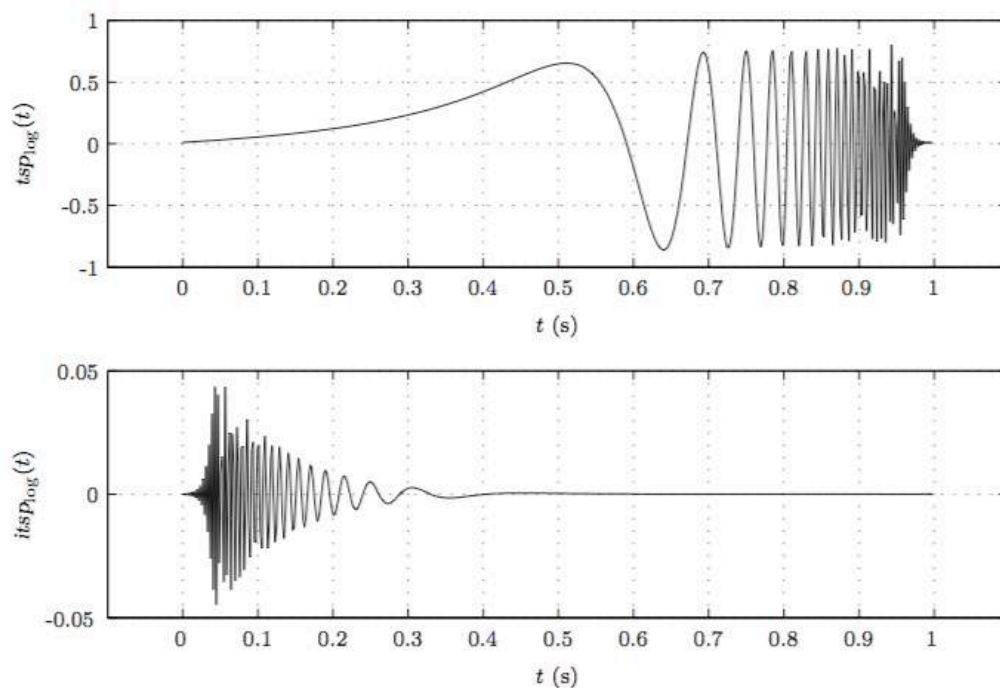
Signály pulsu roztaženého v čase *TSP* (z anglického *Time Stretched Pulse*) jsou v současnosti asi nejsložitějšími signály pro měření impulsové odezvy v akustice, ale nejen v ní. Metoda *TSP* si klade za cíl zvýšit množství emitované zvukové energie a tím i zlepšit parametr *SNR* bez současného zvyšování vlivu nelinearit měřicího řetězce [3].

Princip metody *TSP* znázorňuje obrázek 3. Diracův impuls $\delta(t)$ je filtrován speciálním filtrem, který jeho energii rozloží v čase podle frekvence. Dochází k roztažení $\delta(t)$ v čase a vzniká měřicí signál $t_{sp}(t)$. Ten vstupuje do zkoumané *LTI* soustavy, v našem případě je jím tedy akusticky vybudzen zkoumaný prostor. Získaná impulsová odezva $t_{spr}(t)$ je na závěr filtrována inverzním filtrem, čímž je na jeho výstupu získána impulsová odezva *LTI* soustavy na Diracův impuls $\delta(t)$.



Obrázek 4: Princip metody *TSP* (převzato z [7])

K převodům signálů z frekvenční do časové oblasti (a zpět) je využívána funkce zpětné Fourierovy transformace \mathcal{F}^{-1} (resp. její přímá podoba \mathcal{F} v případě převodu z časové domény do frekvenční). Podle průběhu skupinového zpoždění použitého filtru lze TSP signály rozdělit na lineární, logaritmické a warped. Detailně jsou všechny typy popsány např. v bakalářské práci [8], zde uvedeme pouze příklad průběhu logaritmického TSP:

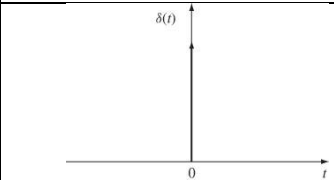
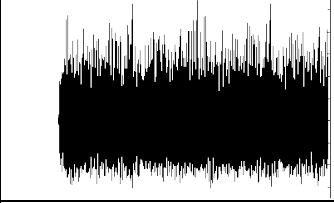
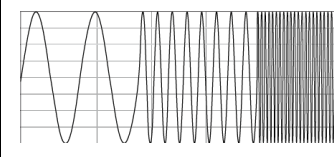
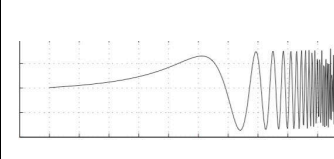


Obrázek 5: Časový průběh logaritmického TSP (převzato z [7])

2.2 Porovnání jednotlivých metod měření IR v akustice

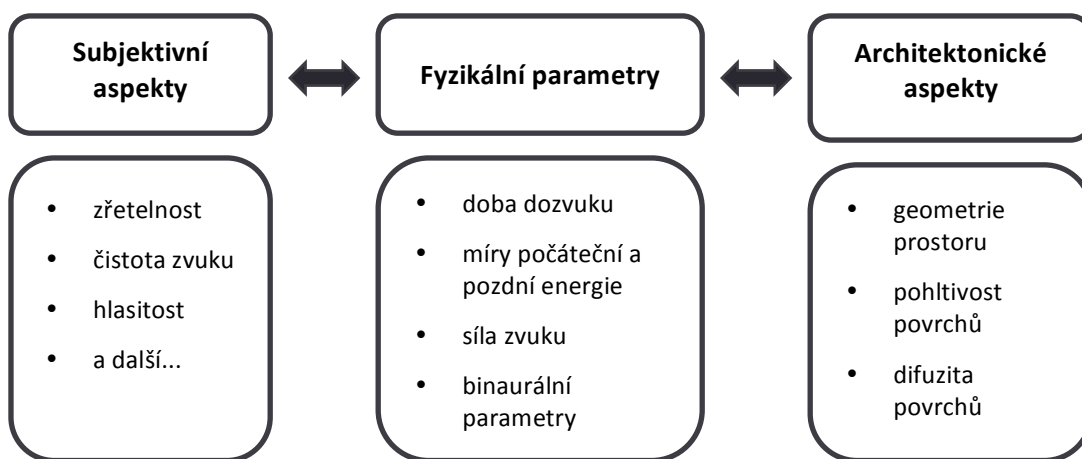
Následující tabulka znázorňuje přehled výše popsaných metod měření impulsové odezvy v akustice spolu s jejich výhodami a nevýhodami:

Tabulka 2: Porovnání metod měření IR v akustice

Metoda	Typ signálu	Výhody	Nevýhody
Výstřel		<ul style="list-style-type: none"> - jednoduchost - dostupnost 	<ul style="list-style-type: none"> - nízké SNR - slabé vybuzení nízkých frekvencí
MLS		<ul style="list-style-type: none"> - dobré SNR - plochá amplitudová charakteristika 	<ul style="list-style-type: none"> - časový aliasing v případě špatného nastavení
Swept sine		<ul style="list-style-type: none"> - dobré SNR - optimální amplitudová charakteristika 	<ul style="list-style-type: none"> - nemožnost použití ve frekvenční oblasti
TSP		<ul style="list-style-type: none"> - dobré SNR - optimální amplitudová charakteristika 	<ul style="list-style-type: none"> - výpočetně nejnáročnější

3. Objektivní akustické parametry prostoru

Pro popis akustických vlastností uzavřeného prostoru existuje celá řada objektivně měřitelných parametrů. Tyto parametry představují jakýsi spojovací prvek mezi světem subjektivního vnímání a architekturou prostoru, sestávající z geometrie daného prostoru, mírou pohltivosti povrchů, množstvím difúzních prvků a dalších aspektů, jak znázorňuje následující obrázek [1]:



Obrázek 6: Význam objektivních akustických parametrů

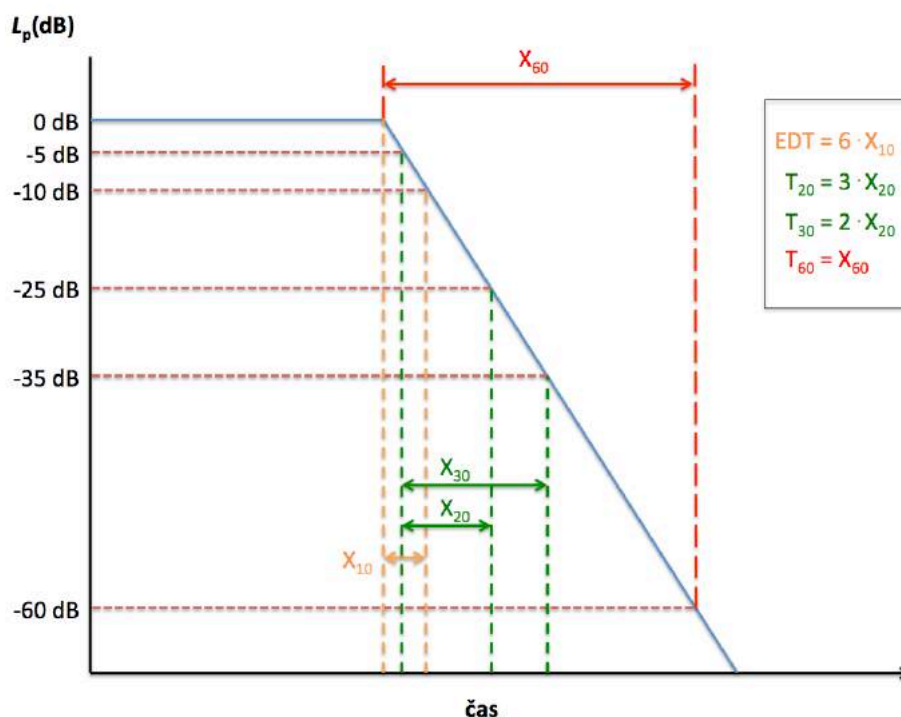
Všechny tyto parametry úzce korelují se subjektivním vnímáním akustické kvality prostoru a jsou matematicky snadno získatelné z naměřené impulsové odezvy. Správně naměřená impulsová odezva je tak zdrojem veškerých informací ohledně akustických vlastností zkoumaného prostoru v daném měřicím bodě, které lze využít pro návrh akustické optimalizace [1].

Technické požadavky a postupy měření těchto parametrů jsou (mimo jiné) obsahem normy ČSN EN ISO 3382-1 [9]. Následující podkapitoly představují jednotlivé objektivní akustické parametry včetně jejich matematické definice, subjektivního významu a relevance pro zkoumání víceúčelových sálů.

3.1 Doba dozvuku

Základním parametrem pro hodnocení akustických vlastností prostoru je jeho doba dozvuku. Ta je definována jako čas, během kterého dojde k poklesu nahromaděné akustické energie na 10^{-6} původní hodnoty. V hladinovém vyjádření tato hodnota odpovídá poklesu o 60 dB.

Způsobů měření doby dozvuku je několik, všechny však vychází z proložení poklesové křivky přímkou, jak znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 7: Způsoby určení doby dozvuku

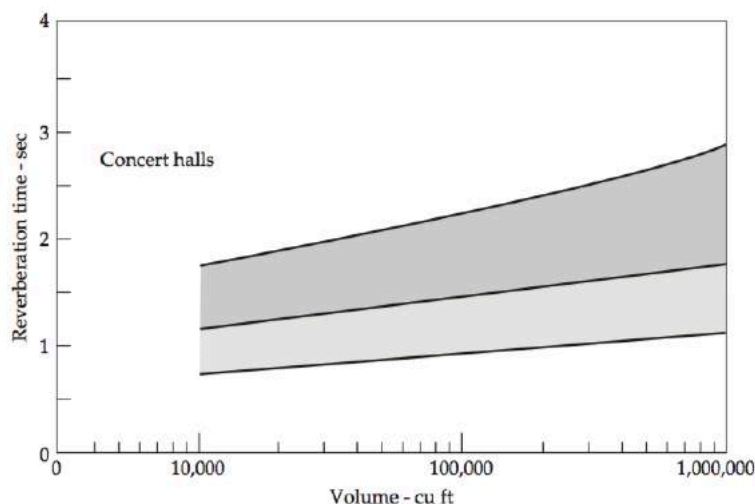
Proložení poklesové křivky v celém rozmezí 60 dB podle definice se v praxi nevyužívá. Důvodem je obvyklé nedostatečné vybudování prostoru o více jak 60 dB oproti hluku pozadí. Stejně tak se jako horní mez proložení obvykle nevolí 0 dB, kde se často vyskytuje zkreslení vzniklé v okamžiku ukončení působení zdroje zvuku. Podle zvolené délky proložení se výsledná doba dozvuku získává vynásobením skutečné doby poklesu mezi zvolenými body odpovídajícím faktorem a parametr doby dozvuku je indexován tak, aby bylo zřetelné, jakým způsobem byl získán:

$$T_{30} = 2 \cdot \Delta t = 2 \cdot (t_{-35 \text{ dB}} - t_{-5 \text{ dB}}), \quad \text{pro proklad od } -5 \text{ do } -35 \text{ dB.} \quad (1)$$

$$T_{20} = 3 \cdot \Delta t = 3 \cdot (t_{-25 \text{ dB}} - t_{-5 \text{ dB}}), \quad \text{pro proklad od } -5 \text{ do } -25 \text{ dB.} \quad (2)$$

Stejně jako většina ostatních akustických veličin je i doba dozvuku frekvenčně závislá a je tedy potřeba ji pro každé zkoumané frekvenční pásmo určit zvlášť.

V případě uvažování všech možných uzavřených prostor od bezodrazových místností, kde doba dozvuku není teoreticky definovaná a kde se reálné hodnoty pro všechna frekvenční pásma pohybují v setinách až desetinách sekund, až po velké katedrály, kde doba dozvuku může přesahovat pět sekund, je zřejmé, že optimální hodnota doby dozvuku se bude lišit pro každý konkrétní prostor na základě jeho rozměrů a předpokládaného využití. O tuto optimální hodnotu se vedou v celé akustické společnosti diskuse už od samého začátku měření doby dozvuku. Přesné stanovení optimální hodnoty znemožňuje subjektivní vnímání zvuku každého posluchače, proto se spíše než doporučené hodnoty uvádějí různá toleranční pásma. Některá jsou zakotvena v technických normách, jiná jsou uváděna v odborné literatuře na základě dlouholetých zkušeností a porovnávání. V každém případě tato toleranční pásma vždy přímo závisí na velikosti daného prostoru, resp. jeho celkovém objemu, a funkci, kterou má tento prostor plnit. Příklad takového tolerančního pásma pro koncertní sály dle [11] je na následujícím obrázku:



Obrázek 8: Doporučené toleranční pásmo doby dozvuku pro koncertní síně (převzato z [11])

U otázky optimálních hodnot doby dozvuku pro víceúčelové sály musíme uvažovat několik skutečností. V ideálním případě by měl prostor splňovat podmínky podle funkce, kterou právě plní (koncertní sál, divadelní sál, sportovní hala,...). Jediným řešením by v tomto případě byly speciální modulární systémy tvořené akustickými prvky, které lze snadno a rychle upravovat a přesouvat podle potřeby. Tyto prvky však většinou nemají dostatečnou mechanickou odolnost, aby mohly být použity pro funkci sportovní haly a navíc jsou poměrně nákladným řešením, které ve většině případů nepřipadá vůbec v úvahu z ekonomických důvodů.

Výsledkem tak většinou bývá, že optimální pásmo doby dozvuku se určuje jako kompromis mezi doporučenými hodnotami pro koncertní sál, sál pro přednes mluveného slova a sportovní halu.

3.2 Počáteční doba dozvuku *EDT*

Počáteční doba dozvuku *EDT* (z anglického Early Decay Time) je získána obdobně, jako klasická doba dozvuku, tedy z prokladu poklesové křivky přímkou. Při výpočtu *EDT* se pro sklon poklesové křivky uvažují body 0 a -10 dB (viz. obr. 7). Doba tohoto prokladu je následně násobena faktorem 6 k získání odpovídající doby poklesu o 60 dB při zachování počátečního sklonu.

Výhoda *EDT* se projevuje zejména u geometricky složitějších prostorů, kde je klasická doba dozvuku ovlivněna množstvím odrazů s různým zpožděním a různou okamžitou akustickou energií. Parametr *EDT* je naopak ovlivněn zejména brzkými odrazy a proto mnohem více záleží na poloze měřicího bodu a geometrii prostoru [1].

Počáteční doba dozvuku je tak důležitá zejména pro oblasti, jakými jsou krajní řady sedadel, balkony, či prostory pod nimi. Při zkoumání samotné doby dozvuku by v těchto oblastech mohlo docházet ke zkreslení výsledků a následným chybám při optimalizaci akustických vlastností.

Množství studií (např. [12,13]) shledalo parametr *EDT* jako podstatně lepší indikátor subjektivního vnímání dozívání, než je klasická doba dozvuku. Hodnoty *EDT* a klasické doby dozvuku jsou ve většině případů velmi podobné. V určitých výjimkách však jejich diference může indikovat akustické zvláštnosti zkoumaného prostoru, které by měly být v rámci měření a vyhodnocení důkladněji prozkoumány [13].

Zajímavým parametrem může být také poměr *EDT* ke klasické době dozvuku. Hodnoty tohoto poměru v rozmezí 0,8 až 1,1 mohou být známkou vyšší směrovosti geometrie prostoru, kdy povrchy sálu směřují brzké odrazy přímo do oblasti hlediště [12].

U víceúčelových sálů, které ve většině případů podstatněji geometrickou složitost nevykazují, jsou hodnoty EDT téměř shodné s hodnotami klasické doby dozvuku, a tak tomuto parametru nemusíme přisuzovat zásadní význam.

3.3 Síla zvuku G

Síla zvuku G je definována jako logaritmus poměru zvukové energie získané impulsové odezvy k energii odezvy pořízené ve vzdálenosti 10 m od téhož zdroje zvuku ve volném poli [9]:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \quad (\text{dB}), \quad (3)$$

kde

$$L_{pE} = 10 \log \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad \text{a} \quad L_{pE,10} = 10 \log \left[\frac{1}{T_0} \int_0^{\infty} \frac{p_{10}^2(t) dt}{p_0^2} \right] \quad (\text{dB}),$$

kde $p(t)$ je okamžitý akustický tlak impulsové odezvy v měřicím bodě, $p_{10}(t)$ je totéž ve vzdálenosti 10 m ve volném poli, p_0 je 20 μPa , $T_0 = 1$ s, L_{pE} je hladina expozice akustickému tlaku $p(t)$ a $L_{pE,10}$ je hladina expozice akustickému tlaku $p_{10}(t)$.

Síla zvuku G je v současnosti považována za nejlepší indikátor subjektivně vnímané hlasitosti zvuku [1, 12]. Ačkoliv se může zdát, že síla zvuku v určitém místě uzavřeného prostoru přímo závisí na akustickém výkonu zdroje, geometrii prostoru a pohltivosti obklopujících povrchů, tato závislost platí pouze pro dokonale difuzní prostory a nelze ji zobecnit pro všechny typy reálných prostorů [1]. Z toho důvodu se síla zvuku G jeví jako užitečný parametr pro popis akustických vlastností prostoru.

Obecné doporučení optimální síly zvuku $G > 0$ dB je příliš jednoduché a vzhledem k její závislosti na vzdálenosti od zdroje platí pouze pro sály s maximální kapacitou 3.000 sedících diváků a největší vzdáleností sedadlo – podium 40 m [12]. Pro sály s větší kapacitou nebo rozměry je nutné sílu zvuku přizpůsobovat jako kompromis mezi oblastmi jejího maxima a minima, aby nedocházelo ani k nepřiměřeným, ani k nedostatečným vnímaným hlasitostem. Zajímavý je fakt, že během subjektivních testů jsou zadní sedadla sálů často hodnocena jako nejtišší místa, i když se v nich minimum prostorové závislosti G nenachází. Důvodem je jistý subjektivní předpoklad účastníků testů nedostatečné hlasitosti v zadních řadách [12].

U víceúčelových sálů se nejedná o zásadní parametr. Jediným kritériem, které by síla zvuku měla splňovat, je $G > 0$ dB v celém prostoru sálu, aby bylo zajištěno dostatečné vybuzení i vzdálenějších míst od zdroje zvuku.

3.4 Vyváženost počáteční a pozdní energie

V této skupině existuje několik objektivních parametrů popisujících subjektivně vnímanou jasnost zvuku. Některé zdroje je definují také jako vyváženost mezi jasností zvuku a dozníváním [13]. Pro všechny tyto parametry hraje hlavní roli poměr počáteční energie přímého zvuku k energii pozdní. Tento základní poměr je obecně definován jako:

$$C_{t_e} = 10 \log \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}), \quad (4)$$

kde C_{t_e} je index počáteční energie k pozdní, t_e časová hranice a $p(t)$ okamžitý akustický tlak impulsové odezvy v měřicím bodě.

Časová hranice t_e se stanovuje rozdílně podle toho, zda je zkoumaný prostor primárně určen pro produkci mluveného slova nebo hudby, jak popisují následující veličiny:

Míra zřetelnosti C_{50}

Míra zřetelnosti C_{50} udává akustické kritérium zřetelnosti pro mluvené slovo a je definována jako:

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}). \quad (5)$$

Obecně platí, že každá hodnota nad 0 dB ukazuje na dobrou srozumitelnost mluveného slova. Naopak hodnoty nižší než -5 dB definují zkoumaný prostor jako nevhodný pro produkci mluveného slova [14]. Parametr C_{50} je obecně velmi prostorově závislý a může tak být vhodným měřítkem subjektivně vnímané kvality přednesu. [11]

Zřetelnost D_{50}

Zřetelnost D_{50} je ekvivalentem k míře zřetelnosti C_{50} a je definována jako:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05s} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (-). \quad (6)$$

Optimální rozmezí D_{50} je přímo závislé na hodnotách C_{50} a v případě uvažování optima $-5 \text{ dB} < C_{50} < 3 \text{ dB}$ odpovídá doporučená hodnota D_{50} rozmezí 0,25 až 0,7. Současné studie si však ve většině případů vystačí pouze s parametrem C_{50} , zřetelnost D_{50} je uváděna z historického důvodu jako parametr této skupiny, který byl definován jako první.

Z výše uvedených vztahů je také zřejmá vzájemná závislost parametrů C_{50} a D_{50} :

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \quad (\text{dB}). \quad (7)$$

Míra jasnosti C_{80}

Míra jasnosti C_{80} je ekvivalentem C_{50} v případě, že zkoumáme vhodnost prostoru pro hudební produkci. Jediným rozdílem mezi C_{50} a C_{80} je posunutí časové integrační hranice, jak napovídá indexování parametru. Matematicky je míra jasnosti definována jako:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}). \quad (8)$$

Obecně lze říci, že hodnota C_{80} by měla být tím vyšší, čím kratší noty jsou hrány v rámci konkrétní pasáže produkované hudby (aby nedocházelo k jejich splývání). Na rozdíl od míry zřetelnosti je však zde potřeba dbát i na horní hranici parametru míry jasnosti. Ta by neměla překročit 8 dB, kdy by energie odrazů byla v porovnání s energií přímé vlny od zdroje už příliš malá, a docházelo by tak ke zkreslení prostorového vnímání zvuku [11]. Pro lepší představu uvedme, že typické rozmezí parametru C_{80} se v evropských a amerických koncertních sálech pohybuje mezi -5 a +3 dB [15].

Míra jasnosti má tendenci negativně korelovat s hodnotou EDT , tedy že vysoká hodnota C_{80} ukazuje na nízkou hodnotu počáteční doby dozvuku. Subjektivně si to lze vyložit tak, že vysoká jasnost vnímané produkce je často asociována s krátkým dozníváním [12].

Čas těžiště T_S

Posledním parametrem ze skupiny vyváženosti počáteční a pozdní energie je čas těžiště. Stejně jako předchozí parametry C_{50} , D_{50} a C_{80} vypovídá o vnímané jasnosti hudby nebo mluveného slova ve zkoumaném prostoru. Typické hodnoty T_S se podle [9] pohybují v rozmezí 70 – 150 ms pro hudbu, resp. 60 – 80 ms pro mluvené slovo. Matematicky je čas těžiště definován jako:

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{s}). \quad (9)$$

Zajímavostí je, že už v 50. letech 19. století Joseph Henry pochopil důležitost parametrů počáteční a pozdní energie, avšak jejich výzkum byl na mnoho let zastíněn příchodem Sabinovy rovnice doby dozvuku [13].

Srozumitelnost ve víceúčelovém sálu

Z informací v odstavcích výše vyplývá, že míry jasnosti a zřetelnosti jsou zásadními parametry pro určení srozumitelnosti přednesu daného prostoru. Proto i v rámci optimalizace víceúčelových sálů by na tyto parametry měl být kladen důraz.

Pokud zavedeme snadnou úvahu kompromisu mezi sálem pro hudební produkci a mluvené slovo, dospějeme k závěru, že optimální hodnoty C_{50} a C_{80} pro víceúčelový sál by se měly pohybovat někde v rozmezí -2 až +3 dB.

Stupnice srozumitelnosti

V případě, že bychom se zajímali celkově o srozumitelnost zdroje zvuku a přenosu prostoru jako jednotného systému, je vhodné k vyhodnocení použít jiné parametry, než jsou C_{50} a D_{50} a sice nejrůznější stupnice srozumitelnosti. Ty jsou ze své podstaty definovány jako jednočíselné parametry zohledňující frekvenční citlivost lidského ucha a důležitost zastoupených frekvenčních pásem na vnímané srozumitelnosti lidské řeči. Příklady těchto parametrů jsou např. *STI*, *RASTI* nebo společná stupnice srozumitelnosti *CIS*. Některé tyto parametry dokonce zohledňují různou citlivost ženského a mužského ucha. Rozbor těchto parametrů přesahuje rámec této práce, nicméně v praktické části budou zmíněny, proto je vhodné u nich uvést alespoň stručný úvod. Příklad hodnot parametru *STI* a vnímané srozumitelnosti znázorňuje následující tabulka:

Tabulka 3: Příklad hodnot srozumitelnosti *STI* a jejich subjektivní význam (podle [16, 17])

Hodnota <i>STI</i>	Srozumitelnost slabik v %	Srozumitelnost slov v %	Srozumitelnost vět v %
< 0,3	0 - 34	0 - 67	0 - 89
0,3 – 0,45	34 - 48	67 - 78	89 - 92
0,45 – 0,6	48 - 67	78 - 87	92 - 95
0,6 – 0,75	67 - 90	87 - 94	95 - 96
> 0,7	90 - 96	94 - 96	96 - 100

Zajímavé zjištění na základě těchto hodnot je to, že sebelepší optimalizací srozumitelnosti zdroje nejsme schopni zajistit 100% srozumitelnost jednotlivých slov.

3.5 Basový poměr *BR*

Basový poměr *BR* (z anglického *Bass Ratio*) vyjadřuje kvalitu subjektivního vjemu spektrálního průběhu doznívání. Některé zdroje ho definují jako podporu hlubokých tónů doznívání sálu [14]. Obecně je definován jako:

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

kde indexy u jednotlivých dob dozvuku určují konkrétní frekvenční pásmo.

Optimální hodnota basového poměru *BR* by měla být v případě sálů pro hudební produkci větší než 1 [14].

U víceúčelového sálu, kde neočekáváme tak precizní hudební přednes prostoru, jako je tomu u koncertních sálů, není basový poměr stěžejní parametr. Může však být zajímavé sledovat jeho prostorovou závislost a vyhodnocovat tak vhodná místa k umístění basových pastí a potlačení nízkých frekvencí.

3.6 Míra počáteční boční energie J_{LF}

Míra počáteční boční energie J_{LF} vyjadřuje množství energie přicházející v prvních 80 ms z bočních směrů. Na rozdíl od všech předchozích parametrů ji nelze měřit pouze jedním mikrofonem. Její získání vyžaduje použití buď dvou mikrofonů s různou snímací charakteristikou nebo intenzitní sondy, z jejichž dvou mikrofonů jsou matematickou úpravou výstupních signálů získány obě snímací charakteristiky. Obecně je míra počáteční boční energie definována jako:

$$J_{LF} = \frac{\int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (-), \quad (11)$$

kde $p_L(t)$ je okamžitý akustický tlak impulsové odezvy poslechového prostoru snímáný mikrofonem s osmičkovou směrovou charakteristikou a $p(t)$ je okamžitý akustický tlak snímáný mikrofonem všesměrovým.

Mikrofon s osmičkovou snímací charakteristikou musí být během záznamu nastaven tak, aby minimum jeho citlivosti směřovalo ke zdroji zvuku, tedy aby byla minimálně snímána přímá vlna a maximálně boční odrazy [9].

Typické rozmezí J_{LF} se v koncertních sálech pohybuje od 0 do 0,5 a vypovídá o kvalitě prostorového vjemu a vjemu zdánlivé šířky zdroje zvuku. Šířka zdroje ovšem závisí nejen na míře počáteční boční energie, ale také na dalších aspektech, jako je celková síla zvuku všech hudebníků, proměnlivá dynamika produkované hudby a „zesílení“ sálu [12].

Víceúčelové sály, které už z definice své funkce obvykle nehostí nejprestižnější hudební produkce, nekladou tak přísné požadavky na kvalitu hudebního přednesu jako sály koncertní, a proto v rámci jejich posuzování nemusíme parametr J_{LF} považovat za podstatný.

3.7 Binaurální míry $IACC$

Jelikož je proces slyšení člověka binaurální a právě to zásadně ovlivňuje zejména prostorové vnímání zvuku, je nutné tuto skutečnost také zapracovat do akustického popisu prostoru. K tomuto účelu slouží koeficient $IACC$ (z anglického *Inter-Aural Cross Correlation Coefficient*). K získání tohoto parametru je nutno využít buď umělé hlavy se zabudovanými mikrofony v uších (tzv. *dummy head*) nebo skutečného lidského posluchače s hlavou průměrných rozměrů vybaveného mikrofony u vstupů do zvukovodů [9]. Činitel interaurální vzájemné korelace $IACC$ je poté roven:

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)| \quad \text{pro } -1\text{ms} < \tau < +1\text{ms} \quad (-), \quad (12)$$

kde:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, \quad (13)$$

kde $p_L(t)$ je impulsová odezva na vstupu do levého ušního kanálu a $p_R(t)$ je totéž na vstupu do pravého ušního kanálu.

Časové meze t_1 a t_2 nebyly stejně jako obecné používání parametru $IACC$ jednotně přijaty. Jednou z možností je stanovení parametru $IACC_{\text{early}}$ pro $t_1 = 0$ a $t_2 = 80$ ms, vyjadřující nepodobnost signálu přicházející na jedno a druhé ucho pro počáteční odrazy, a $IACC_{\text{late}}$ s $t_1 = 80$ ms a $t_2 =$ čas větší než doba dozvuku uzavřeného prostoru, vyjadřující nepodobnost signálů pro odražený zvuk [9].

Spolu s mírou počáteční boční energie J_{LF} dává $IACC$ vcelku přesné informace o prostorovém vnímání zvuku v měřeném prostoru. Ačkoliv nelze obecně definovat korelaci mezi těmito dvěma parametry, některá měření poukazují na silnou korelaci J_{LF} a $IACC$ ve frekvenčních pásmech 125 – 1.000 Hz, přičemž vzájemná závislost v pásmech 2.000 a 4.000 Hz již prokazatelná není [13].

Současná měření binaurálních parametrů sice vcelku odpovídají výsledkům subjektivních testů, vykazují však velké rozdíly výsledků způsobené pouze drobnými odchylkami. Například pouhé posunutí či natočení snímacího mikrofону o několik milimetrů či pootočení měřicí hlavy o několik centimetrů v průběhu měření dokáže výsledky zkreslit a snížit tak jejich vypovídací hodnotu [12]. Vzhledem k tomu, že tyto drobné změny jsou u skutečných posluchačů předpokládány, nelze je považovat za chybu měření. V tomto ohledu je potřeba měřicí metody dále zdokonalovat, jelikož binaurální impulsové odezvy s vysokými hodnotami SNR jsou stěžejní pro řadu moderních aplikací (např. virtuální realita, auralizace) [3].

Stejně jako u míry počáteční boční energie J_{LF} ani u binaurálních parametrů ve víceúčelovém sálu nepožadujeme splnění žádného konkrétního kritéria. Přesto změření obou těchto parametrů může přinést zajímavé poznatky o tom, jak se sály tohoto typu chovají z binaurálních hledisek.

3.8 Další objektivní akustické parametry

Kromě výše zmíněných existují ještě další objektivní akustické parametry k popisu prostoru. Ty se týkají např. jasnosti zvukového vjemu hudebníků na podiu, která je neméně důležitá pro kvalitní produkci. Vzhledem k tomu, že v rámci praktické části této práce nebyly tyto parametry počítány, nebudeme je zde dále rozvádět. Dostatečný přehled o nich poskytne např. norma [9] v kombinaci s články [12, 13].

3.9 Shrnutí

Všechny výše definované parametry shrnuje pro přehlednost následující tabulka, spolu s jejich významem a doporučenými hodnotami (na základě rešerše z [1, 8, 11, 12, 13, 14]) pro víceúčelové a koncertní sály:

Tabulka 4: Objektivní akustické parametry a jejich doporučené hodnoty pro víceúčelové a koncertní sály

Veličina	Subjektivní význam	Vhodné rozmezí pro víceúčelové sály	Typické rozmezí pro koncertní prostory
Doba dozvuku T	Délka doznívání a zdánlivá velikost prostoru	0,8 až 1,5 sekundy	0,5 až 3,0 sekundy
Počáteční doba dozvuku EDT		není podstatný	0,5 až 3,0 sekundy (důležitý je zejména poměr s T)
Síla zvuku G	Vnímaná hlasitost zvuku	větší než 0 dB	
Míra zřetelnosti C_{50}	Zřetelnost mluveného slova	-2 až +3 dB	-5 až 0 dB
Zřetelnost D_{50}		0,25 až 0,7 (pro potřeby hlasového přednesu)	
Míra jasnosti C_{80}	Jasnost hudební produkce	-2 až +3 dB	-5 až +3 dB
Čas těžiště T_5	Jasnost hudební či mluvené produkce	60 až 150 ms	
Basový poměr BR	Vjem spektrálního průběhu doznívání	Větší než 1	1,0 až 1,5
Míra počáteční boční energie J_{LF}	Kvalita prostorového vjemu a zdánlivá šířka zdroje zvuku	není podstatný	0,0 až 0,5
Binaurální parametr $IACC$	Kvalita prostorového vjemu	není podstatný	0,1 až 0,4

4. Metody výpočtů v prostorové akustice

Principy, jakými lze získat akustické parametry uzavřeného prostoru z jeho impulsové odezvy, byly představeny v předchozích kapitolách. V prostorové akustice se ovšem velmi často setkáme se situací, kdy impulsovou odezvu nemáme k dispozici, ale i přesto potřebujeme získat relevantní data o zkoumaném prostoru. Typickým příkladem může být projekt prostorové akustiky sálu, který ještě fyzicky neexistuje a prostorová akustika je nedílnou součástí jeho projektové dokumentace a je nezbytné jí znát ještě před zahájením samotné stavby.

Jiná je situace, kdy máme data z reálného měření sálu, ve kterém se plánují dodatečné akustické úpravy nebo rekonstrukce, a my chceme znát jejich vliv na změnu akustických vlastností. V obou případech se musíme obejít pouze s obecnými znalostmi akustických vlastností použitých materiálů a rozměrových dispozic plánovaného/rekonstruovaného prostoru.

K získání přehledu o budoucích akustických podmínkách uvnitř zkoumaného prostoru máme k dispozici dva základní přístupy, které nyní představíme.

4.1 Empirické (statistické) výpočty na základě dozvukové rovnice

Základ celé prostorové akustiky položil na přelomu 19. a 20. století americký fyzik Wallace Clement Sabine. Ten zavedl dva zjednodušující předpoklady pro šíření zvuku v uzavřeném prostoru:

- 1) *intenzita zvuku klesá v uzavřeném prostoru spojitě*
- 2) *při výpočtech neuvažujeme vliv rozdílných vlastností jednotlivých obklopujících ploch na dobu dozvuku. Při jejím odvozování použijeme pouze celkovou zvukovou pohltivost všech předmětů v místnosti*

Na základě těchto dvou předpokladů odvodil Sabine slavnou dozvukovou rovnici ve tvaru:

$$T_S = 0,163 \cdot \frac{V}{\sum S_i \alpha_i + 4mV} \quad (s) \quad (14)$$

kde T_S je doba dozvuku podle Sabina, V je celkový objem uzavřeného prostoru, S_i jsou plochy jednotlivých obklopujících povrchů, α_i jsou činitele zvukové pohltivosti daných ploch a m je činitel útlumu vzduchu ve zvuku.

Hodnota 0,163 je pouze experimentálně zjištěná úměra a na základě konkrétního zdroje se může pohybovat od 0,161 do 0,164. Činitel útlumu m nabývá hodnot od 0,001 do 0,06 v závislosti na frekvenci a relativní vlhkosti prostoru a pro většinu menších a středních sálů je možné celý člen $4mV$ bezpečně zanedbat.

Vztah (14) nadále zpřesňuje Eyringův vztah, který eliminuje výpočetní chyby vznikající činitelem zvukové pohltivosti příliš se blížícího hodnotě 1:

$$T_E = 0,163 \cdot \frac{V}{\sum -S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad (s) \quad (15)$$

Eyringův vzorec poté ještě nadále zpřesnil Millington, který uvažoval zvlášť odrazy od povrchů s různou zvukovou pohltivostí, nicméně ten se v praxi příliš nepoužívá.

Obecně lze konstatovat, že pro prostory s celkovou zvukovou pohltivostí $\alpha < 0,2$ lze bez způsobení větší chyby použít Sabinův vzorec (14). Pro ostatní prostory se pak nejčastěji používá rovnice Eyringova (15), která je také zakotvena jako výpočtový standard ve většině technických norem [18].

Z výše uvedených rovnic je zřejmé, že známe-li rozměrové dispozice zkoumaného prostoru a činitele zvukové pohltivosti všech jeho povrchů, jsme schopni určit jeho dobu dozvuku. Tohoto přístupu se využívá jako nejjednoduššího řešení ve většině případů, kdy nás zajímá pouze výsledná doba dozvuku prostoru jako celku (např. z důvodu dodržení normových limitů). Za povšimnutí stojí, že v rámci empirických výpočtů se omejdeme bez impulsové odezvy, ať už změřené, nebo vypočtené na základě známých parametrů.

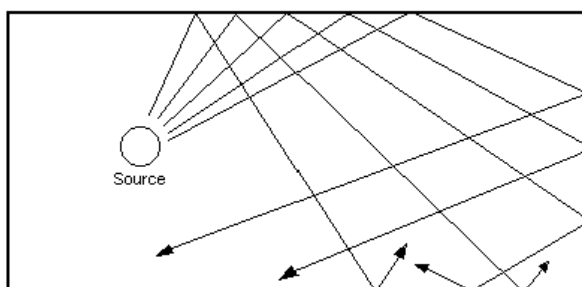
4.2 Softwarové modelování a simulace prostorové akustiky

V případě, kdy potřebujeme získat o zkoumaném prostoru více informací, než jen jeho dobu dozvuku jako celku, je nutné použít software pracující na základě modelování. Akustické modely se hojně využívají v případech akusticky významnějších sálů, kdy potřebujeme znát více objektivních akustických parametrů, než jen dobu dozvuku, spolu s jejich prostorovou závislostí. Po vytvoření modelu je také poměrně snadné sledovat vliv jednotlivých akustických úprav na změny jednotlivých zkoumaných parametrů.

Základem každé akustické simulace je 3D model geometrie zkoumaného prostoru. Jednotlivým plochám tohoto modelu jsou následně přiřazeny akustické vlastnosti, jako je činitel zvukové pohltivosti nebo činitel difuzivity. Až do této chvíle se jeví tento přístup shodný s empirickou metodou. Výpočetní výkon počítače nám však dává možnosti analyzovat model bod po bodu pomocí metody ray tracingu a dalších.

Ray tracing

Ray tracing je výpočetní metoda používaná nejen v akustice. Její základní myšlenkou je nahradit spojitou vlnu svazkem paprsků, z nichž každý nese část pro sebe podstatné informace. V případě akustických simulací je zvuková vlna od zdroje nahrazena svazkem tisíců až statisíců jednotlivých paprsků, z nichž každý nese informaci o svém směru šíření, časovém zpoždění a okamžité hodnotě akustického tlaku. Tyto paprsky jsou od zdroje zvuku vyslány do modelu, kde se různě odráží od obklopujících stěn a dalších objektů a pohlcují se. Ve chvíli, kdy zavedeme oblast malého kontrolního objemu, ve kterém nás budou zajímat akustické vlastnosti prostoru, stačí nám pouze analyzovat informace od jednotlivých paprsků, které tímto kontrolním objemem prochází.



Obrázek 9: Princip ray tracingu (převzato z [19])

V praxi to znamená, že virtuální měřicí signál vycházející ze zdroje rozložíme na paprsky, ze kterých následně signál opět skládáme, tentokrát už však závislý na poloze v prostoru a ovlivněný proběhlými odrazy – jinými slovy získáváme virtuální impulsovou odezvu v daném bodě. Ve chvíli, kdy známe impulsovou odezvu, jsme již schopni na základě matematických definic získat veškeré objektivní akustické parametry popsané v kapitole 3.

Detailní popis procesu akustické simulace je obsahem praktické části této práce.

4.3 Shrnutí metod

Porovnání obou přístupů k výpočtům v prostorové akustice znázorňuje následující přehled:

Tabulka 5: Porovnání empirických a softwarových metod výpočtů v prostorové akustice

Empirické výpočty	Softwarové simulace
Poměrně snadné výpočty, není potřeba výpočetní výkon	Bez využití výkonného počítače nereálné
Nutnost detailnější znalosti výpočtů prostorové akustiky	Z pravidla menší požadovaná znalost, software sám uživatelé simulací provede
Možnost získat pouze dobu dozvuku prostoru jako celku	Možnost získat veškeré objektivní akustické parametry včetně jejich prostorových závislostí
Bez nutnosti investice	Nutná investice do simulačního software (řádově desítky až stovky tis. Kč)

Nutno podotknout, že ani v případě využívání softwarových simulací nelze empirické výpočty zatracovat. Výpočty na základě dozvukových rovnic slouží velmi často jako kalibrace softwarových modelů, rychlý nástin situace a vhodná reference pro zkoumání relevance výsledků simulace. Správným přístupem je tedy obě metody vhodně kombinovat.

5. Zakotvení prostorové akustiky v legislativě ČR

Trendem posledních let je cíleně zlepšovat celkový komfort veřejných vnitřních prostorů. Tepelná pohoda, zajištěná správně dimenzovaným vytápěním a klimatizací, optimální osvětlení, schopné přizpůsobit se aktuálnímu využívání prostoru, nebo zabezpečení včetně evakuačních zařízení je již po mnoho let standardem. V posledních letech se k těmto faktorům přidává i prostorová akustika, neboť velké množství studií poukazuje na to, že akustická pohoda má přímý vliv na celkové vnímání kvality prostoru jeho uživateli. V prostorech určených pro vzdělávání dokonce lepší akustika zlepšuje efektivitu učení a soustředěnost studentů [20].

Legislativa České republiky tyto skutečnosti bere na vědomí zhruba v posledních 20 letech a postupně zakotvuje limity prostorové akustiky do povinných bodů potřebných pro splnění kolaudačních podmínek pro nově stavěné a rekonstruované veřejné prostory. Konkrétní limity parametrů uvedené v technických normách ČSN se tak odkazem vyhlášek a nařízení vlády stávají závaznými.

5.1 Technické normy o prostorové akustice

Tato podkapitola shrnuje obsahy norem, které jsou relevantní pro návrh v rámci této práce. Závěrem jsou stručně shrnuty i ostatní normy, řešící prostorovou akustiku.

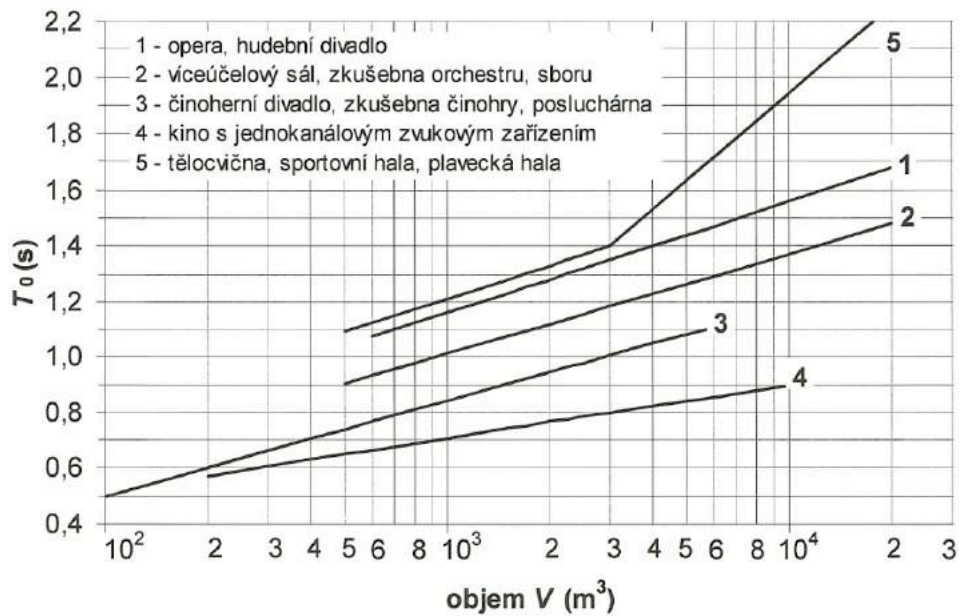
5.1.1 ČSN 730525: Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady

Norma ČSN 730525 stanovuje obecné zásady pro projektování akustiky uzavřených prostorů, určených k poslechu hudby a řeči v nově budovaných nebo rekonstruovaných objektech. Uvádí hlavní opatření z hlediska stavební akustiky k ochraně těchto prostorů proti vnějšímu a vnitřnímu hluku v objektech, požadavky na objem prostoru, doporučení pro poměry jeho základních rozměrů a pro jeho tvar z hlediska možnosti vzniku rušivých akustických jevů. Popisuje chování jednotlivých povrchů při utváření zvukového pole a postup výpočtů doby dozvuku včetně korekce na útlum zvuku ve vzduchu. [21]

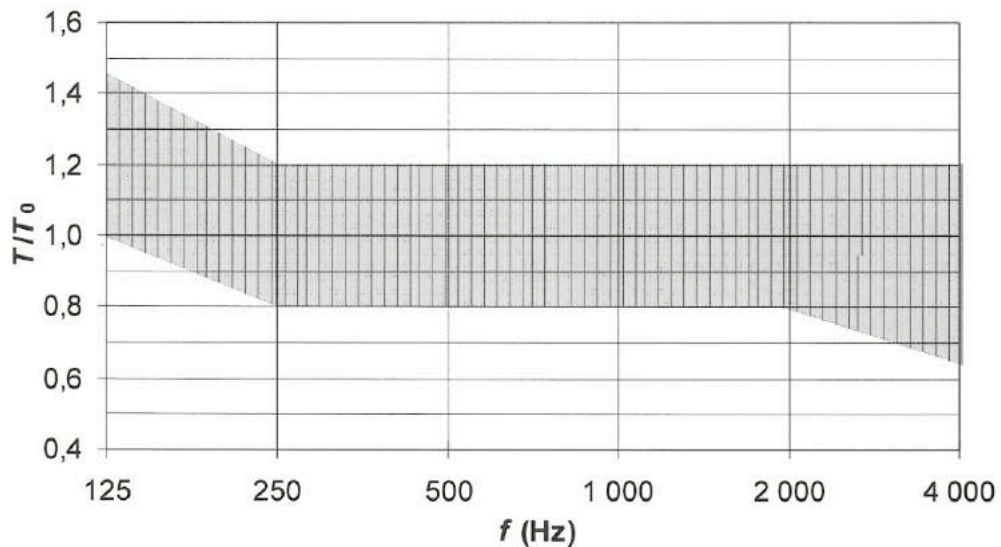
5.1.2 ČSN 730527: Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely

Norma ČSN 730527 stanovuje hlavní zásady pro projektování a realizování uzavřených prostorů pro kulturní účely, prostorů ve školách a prostorů pro veřejné účely. Platí pro nově zřizované, rekonstruované nebo adaptované prostory, v nichž kvalita poslechových podmínek či akustická pohoda hraje významnou roli. [22]

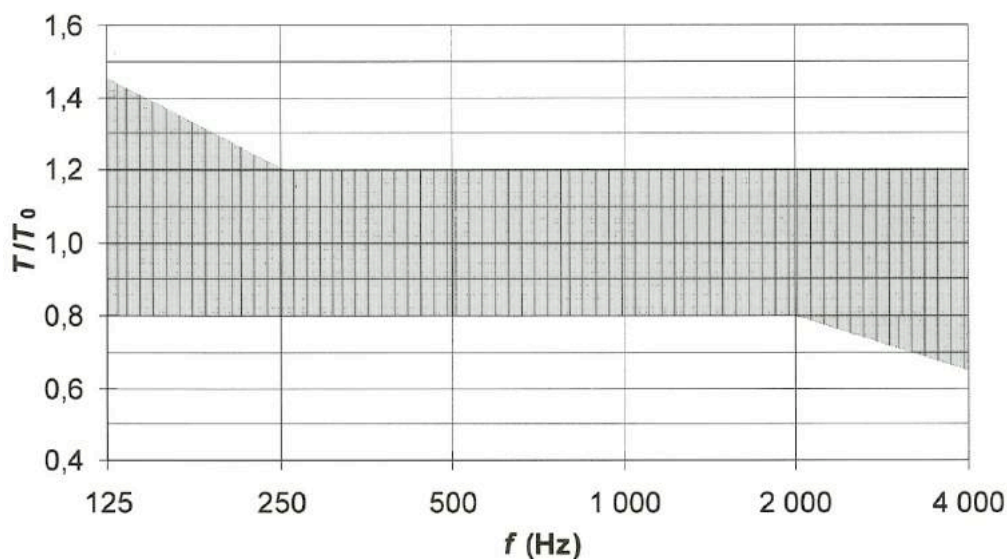
Mimo jiné také stanovuje optimální pásma doby dozvuku pro jednotlivé typy prostorů, dle následujících obrázků:



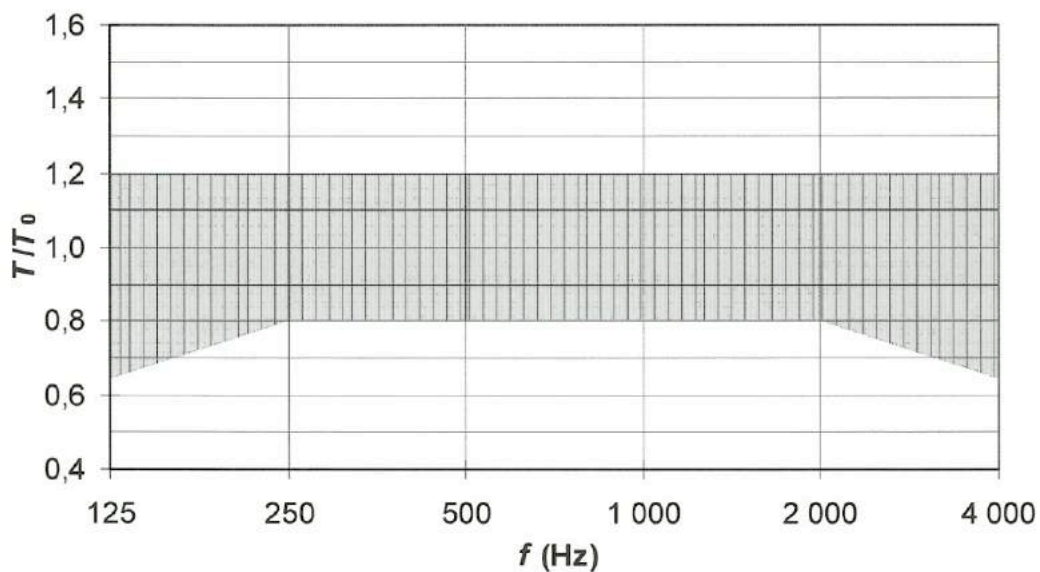
Obrázek 10: Závislost optimální doby dozvuku T_0 (s) pro kmitočet 1 000 Hz na objemu V (m^3) uzavřeného prostoru v obsazeném stavu s výjimkou závislosti 5, která se týká neobsazeného stavu (převzato z [22])



Obrázek 11: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (převzato z [22])



Obrázek 12: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu hudby i řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (převzato z [22])



Obrázek 13: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu řeči v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (převzato z [22])

Další závislosti uvedené v normě zohledňují kinosály s jednocanálovými a víceanálovými zvukovými zařízeními a tělocvičny, sportovní a plavecké haly. Vzhledem tématu této práce není potřeba je znázorňovat, v případě potřeby mohou být dohledány v příslušné normě.

5.1.3 ČSN EN ISO 3382-1: Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči

Část 1 normy ČSN EN ISO 3382 upřesňuje metody pro měření doby dozvuku a dalších prostorově akustických parametrů v uzavřených prostorech pro hudbu a řeč. Popisuje postup měření, potřebné zařízení, požadovaný počet míst měření, metodu vyhodnocování údajů a obsah zprávy o měření. Je určena k aplikaci moderních digitálních měřicích postupů a k vyhodnocování prostorově akustických parametrů odvozených z impulsových odezev. [5]

5.1.4 Další technické normy věnující se prostorové akustice

Následující tabulka shrnuje předchozí představené normy spolu s dalšími týkajícími se prostorové akustiky:

Tabulka 6: Technické normy věnující se prostorové akustice

Označení normy	Název (předmět)
ČSN 01 1601	Akustika – Kmitočty pro měření
ČSN 36 8841	Akustika – Měření doby dozvuku v sálech
ČSN 73 0501	Akustika – měření činitele zvukové pohltivosti a akustické impedance v interferometru
ČSN 73 0525	Akustika – projektování v oboru prostorové akustiky – všeobecné základy
ČSN 73 0256	Akustika – projektování v oboru prostorové akustiky – studia a místnosti pro snímání, zpracování a kontrolu zvuku
ČSN 73 0527	Akustika – projektování v oboru prostorové akustiky – prostory pro kulturní účely, prostory ve školách, prostory pro veřejné účely
ČSN EN ISO 3382-část 1 až 3	Akustika – měření parametrů prostorové akustiky

5.2 Zákony ČR obsahující témata prostorové akustiky

5.2.1 Vyhláška č. 343/2009 Sb. o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých

Paragraf 4 výše uvedené vyhlášky stanovuje:

„V zařízeních pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání musí být dodrženy normové hodnoty podle příslušné české technické normy upravující optimální doby dozvuku ČSN 730527“ [23]

V současné době je tato vyhláška zatím jediným závazným nařízením v oboru prostorové akustiky. V praxi to znamená, že limity uvedené v normě ČSN 730527 jsou projektanti nuceni splnit pouze v případě prostorů určených pro vzdělávání dětí a mladistvých.

Nejedná se však pouze o školská zařízení. Např. v případě provozovatele soukromé sportovní haly stačí, aby byl smluvně zavázán se školským zařízením k pronájmu byt jen na jednu hodinu týdně pro účely tělesné výchovy. Už v takovém případě je nutné limity uvedené normou splnit.

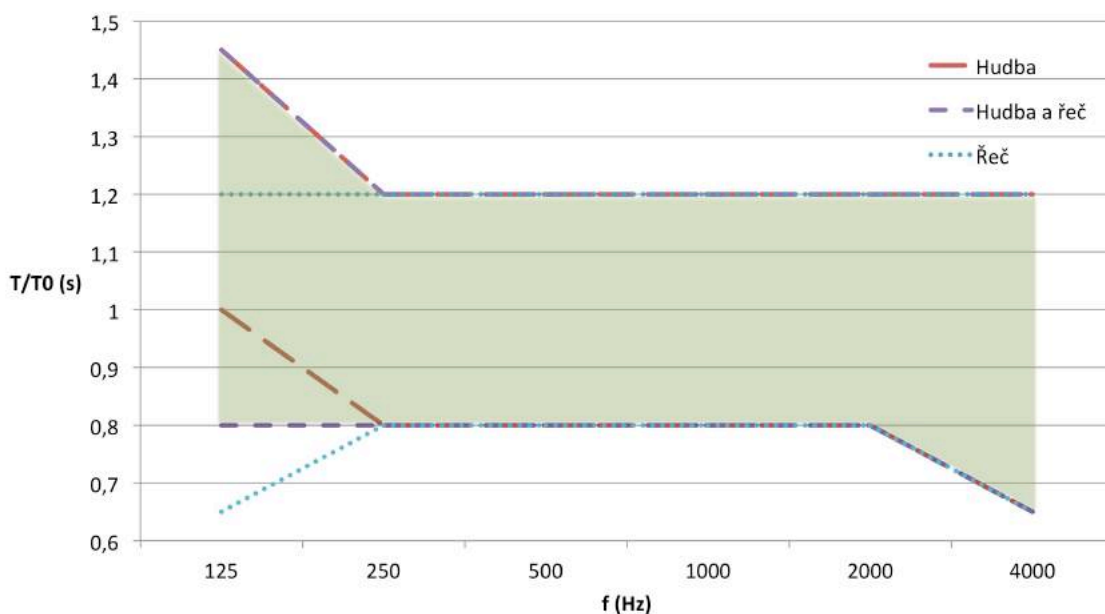
Nehledě na nedostatečné zakotvení prostorové akustiky v legislativě ČR si čím dál tím více investorů a provozovatelů veřejných prostor uvědomuje důležitost akustické pohody na celkově vnímaný komfort prostředí. Často je tak alespoň základní požadavek na prostorovou akustiku součástí zadávací dokumentace k projektu. V těchto případech mohou posloužit limity doby dozvuku stanovené normami ČSN 730525-27 jako vhodná reference, nikoli však jako nutně splněné kritérium.

5.3 Kategorizace víceúčelových sálů a optimální pásmo jejich doby dozvuku

Při uvažování víceúčelového sálu provozovaného mimo vzdělávací zařízení, tedy v případě, kdy nejsme jako projektanti nijak právně vázáni na splnění určitých limitů doby dozvuku, je nutné zvolit si při návrhu prostorové akustiky vhodnou referenci. Po provedení rešerše výše uvedených norem zjistíme, že většina víceúčelových sálů spadá do následujících kategorií [22]:

- prostory pro přednes hudby
- prostory pro přednes hudby a řeči
- prostory pro přednes řeči
- tělocvičny a sportovní haly

Porovnejme si nyní normou doporučená pásma optimálního rozmezí dob dozvuku T/T_0 pro tyto kategorie prostorů a pokusme se nalézt optimální pásmo pro víceúčelový sál:



Obrázek 14: Porovnání optimálních pásem T/T_0 dle ČSN 730527

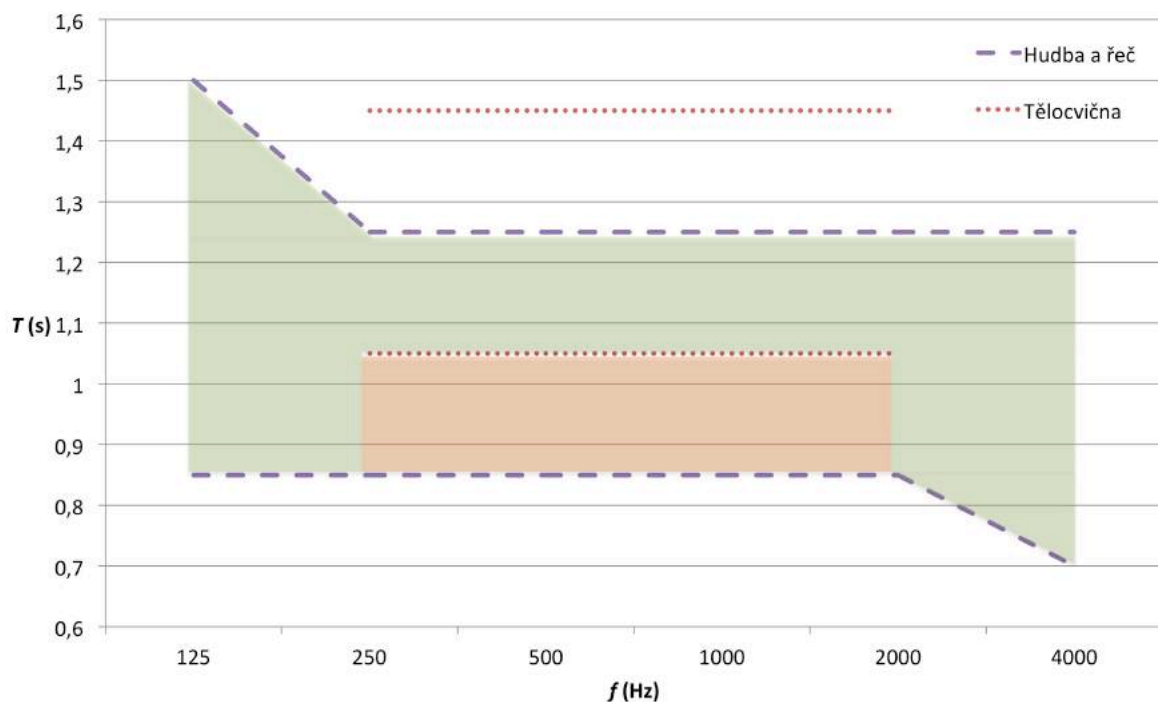
Pokud vezmeme v úvahu, že pro srozumitelnost řeči není oktávové pásmo 125 Hz kritické (lidská řeč se nejčastěji pohybuje od 500 do 2000 Hz), můžeme od limitních hodnot pro řeč v tomto oktávovém pásmu upustit. Zbývá nám tak tedy posoudit pásma pro prostory pro přednes hudby a pro přednes kombinace řeč/hudba.

První skutečností k úvaze je to, že ve víceúčelovém sálu nepředpokládáme hudební produkce vrcholné kvality, jako v koncertních sálech. Druhým aspektem je fakt, že na rozdíl od koncertních sálů, kde často produkce probíhá živě, bez podpory ozvučovacího systému, ve víceúčelovém sále bude ve většině případů PA systém použit. V koncertních sálech se vzestup doby dozvuku na nízkých frekvencích využívá k podpoře basového projevu akustických nástrojů. V případě správně dimenzovaného ozvučovacího systému pro víceúčelový sál bude tento projev dostatečně podpořen samotným systémem.

Z výše popsaných skutečností lze vyvodit závěr, že jako optimální pásmo poměru T/T_0 pro víceúčelový sál se jeví pásmo pro prostory pro přednes hudby a řeči dle ČSN 730527.

Na obr. 14 záměrně není zobrazeno pásmo optimální doby dozvuku pro tělocvičny. Při pohledu na obr. 10 je zřejmé, že tělocvična má od víceúčelového sálu odlišný frekvenční průběh optimální doby dozvuku T_0 . Doporučení normy pro tělocvičnu lze tedy s ostatními výše uvažovanými kategoriemi možné pouze číselně na příkladu sálu konkrétního objemu.

Zavedme tedy nyní příklad konkrétního víceúčelového sálu s objemem cca 1300 m^3 , u kterého nás budou zajímat konkrétní hodnoty doporučené doby dozvuku dle ČSN 730527. Dle průběhu č. 2 pro víceúčelový sál na obr. 10 lze odečíst pro tento objem vhodné $T_0 = 1,05 \text{ s}$. Pro tělocvičnu shodného objemu pak $T_0 = 1,25 \text{ s}$. Pokud nyní tyto toleranční pásma graficky porovnáme, dostaneme následující výsledek:



Obrázek 15: Optimální doba dozvuku pro víceúčelový sál o objemu 1300 m^3

Pokud bychom uvažovali rovnoměrné využití víceúčelového sálu jak pro kulturní, tak sportovní účely, a pokud bychom chtěli dodržet normové limity pro oba typy prostorů, z jednoduché grafické analýzy nám jako vhodné pásmo doby dozvuku vyjde zeleně zvýrazněná plocha na obr. 15.

Nutno ovšem vzít v potaz, že norma hodnotí prostor pro přednes hudby a řeči v obsazeném stavu a tělocvičnu ve stavu neobsazeném. V případě, že bychom uvažovali zvukovou pohltivost cca 30 dospělých osob, poklesne optimální pásmo doby dozvuku pro tělocvičnu o objemu 1300 m^3 o cca $0,25 \text{ s}$ v celém zkoumaném frekvenčním rozsahu. Toto upravené pásmo tedy pak již téměř kopíruje pásmo vhodné pro přednes hudby a řeči.

Na základě výše popsaných skutečností a grafické analýzy optimálních pásem doby dozvuku pro jednotlivé typy prostorů dle ČSN 730527 lze usoudit, že v případě řešení prostorové akustiky víceúčelového sálu o celkovém objemu cca 1300 m^3 je jako referenci nejvhodnější volit průběh optimální doby dozvuku pro prostor pro přednes hudby a řeči, bez ohledu na to, zda bude sál využíván i jako tělocvična, či nikoliv. Nutno doplnit, že tento závěr platí pouze pro prostory s celkovým objemem kolem 1300 m^3 . V případě zkoumání sálů o jiných objemech bude nutné tento závěr zrevidovat.

6. Zkoumaný prostor – Kulturní dům Bechlín

Praktická část této práce pojednává o řešení prostorové akustiky konkrétního víceúčelového sálu. V následujících podkapitolách bude nejprve detailně představen zkoumaný prostor včetně jeho rozměrových a materiálových dispozic a budou definovány hlavní důvody a cíle optimalizace jeho prostorové akustiky, stejně tak jako omezující podmínky. Závěrem budou obecně nastíněny jednotlivé uvažované varianty úprav interiéru, které budou podrobeny detailní analýze v dalších kapitolách.

6.1 Obecné problémy prostorové akustiky víceúčelových sálů

6.1.1 Akustické problémy víceúčelových sálů

Hlavním problémem prostorové akustiky víceúčelových sálů je zejména dlouhá doba dozvuku způsobená nepoměrně malou celkovou zvukovou pohltivostí materiálů v porovnání s velkým vnitřním objemem sálu. Dlouhá doba dozvuku způsobuje nadměrnou hlučnost konverzace v případě využití pro setkávací účely. Vysoká hladina akustického tlaku pozadí nutí všechny přítomné osoby podvědomě zvyšovat hlasitost řeči, což způsobuje další nárůst hladiny akustického tlaku pozadí (vzniká tzv. restaurační efekt, nebo „cocktail party effect“).

V případě hudebních produkcí, resp. produkcí mluveného slova pak dlouhá doba dozvuku způsobuje příliš nízké hodnoty jasnosti, resp. zřetelnosti vjemu, což výrazně degraduje kulturní zážitek publika.

Velké plochy navzájem rovnoběžných stěn s nedostatečnou zvukovou pohltivostí způsobují další nepříznivý fenomén – třepotavé ozvěny (ang. *flutter echoes*). Při vybuzení prostoru vznikne mezi dvěma rovnoběžnými stěnami stojaté vlnění, které zvyšuje dobu dozvuku na specifických frekvencích daných vlastními módy prostoru a způsobuje celkovou nevyváženost doby dozvuku.

6.1.2 Ne-akustické problémy víceúčelových sálů

Reálný návrh optimalizace akustické pohody víceúčelových sálů velmi často ztěžují nejrůznější organizační a jiné aspekty. Téměř v každém případě hraje v návrhu úprav významnou roli napnutý rozpočet obce na rekonstrukci víceúčelového sálu. Profesionální akustické materiály na minerální bázi, u kterých jsou definovány jejich vlastnosti, a lze tak dobře předpovědět jejich vliv na akustický komfort, jsou velmi často v požadovaném množství vzhledem k jejich ceně při úpravách víceúčelových sálů nedostupné. Často se tedy návrhy uchylují k řešení v podobě levnějších materiálů na bázi dřeva nebo sádkokartonu s přesně specifikovanou perforací, případně se tyto materiály kombinují s menším množstvím minerálních prvků. Takovouto realizaci lze navíc poměrně často dále zlevnit částečnou svépomocí, kdy např. místní stavebník/truhlář může zajistit realizaci za nižší, než standardní ceny, vzhledem k úsporám v logistice.

Velmi často se také setkáváme s požadavkem alespoň částečné modularity řešení prostorové akustiky, ať už v rozmístění a počtu zvukově pohltivých materiálů, nebo dokonce v podobě změny samotné dispozice sálu. V tomto případě je jedinou možností uchýlit se k přenosným paravanům, zatahovacím zástěnám, příp. otočným panelům na stropě a stěnách, které dokážou rychle a snadno přizpůsobit akustické prostředí prostoru aktuální funkci.

V neposlední řadě je také nezbytné dbát na stávající architekturu prostoru. Ucelenou architektonickou „tvář“ interiéru nelze rozbít instalací akustických prvků vzhledu příliš

kontrastního výči zbytku interiéru. Často také z úvah musíme vypustit konstrukce, které z jakéhokoli důvodu nelze povrchově upravit (např. dobové stropy a dřevěné obklady, prostor podia, atd.)

Z výše uvedených skutečností je zřejmé, že k návrhu prostorové akustiky víceúčelového sálu nelze přistupovat obdobně, jako například k návrhu přednáškové místnosti nebo koncertního prostoru. Výsledná podoba prostoru tak bude většinou určitým kompromisem mezi dostatečným akustickým komfortem a ostatními aspekty, bránícími perfektní optimalizaci.

Situaci projektantovi ulehčuje alespoň fakt, že optimální doba dozvuku dle ČSN 730527 není pro prostory vyjma těch ve vzdělávacích zařízeních právně závazná a lze jí tedy brát pouze jako vhodné doporučení, nikoliv limit, který musí být splněn.

6.2 Kulturní dům Bechlín – představení prostoru

Námi zkoumaný prostor se nachází ve středočeské obci Bechlín, na hranici Ústeckého a Středočeského kraje, na území bývalého okresu Litoměřice. Spolu s částí obce Předonín čítá obec Bechlín na 407 domů a celkem 1.251 registrovaných obyvatel (údaje ČSÚ k 1.1.2017 [24])

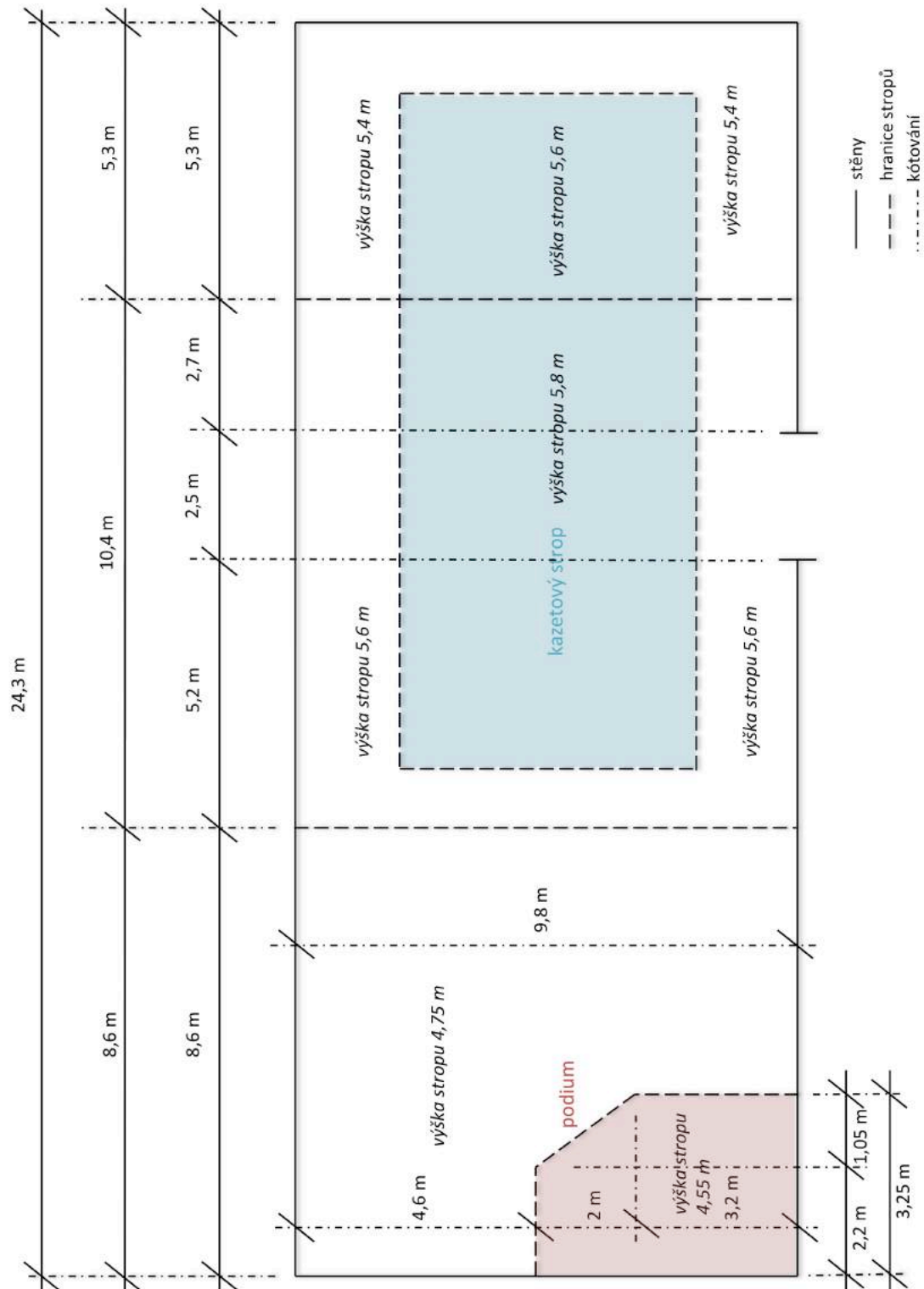


Obrázek 16: Lokalita obce Bechlín (zdroj: maps.google.com)

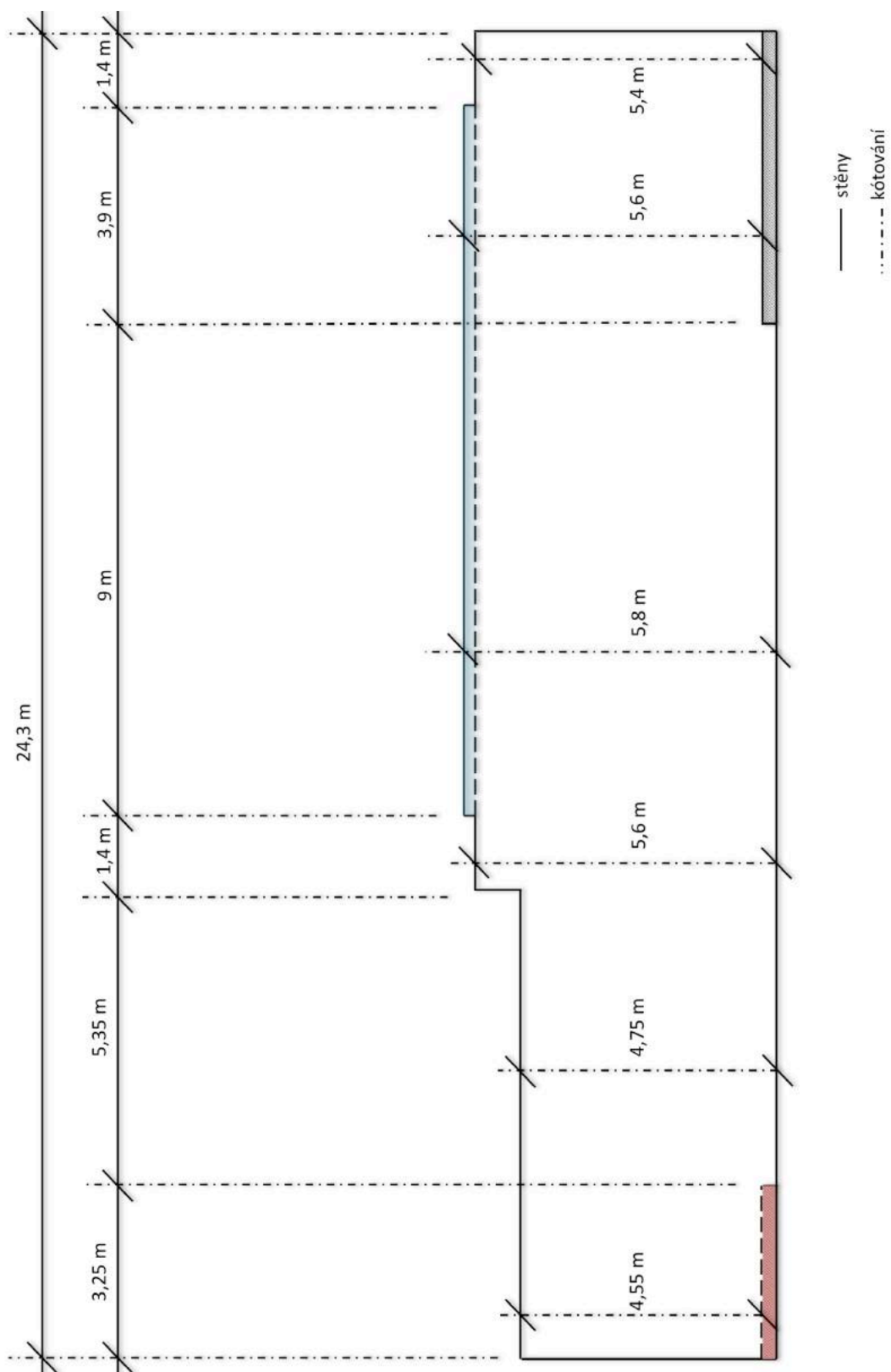
Poblíž návsi obce se nachází objekt kulturního domu, který má být předmětem optimalizace prostorové akustiky. Kulturní dům prošel v posledních letech kompletní rekonstrukcí, v jejímž rámci se však optimalizace akustické pohody vůbec neuvažovala. Výsledkem je tak poměrně moderní prostor s nepříjemnými akustickými vlastnostmi pro téměř všechny předpokládané funkce využití.

Celkový objem prostoru činí 1334 m³. Většina stěn je tvořena sádkokartonem s hladkým štukem. Střední výška stropu je 5,6 m, strop je v podobě sádkokartonového podhledu, vyjma středové části, která je tvořena původním dřevěným kazetovým stropem z 20. století. Podlaha

je v podobě keramického obkladu. Severní kratší stěna sálu je v celé ploše zakryta těžkým závěsem, který představuje jediný improvizovaný akustický prvek, zbylé povrchy jsou zvukově odrazivé. Na opačné straně sálu pak nalezneme malé podium tvořené cca 15 cm vyvýšením podlahy. Půdorys a svislý řez sálem znázorňují následující obrázky, fotodokumentace pořízená během měření je pak k nalezení na přiloženém médiu.



Obrázek 17: KD Bechlín - půdorysný pohled



Obrázek 18: KD Bechlín - řez sálem

6.3 Důvody a cíle optimalizace prostorové akustiky KD v Bechlíně

Na základě informací získaných od starosty obce se v současnosti prostor KD využívá v několika různých funkcích. V běžném provozu je prostor otevřen veřejnosti a funguje jako setkávací místo, restaurační sál a vesnická hospoda. Jednou za čas (cca 1x za měsíc) je pak prostor pronajímán uzavřené společnosti na nejrůznější typy oslav a společenských akcí (narozneniny, svatby, promoce). Místní sbor dobrovolných hasičů zde také 2x ročně organizuje tradiční plesy s živou hudební produkcí.

Podle mnoha zpětných vazeb od pravidelných i jednorázových uživatelů prostoru lze konstatovat, že prostor subjektivně působí jako velmi zvukově nevyvážený. V případě setkávacích akcí mají návštěvníci problémy se špatnou srozumitelností konverzace, v případě přednášek pak problém nastává zhruba od poloviny sálu ve směru od podia, kdy je v druhé polovině sálu obtížné soustředit se na výklad řečníka i v případě použití malého ozvučovacího systému. V případě společenských akcí s živou produkcí, jako jsou plesy, si pak uživatelé stěžují na přílišnou hlučnost.

Cílem optimalizace akustiky tohoto prostoru by tak mělo být zjištění objektivních faktů, které zapříčiňují tyto subjektivně vnímané nedostatky, a jejich následné odstranění.

6.4 Uvažované varianty optimalizace

V prvotní fázi projektu optimalizace prostorové akustiky KD v Bechlíně jsme nebyli vázáni žádným konkrétním rozpočtem na provedení úprav interiéru. Tento fakt nám dával unikátní možnost porovnat efektivitu nejrůznějších přístupů k řešení prostorové akustiky víceúčelového sálu. Bylo tak zvoleno několik variant s odlišnou skladbou uvažovaných materiálů, stavební náročnosti úprav i předpokládané investice.

6.4.1 Varianta 1: Materiály na minerální bázi

První varianta představuje optimální řešení z hlediska efektivity použitých materiálů. Budou uvažovány profesionální materiály pro prostorovou akustiku na minerální bázi s přesně definovanými akustickými i ne-akustickými vlastnostmi. V případě správného postupu návrhu by tak měl být výsledný pozitivní efekt téměř 100% zaručen, ovšem za cenu nejvyšších předpokládaných nákladů na realizaci.

6.4.2 Varianta 2: Materiály na bázi perforovaného sádrokartonu

Druhá varianta představuje jiný přístup využití profesionálních akustických materiálů. Důraz bude kladen na mechanickou odolnost, a proto budou minerální prvky nahrazeny prvky na bázi různě perforovaného sádrokartonu. V případě skutečného využití profesionálních materiálů lze očekávat náklady na realizaci v podobné výši, jako tomu bude u varianty 1. Nicméně vzhledem ke znalosti vlivu rozdílné použité perforace profesionálních SDK desek lze předpokládat, že v případě „výroby“ perforace svépomocí (např. místním řemeslníkem) bude docíleno velmi podobného výsledku za podstatně nižší cenu.

6.4.3 Varianta 3: Bez stavebních úprav

Třetí varianta počítá s předpokladem, že v prostoru nebude z jakýchkoliv důvodů možné provést žádné zásadní stavební úpravy ve skladbě stěn a stropu. Zvýšení pohltivosti prostoru tedy musí být realizováno prvky, které je možné snadno montovat a následně v případě

potřeby i demontovat ze stávajících konstrukcí. U této varianty již hrozí, že potřebné množství akustických prvků ke snížení doby dozvuku na požadovanou úroveň bude tak velké, že by mohlo způsobit nevzhlednost celkové architektury interiéru, což bude mít za následek výsledné použití menšího množství těchto prvků, než by k dokonalé optimalizaci bylo třeba.

6.4.4 Varianta 4: Modulární řešení

Poslední uvažovaná varianta vychází z požadavku modularity řešení prostorové akustiky. Zvuková pohltivost prostoru bude zvýšena rozmístěním mobilních akustických paravanů a zástěn, zpravidla s minerální výplní. Takové řešení umožní částečně přizpůsobit dobu dozvuku a tím i ostatní akustické parametry prostoru právě probíhající akci, avšak optimalizace nebude zdaleka tak dokonalá, jako v případě předchozích variant. U této varianty se také předpokládají nejnižší celkové náklady.

6.4.5 Shrnutí

Následující tabulka shrnuje základní výhody a nevýhody jednotlivých uvažovaných variant v rámci optimalizace prostorové akustiky v kulturním domě v Bechlíně:

Tabulka 7: Prvotní porovnání variant optimalizace

		Varianta			
		V1	V2	V3	V4
		Minerální prvky	SDK prvky	Bez stavebních úprav	Modulární řešení
Aspekt	Znalost materiálů	+++	+++	++	+
	Efektivita řešení	+++	+++	++	+
	Vzhled interiéru	+++	++	++	+
	Předpokládaný výsledek	+++	+++	++	+
	Předpokládané náklady	+	+	++	+++

7. Měření doby dozvuku a vyhodnocení stávajícího stavu prostorové akustiky KD Bechlín

Následující kapitoly představují stěžejní obsah praktické části této diplomové práce. Je zde kompletně popsán proces zjištění stávajícího stavu, od měření doby dozvuku, přes vyhodnocení dat z měření, tvorbu 3D počítačového modelu sálu a jeho kalibrace, až po získání více objektivních parametrů.

Navazující kapitoly se poté zabývají konkrétními variantami optimalizace prostorové akustiky na základě dat získaných z reálného měření a simulace ve stávajícím stavu.

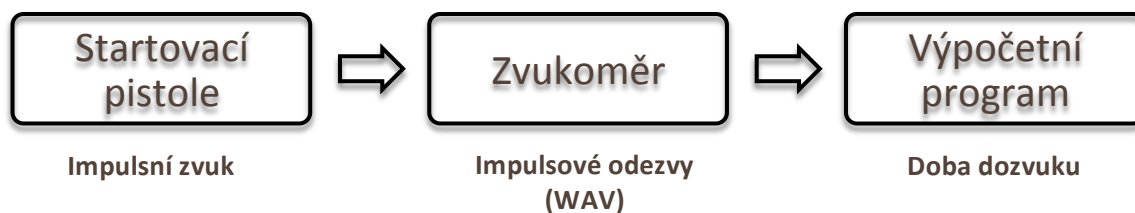
7.1 Měření doby dozvuku v KD Bechlín

Jako vstupní krok návrhu prostorové akustiky pro kulturní dům v Bechlíně proběhlo na jaře roku 2016 reálné měření doby dozvuku. Z časových a organizačních důvodů se bohužel nepodařilo prostor proměřit sofistikovanou metodou, jako je např. *TSP* (viz. kap. 2), která by umožnila vypočítat všechny objektivní akustické parametry představené v kapitole 3. Prostor byl namísto toho proměřen impulsní metodou výstřelem slepého náboje, která umožňuje relevantně stanovit pouze dobu dozvuku.

Nicméně vzhledem k tomu, že většina objektivních akustických parametrů vykazuje výraznou korelaci s dobou dozvuku, dá se předpokládat, že zlepšení doby dozvuku (tedy její přiblížení k doporučeným hodnotám pro víceúčelové sály) bude mít za následek i zlepšení všech ostatních akustických vlastností. Navíc u většiny dostupných akustických prvků určených k optimalizaci prostorové akustiky se uvádí pouze jejich schopnost pohlcovat energii akustického vlnění a tím snižovat dobu dozvuku uzavřeného prostoru. Ostatní parametry je po provedení úprav možné získat opět pouze reálným měřením, jehož výsledky je pak nutné zhodnotit. V našem případě toto opětovné měření po dokončení úprav nahradíme počítačovou simulací, neboť realizace optimalizace prostorové akustiky sálu neproběhla v časovém horizontu dokončení této práce.

7.1.1 Měřicí a vyhodnocovací řetězec

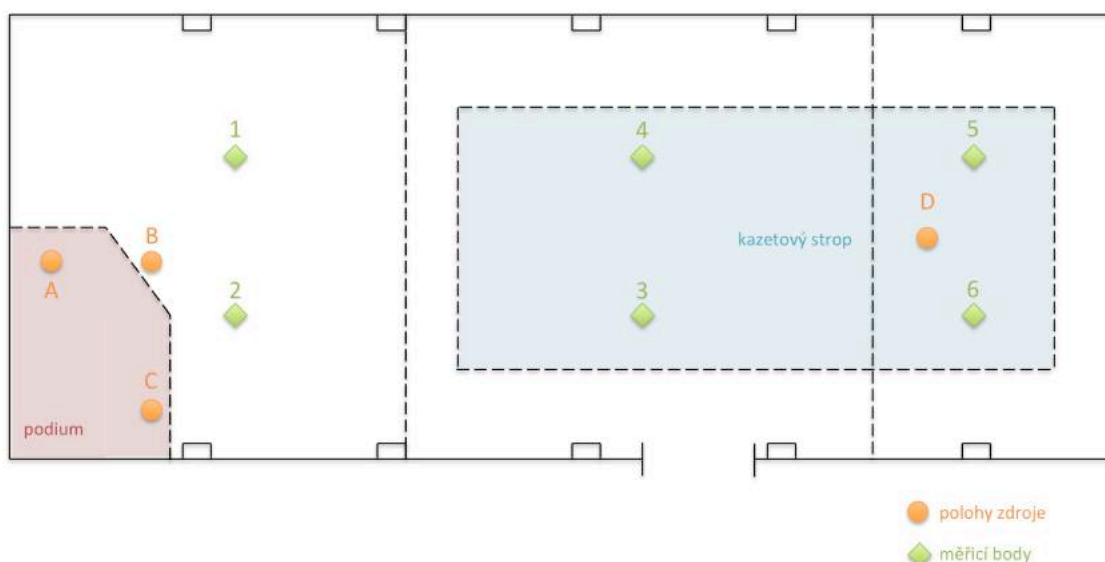
Jako zdroj impulsního zvuku posloužila během měření startovací pistole nabitá slepými náboji. Impulsové odezvy prostoru byly zaznamenány ručním zvukoměrem třídy I. od firmy Brüel & Kjær ve formátu WAV. Získané impulsové odezvy byly zpracovány programem vytvořeným v rámci bakalářské práce [8] za účelem získání hodnot doby dozvuku.



Obrázek 19: Použitý měřicí řetězec

7.1.2 Určení měřicích bodů a poloh zdroje

Rozměrové dispozice měřeného sálu byly představeny v předchozí kapitole. Rozložení měřicích bodů v prostoru sálu znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 20: Rozložení měřicích bodů

7.1.3 Zpracování výsledků měření

Získané impulsové odezvy byly zpracovány programem vytvořeným v rámci bakalářské práce [8]. Výsledkem jsou hodnoty doby dozvuku pro 6 oktávových frekvenčních pásem od 125 do 4000 Hz. Pro zajímavost jsou v následující tabulce uvedeny i hodnoty *EDT* jako důkaz toho, že T_{30} a *EDT* se v geometricky jednoduchých prostorech prakticky shodují.

Tabulka 8: Vypočtené doby dozvuku

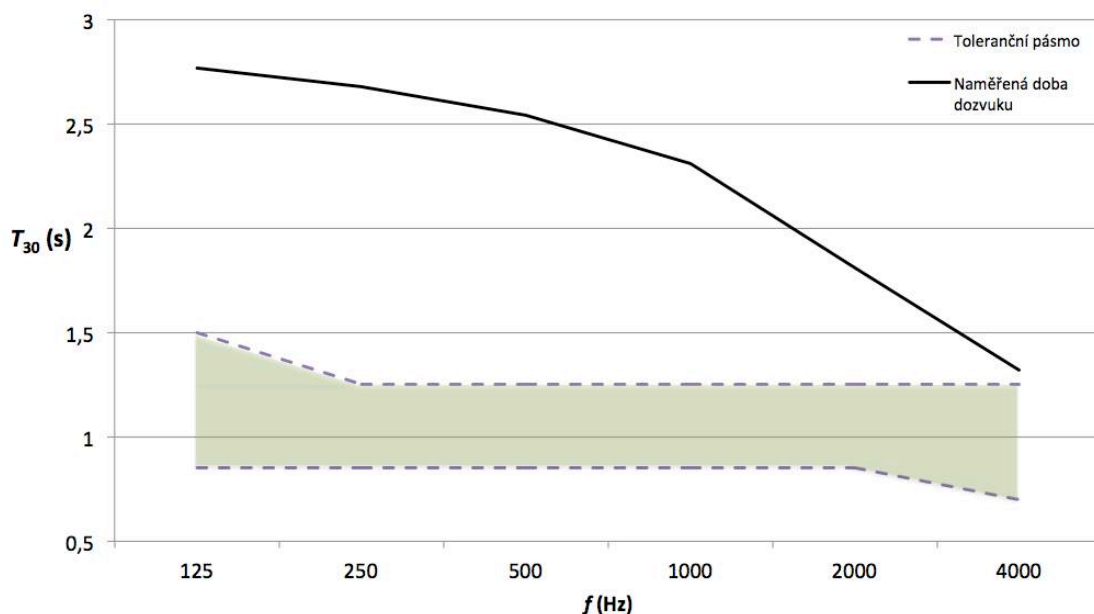
	Poloha zdroje A			Poloha zdroje B		
	T_{30} (s)	<i>EDT</i> (s)	<i>dif</i> (%)	T_{30} (s)	<i>EDT</i> (s)	<i>dif</i> (%)
125 Hz	2,88	2,90	0,6	2,76	2,69	2,6
250 Hz	2,65	2,77	4,5	2,69	2,72	1,1
500 Hz	2,54	2,64	3,9	2,56	2,64	3,1
1 kHz	2,29	2,23	2,7	2,32	2,30	0,9
2 kHz	1,83	1,75	4,6	1,81	1,77	2,6
4 kHz	1,30	1,20	8,3	1,33	1,25	6,4
	Poloha zdroje C			Poloha zdroje D		
	T_{30} (s)	<i>EDT</i> (s)	<i>dif</i> (%)	T_{30} (s)	<i>EDT</i> (s)	<i>dif</i> (%)
125 Hz	2,66	3,00	12,8	2,76	2,41	14,5
250 Hz	2,70	2,80	3,7	2,68	2,82	5,2
500 Hz	2,52	2,63	4,4	2,54	2,58	1,6
1 kHz	2,32	2,30	0,9	2,30	2,31	0,4
2 kHz	1,79	1,75	2,3	1,82	1,85	1,6
4 kHz	1,34	1,25	7,2	1,34	1,34	0,0

Doba dozvuku popisuje zavřený prostor jako celek vzhledem k jeho schopnosti pohlcovat dodanou akustickou energii. Je tedy vhodné její hodnoty prostorově průměrovat. Takto prostorově zprůměrované hodnoty doby dozvuku uvádí následující tabulka:

Tabulka 9: Prostorově průměrované hodnoty doby dozvuku

Doba dozvuku KD Bechlín	
f (Hz)	T_{30} (s)
125	2,77
250	2,68
500	2,54
1000	2,31
2000	1,81
4000	1,32

Z hodnot výše je zřejmé, že v případě tohoto konkrétního sálu jsou rozdíly obou zkoumaných dob dozvuku zanedbatelné a tak pro další analýzu můžeme uvažovat jako relevantní pouze hodnoty průměrované ze zdrojů A až C. Graficky frekvenční průběh naměřené doby dozvuku znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 21: Naměřená doba dozvuku v KD Bechlín

Do frekvenčního průběhu doby dozvuku v obr. 21 bylo promítnuto optimální pásmo doby dozvuku pro víceúčelový sál o celkovém objemu cca 1300 m³, které vyplynulo jako závěr analýzy v podkapitole 5.3. Je zřejmé, že zkoumaný sál nesplňuje limity doporučeného pásma doby dozvuku ani v jednom oktávovém frekvenčním pásmu. Vysoká doba dozvuku způsobuje jak špatnou srozumitelnost konverzace, tak vysokou hlučnost prostoru, neboť nahromaděná energie se nemá kde dostatečně rychle pohltit. Lze tedy konstatovat, že optimalizace doby dozvuku ve zkoumaném prostoru je nezbytná.

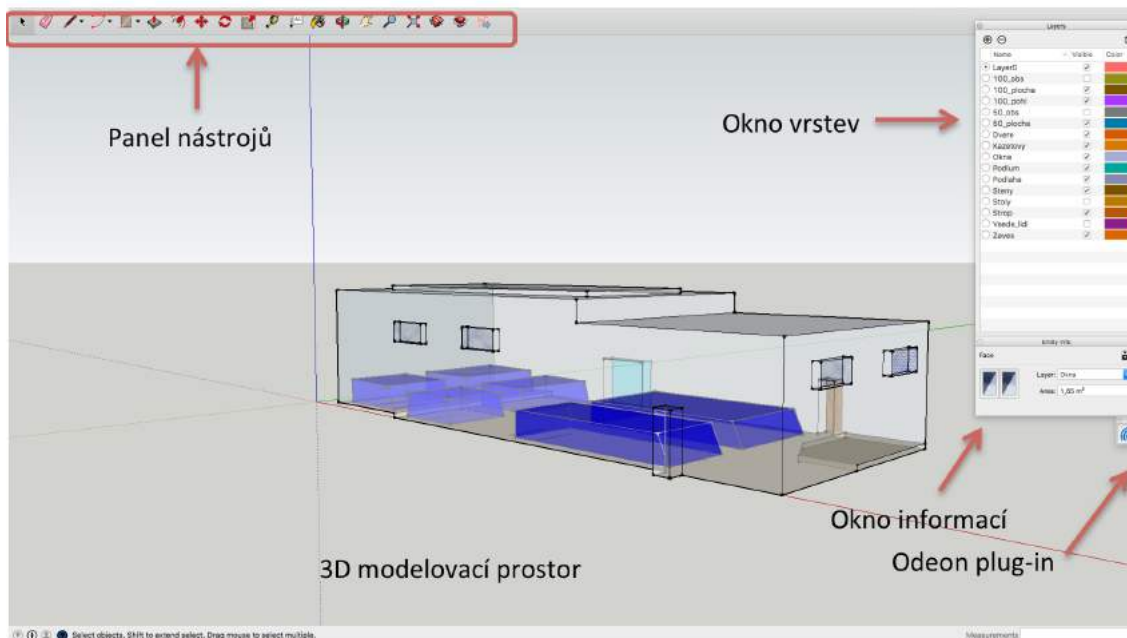
8. Tvorba počítačového 3D modelu sálu

Aby bylo možné sledovat změny více objektivních akustických parametrů, než je jen doba dozvuku, je nutné tyto parametry pro stávající stav prostoru nejprve nějak získat. Vzhledem k tomu, že nebylo možné tyto parametry získat z reálného měření kvůli organizačním důvodům, je nutné se uchýlit k počítačové simulaci. Následující kapitola představuje použitý postup takové simulace.

Prvním krokem je vytvoření virtuálního modelu analyzovaného prostoru. Pro vytvoření takového modelu existuje množství počítačových programů v čele s nejpoužívanějším prostředím AutoCAD od společnosti Autodesk. V rámci této práce použitý Trimble SketchUp sice nenabízí takové možnosti, jako AutoCAD, nicméně pro potřeby akustické simulace je naprosto dostačující a umožňuje snadné a rychlé vytvoření 3D modelu prakticky jakéhokoliv prostoru.

8.1 Představení prostředí SketchUp

Základní obrazovkou prostředí SketchUp je okno 3D prostoru se zvýrazněnými osami pro samotnou tvorbu modelu. Nad ním najdeme panel nástrojů, který obsahuje vše potřebné k tvorbě jednotlivých tvarů, jejich editaci, přesunu i změny zobrazení. Pro potřeby snadného importu do simulačního prostředí Odeon (viz. následující kapitola) byl model rozdělen do vrstev, které zobrazuje okno vpravo. Pod oknem vrstev pak najdeme informace o právě označeném objektu a tlačítko exportovacího plug-inu Odeon, které dokončený model převádí do geometrického formátu PAR, se kterým je pak možné dále pracovat v rámci simulace. Základní zobrazení SketchUpu ukazuje následující obrázek:



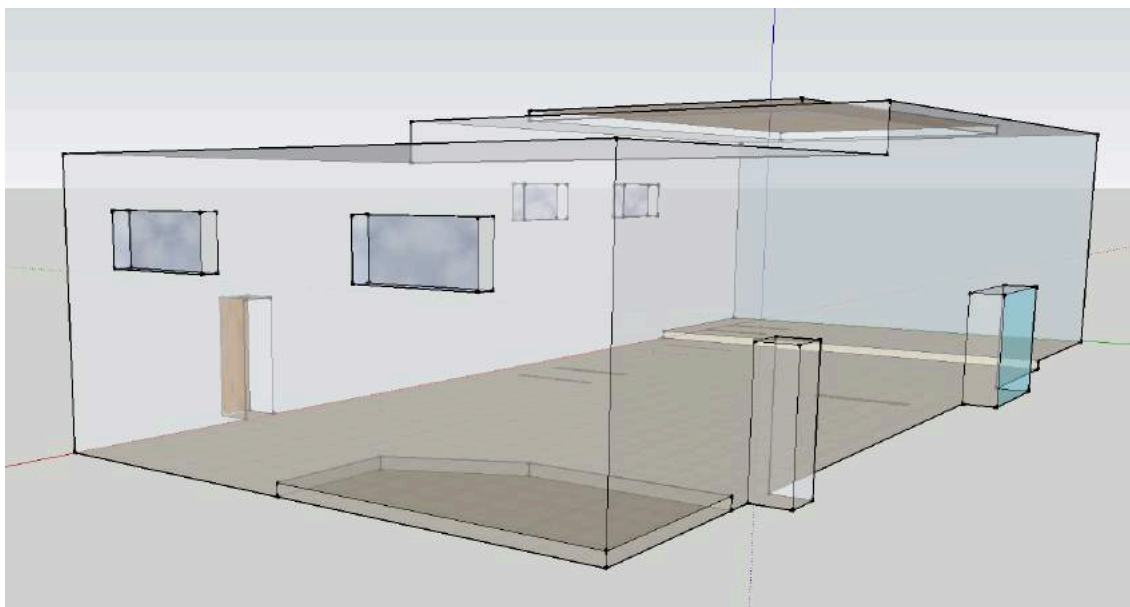
Obrázek 22: Základní zobrazení Trimble SketchUp

8.2 Jednotlivé modelované varianty

Na základě dostupné projektové dokumentace a údajů získaných během reálného měření sálu v Bechlíně byla vymodelována základní podoba prázdného prostoru včetně všech náležitostí (okna, dveře, podium, úrovně podlahy a stropu). Pro potřeby následné simulace pak byly do modelu doplněny objekty představující rozmístěné stoly se sedícími hosty, příp. umístění publika během hudební produkce na podiu. Následující podkapitoly ukazují jednotlivé varianty se stručným popisem.

8.2.1 Prázdný sál

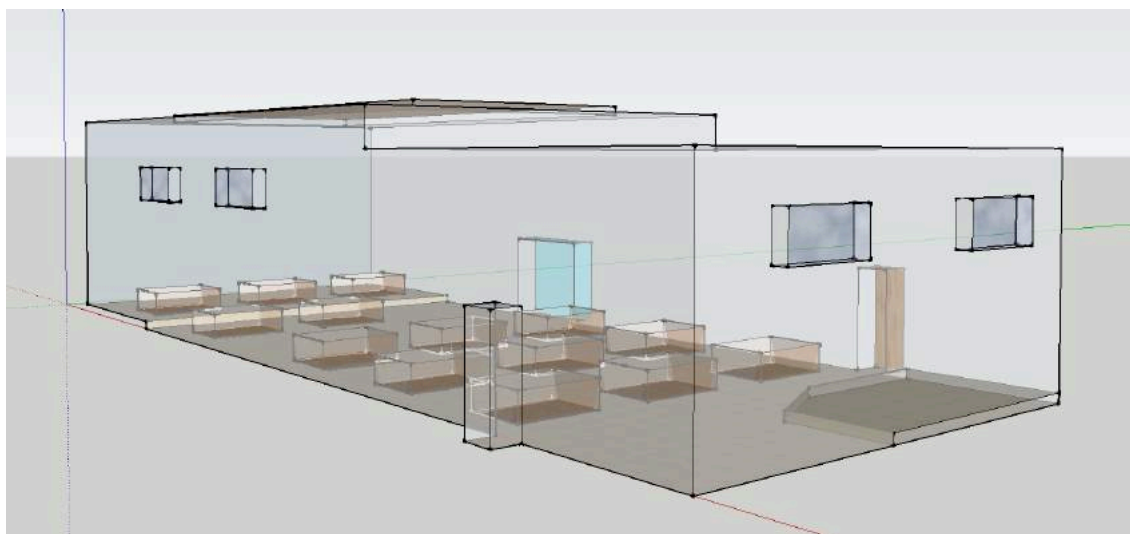
Základní a nejjednodušší variantou je prázdný sál bez hostů a bez rozmístěných stolů. Ačkoliv tento stav pro optimalizaci akustických parametrů prostoru není podstatný, jelikož se takto prostor reálně nevyužívá, je nezbytný pro kalibraci modelu a ověření správnosti exportovaného formátu geometrie. Následující obrázek ukazuje podobu prázdného sálu v podobě SketchUp modelu, kalibrace je pak popsána v následujících kapitolách.



Obrázek 23: SketchUp - prázdný sál

8.2.2 Sál s rozmístěnými stoly

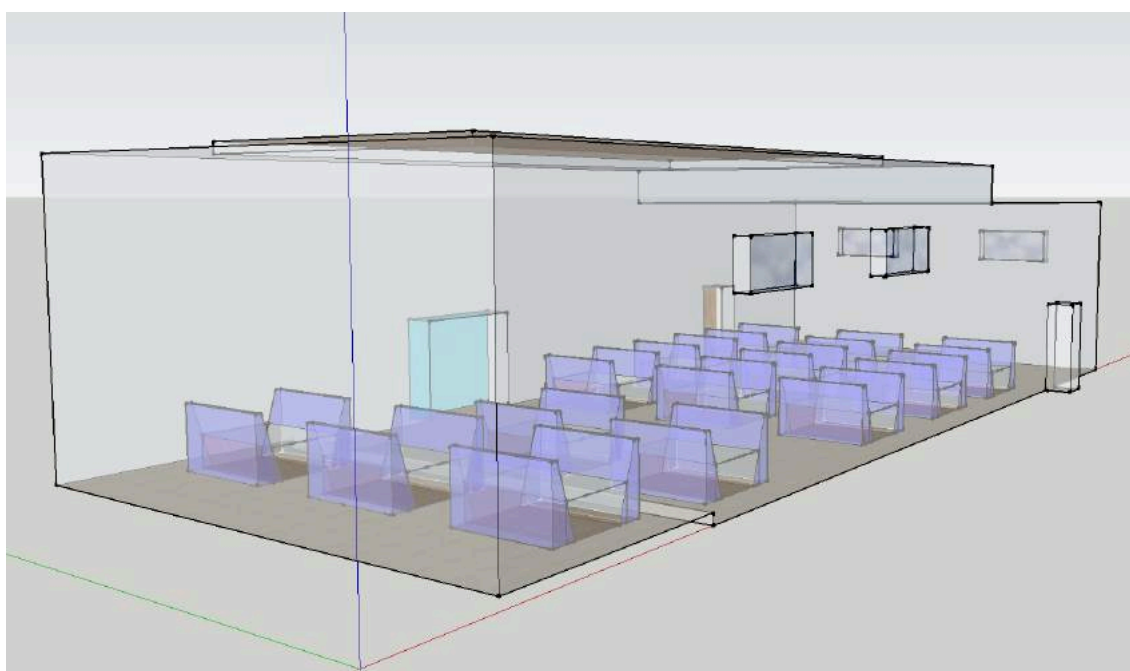
Druhou variantou je sál, ve kterém jsou pravidelně rozmístěny stoly se židlemi. Vzhledem k velikosti pohltivé plochy židlí a jejich malému vlivu na celkovou akustickou pohltivost prostoru jsou stoly se židlemi aproximovány jednoduchými kvádry. Tento přístup podstatně zjednodušuje a zrychluje výpočet v rámci simulace, přičemž výsledky se prakticky nemění. Tento stav je možné brát v úvahu, kdy bude v prostoru malé množství sedících hostů (do 30% kapacity). Zásadní pro tento stav bude míra zřetelnosti C_{50} , kdy je nezbytné hlavně to, aby si hosté během konverzace bez problémů rozuměli a přitom nebyli výrazně rušeni okolím.



Obrázek 24: SketchUp - sál se stoly

8.2.3 Sál s hosty u stolů

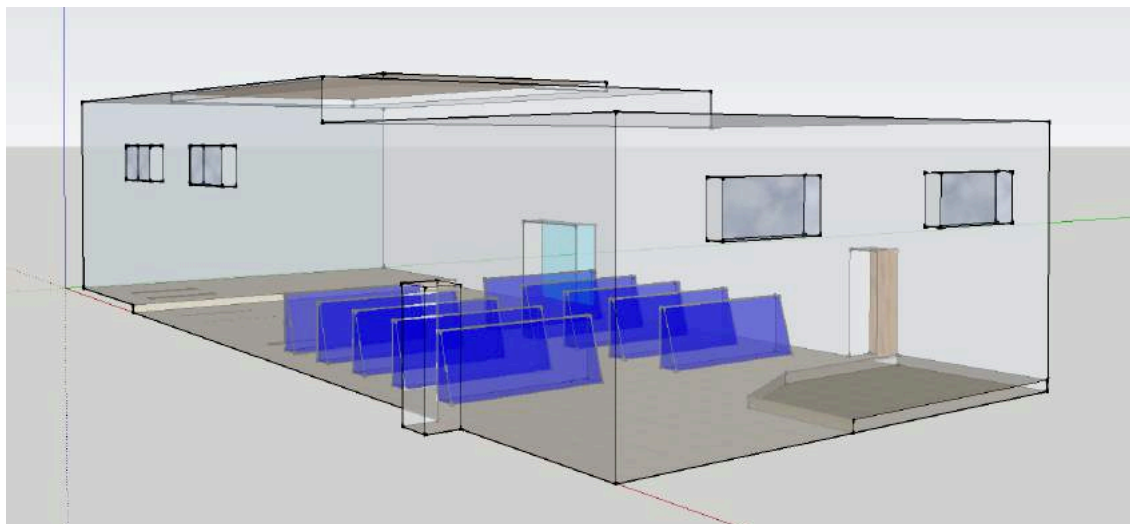
Další variantou je stav, kdy je většina stolů obsazena sedícími hosty. V tomto případě jsou hosté aproximováni klíny se zkosenou špičkou výšky 120 cm. Tato výška odpovídá průměrnému člověku vsedě, přičemž zkosená špička napomáhá přesnosti simulace, kdy nedochází k difrakci zvuku na ostré hraně [9].



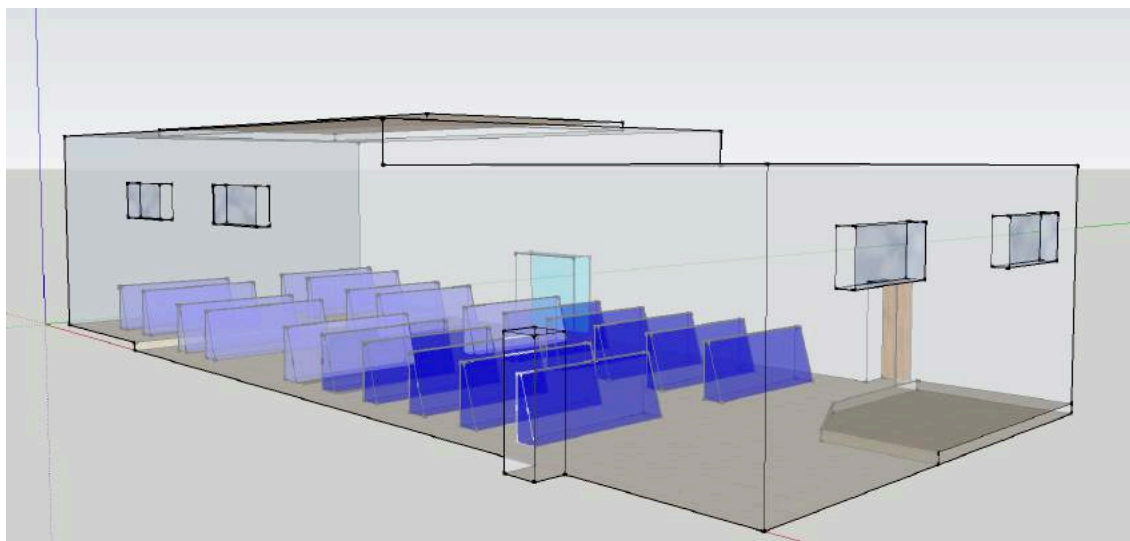
Obrázek 25: SketchUp - sál s hosty u stolů

8.2.4 Sál se sedícím publikem (50% a 100% kapacity)

V případě hudební produkce je publikum na židlích soustředěno co nejbližě podia na jedné straně sálu. Z toho důvodu je potřeba rozlišovat několik stavů obsazenosti, kdy návštěvnost bude mít zásadní vliv na přednes sálu zejména pro krajní a zadní místa, která nejsou obklopena větším množstvím ostatních osob. Z tohoto důvodu bylo v rámci simulace uvažováno se dvěma stavy – 50% a 100% obsazeností sálu. Stejně jako v případě hostů u stolů je publikum aproximováno klíny se zkosenou špičkou.



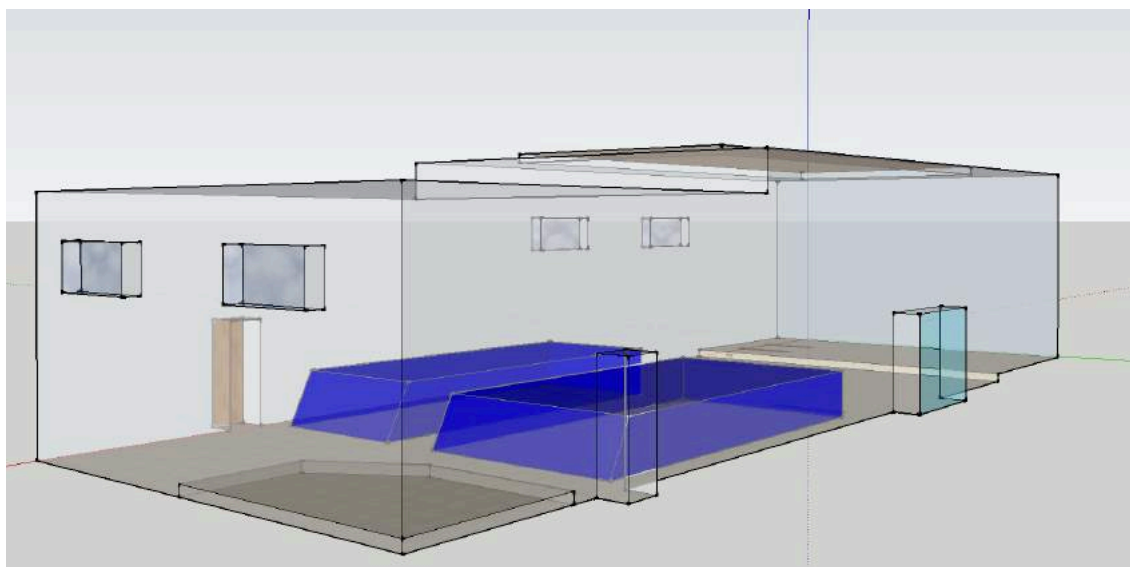
Obrázek 26: SketchUp - 50% kapacity obsazeno



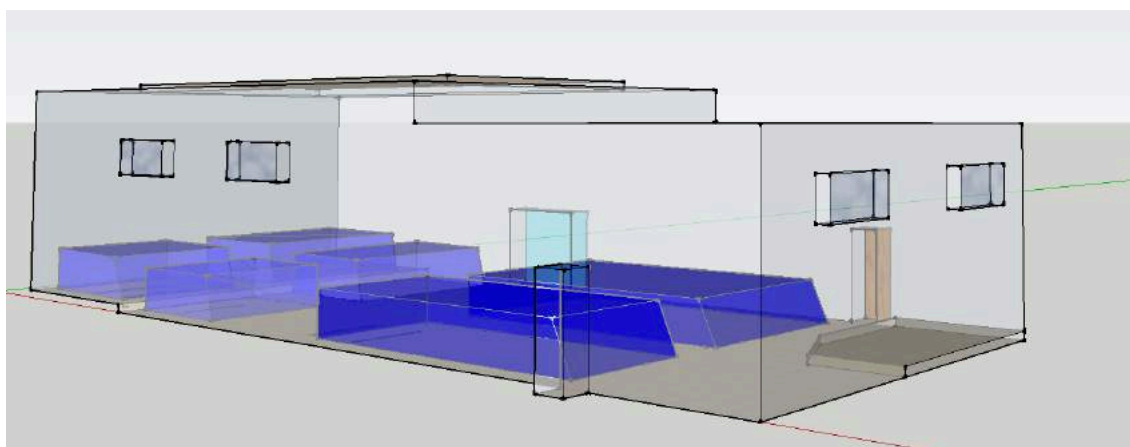
Obrázek 27: SketchUp - 100% kapacity obsazeno

8.2.5 Sál se sedícím publikem – aproximace plochou

V některých případech větších prostorů s obsazeností (posluchárny, koncertní sály,...) je publikum nahrazováno jednoduchou plochou (*audience area*). Pro potřeby simulace tento přístup usnadňuje výpočet, kdy systém nepočítá s odrazy mezi jednotlivými řadami publika. Výsledky se ve většině případů zásadně neliší od skutečného stavu a tak je tento přístup v poslední době velice populární. V rámci tohoto projektu bylo tedy počítáno i s touto variantou a výsledky byly porovnány s verzemi aproximace klíny.



Obrázek 28: SketchUp - aproximace plochou (50% kapacity)



Obrázek 29: SketchUp - aproximace plochou (100% kapacity)

9. Simulace prostorové akustiky v prostředí Odeon

Cílem simulace v prostorové akustice je vyhodnotit vliv libovolných úprav uzavřeného prostoru na jeho zvukový přednes. Celý návrh je tak možno realizovat ve virtuální realitě ještě před fyzickou výstavbou prostoru či zahájením jeho rekonstrukce. Komplexní simulace před zahájením projektu dokáže výrazně snížit dodatečné náklady na akustické úpravy prostoru, jelikož ty mohou být uvažovány už v počátku výstavby, a prvky zajišťující dostatečnou akustickou pohodu mohou plnit i jiné funkce (tepelně-izolační, oddělovací,...).

V současnosti existuje několik sofistikovaných simulačních prostředí, které umožňují získat prakticky všechny objektivní akustické parametry prostoru z jeho 3D modelu, včetně jejich frekvenčních i prostorových závislostí. Jedním z nich je i program Odeon, který byl v rámci tohoto projektu použit, a který bude níže krátce představen.

9.1 Představení prostředí Odeon

9.1.1 Vstupy programu

3D Model

Aby mohla být simulace úspěšná, je třeba programu zadat několik vstupů. Prvním a nejdůležitějším z nich je samotný 3D model zkoumaného prostoru. Odeon samotný umožňuje jak vytvoření modelu přímo v rámci prostředí, tak i import modelu z jiné aplikace (AutoCAD, SketchUp,...) za použití oficiálního plug-inu od vývojářů Odeonu. Z důvodu uživatelské jednoduchosti byl v rámci tohoto projektu použit právě plug-in pro Trimble SketchUp.

Materiály povrchů

Po úspěšném vytvoření/importu 3D modelu je nutné všem vnitřním plochám definovat jejich povrchové vlastnosti. Ty jsou pro potřeby simulace reprezentovány činitelem zvukové pohltivosti a činitelem difuzity. Je možné využít poměrně obsáhlého katalogu, který je součástí prostředí a obsahuje většinu standardních stavebních materiálů (beton, cihly, podlahové krytiny, zasklení,...). V případě potřeby je samozřejmě možné přidat materiál vlastní nebo upravit některé ze stávajících.

Pozice zdrojů a posluchačů

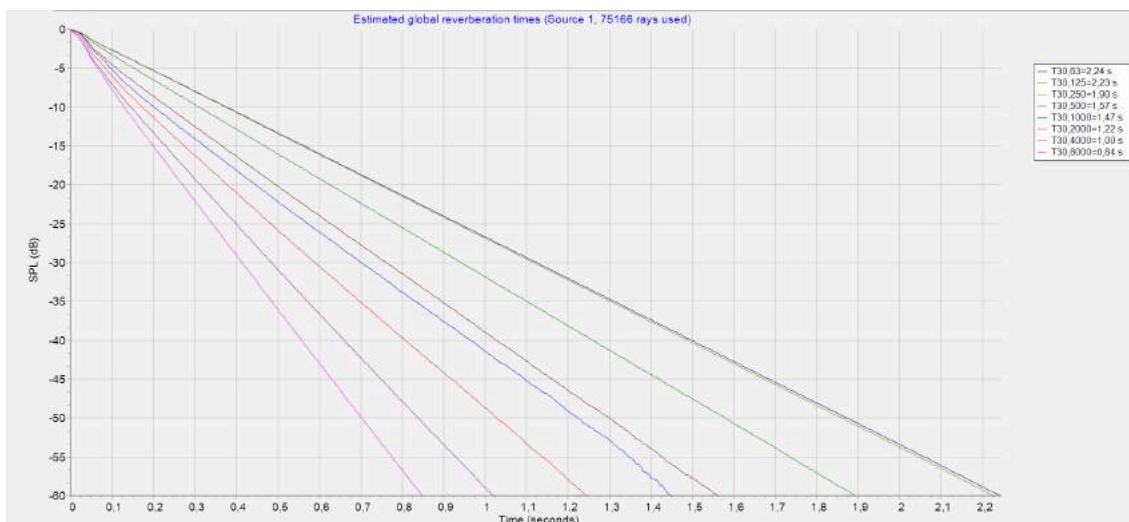
Stejně jako během reálného měření, i před simulací musíme definovat polohy zdroje a posluchačů (měřících bodů). Ty by měly být voleny podle toho, kde se předpokládá, že se během reálného používání prostoru budou zdroje/posluchači vyskytovat. Kromě umístění zdrojů a měřících bodů umožňuje Odeon i zvolit směrovou charakteristiku a frekvenční závislost citlivosti zdroje pomocí katalogu či manuálního nastavení tak, aby zdroj maximálně odpovídal tomu reálně použitému. Kromě univerzálního bodového a plošného zdroje je k dispozici řada komerčně nabízených reproduktorů či aproximace řečníka/hudebníka. Jaké zdroje a v jakém rozmístění byly použity při simulaci v rámci tohoto projektu je pak obsahem následující podkapitoly.

9.1.2 Proces výpočtu a výstupy

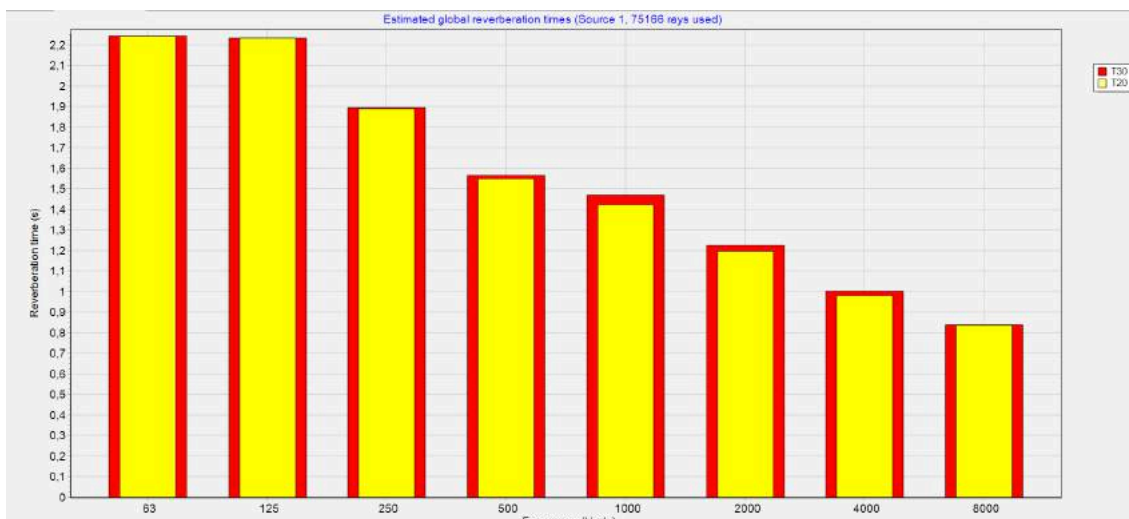
Jakmile jsou všechny vstupy v pořádku zadány, lze přejít k samotné simulaci měření. Ta je v rámci prostředí Odeon k dispozici v několika variantách s rozdílnou přesností, množstvím výstupních dat a tomu odpovídající dobou výpočtu. Všechny využívají principu Ray tracing, kdy je souvislá zvuková vlna nahrazena tisíci až statisíci jednotlivých paprsků, které jsou zdrojem virtuálně vypuštěny do prostoru. U každého z nich je pak v každém měřicím bodě sledován jeho směr a energie. Oba tyto parametry se pochopitelně mění s každým dalším odrazem paprsku.

Celkový odhad (Global estimate)

Nejjednodušším a nejrychlejším výpočtem v rámci 3D modelu je tzv. *Global estimate*, tedy celkový odhad. Ten na základě proložení poklesových křivek (viz [1]) vypočte frekvenční závislost doby dozvuku pro prostor jako celek. Global estimate tedy nelze považovat za přístup, jehož výstupem by byly plnohodnotné výsledky. Je ovšem vhodným nástrojem pro kontrolu nastavení simulace a kalibraci modelu (viz. následující podkapitola). Příklad výstupu funkce global estimate znázorňují následující obrázky:



Obrázek 30: Odeon, Global estimate - poklesové křivky



Obrázek 31: Odeon, Global estimate - doba dozvuku

Impulsová odezva v jednom bodě (Single point impulse response)

Další, už plnohodnotnou výpočetní funkcí, je získání impulsové odezvy v jednom konkrétním bodě. Měřicí bod je nahrazen malým kontrolním objemem, do kterého během simulace vstupují jednotlivé paprsky. Ze směrů a energií paprsků je vyhodnocena celková energie zvuku zdroje působící na daný bod, včetně prostorového vnímání posluchače. Výsledkem je výčet prakticky všech objektivních akustických parametrů s jejich frekvenční závislostí a reálná nahrávka impulsové odezvy v daném bodě, se kterou je možné dále pracovat v jiném výpočetním programu.

Impulsová odezva ve více bodech (Multi-point impulse response)

Funkce Multi-point impulse response využívá stejného principu, jako již představená impulsová odezva v jednom bodě. Rozdílem je, že místo jednoho bodu počítá se skupinou měřicích bodů předem definovanou uživatelem, a výsledky v závěru prostorově průměruje pro danou skupinu. Výsledkem je pak soubor objektivních parametrů pro určitou oblast definovanou použitými měřicími body. Výhodou tohoto přístupu je fakt, že je možné jeden bod využít v rámci několika skupin a tím získat prostorově průměrované parametry pro různé (i protínající se) oblasti.

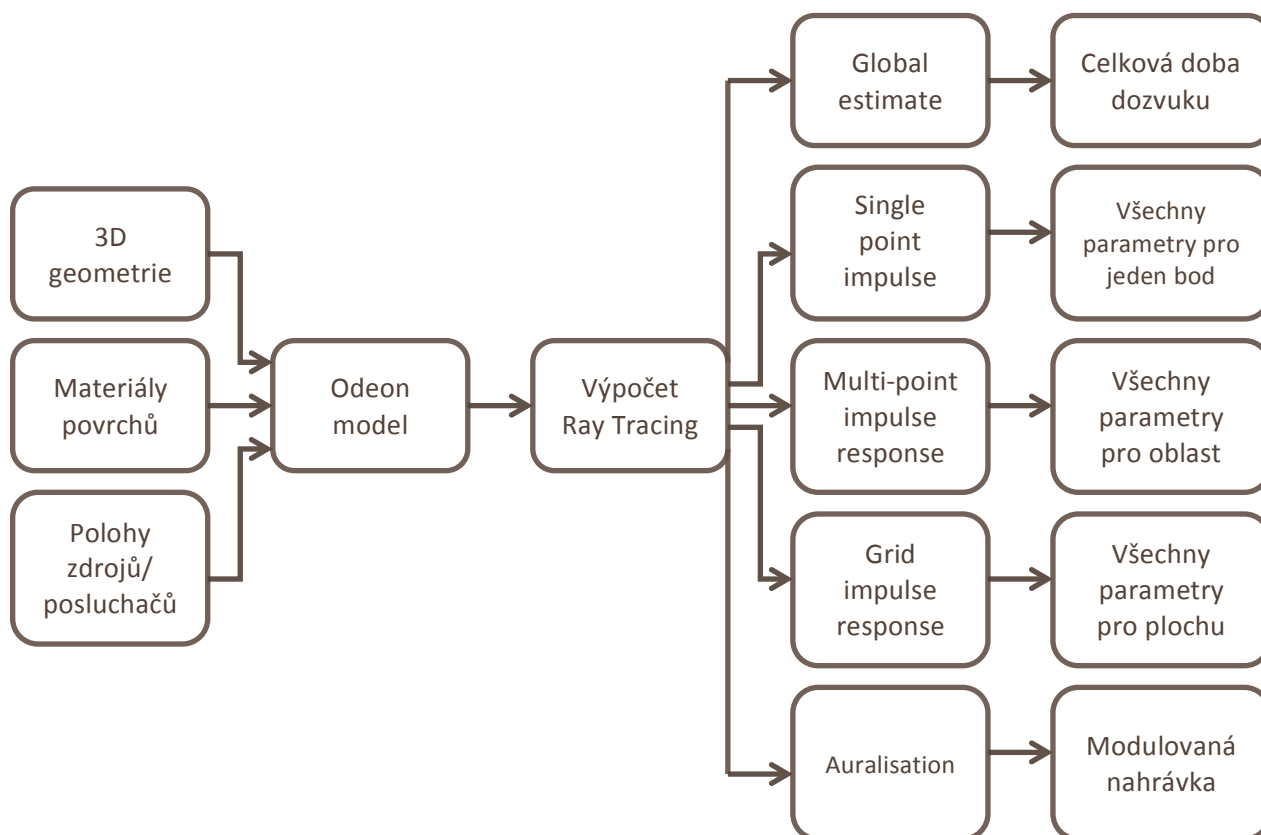
Impulsová odezva v mřížce (Grid impulse response)

Impulsová odezva v mřížce je obdobná funkci Multi-point impulse response s tím rozdílem, že v tomto případě je počítáno s pevně definovanou mřížkou. Ta ve většině případů kopíruje celou plochu prostoru v určitém rozměru x,y,z 3D prostoru. Výstup této funkce je v podobě plošného grafu prostorové závislosti určitých parametrů, u kterých je tato závislost výrazná (typicky EDT , síla zvuku G , C_{50} ...)

Auralizace

Posledním zajímavým výstupem simulace je tzv. auralizace. Auralizace je proces schopný aplikovat vypočtenou počáteční dobu dozvuku EDT v daném bodě na konkrétní zvukovou nahrávku v reálném čase. V rámci auralizace je tak možné přehrát libovolný zvuk (řečníka, hudebníka, reprodukovanou hudbu, hluk) modulovaný tak, jak by měl znít v reálném prostoru. Výstup auralizace nelze nijak objektivně vyhodnotit a výslednou nahrávku je nutné brát s rezervou, může být však velice přínosná v rámci subjektivního posouzení zvukového přednesu prostoru a v rámci prezentace vlivu změn v prostoru.

9.1.3 Shrnutí funkcí prostředí Odeon



Obrázek 32: Schema funkce prostředí Odeon

9.2 Import a kalibrace modelu v prostředí Odeon

Správný import a kalibrace modelu je nezbytná pro pozdější získání výsledků s dostatečnou vypovídací hodnotou. Nesprávně zvolené měřicí body nebo (a zejména) nesprávně zvolené vlastnosti materiálů jednotlivých povrchů v modelovaném prostoru mohou způsobit odchylku jednotlivých parametrů v řádech desítek procent a tím znehodnotit i výsledný návrh optimalizace.

9.2.1 Import geometrie prostoru z prostředí SketchUp

Během vytváření samotné geometrie prostoru v prostředí SketchUp je třeba myslet i na následný export do Odeonu. Čím složitější geometrie prostoru bude (tedy čím více bude obsahovat detailů), tím delší bude doba simulace a riziko výskytu výpočetních chyb bude stoupat. Složitost modelu by tak měla být volena dostatečná, aby stále odpovídala skutečnému stavu, avšak ne tak detailní, aby narušovala běh simulace. Také je vhodné se maximálně vyvarovat jakýchkoliv oblých tvarů, které enormně zvyšují složitost výpočtu. V reálných aplikacích se oblé stěny většinou rozdělují na rovinné sekce. Pro rozlišení „podstatných“ a „nepodstatných“ prvků prostoru nelze stanovit obecná pravidla, volba složitosti geometrie většinou vychází ze zkušeností obsluhující osoby. Při tvorbě modelu sálu v Bechlíně byla respektována tato pravidla:

- *jakákoliv změna úrovně podlahy či stropu musí být v modelu zanesena* (v modelu je tedy zřetelná dvoustupňová podlaha, podium a tříúrovňový strop včetně kazetové části)
- *Svítlidla na delších obvodových stěnách byla zanedbána* (vzhledem k jejich velikosti a výšce zavěšení se nepředpokládá jejich výrazný vliv na výsledky)
- *Rámy kazetového stropu byly zanedbány* (vzhledem k tomu, že jsou ze stejného materiálu – dřeva, jako zbytek kazetového stropu, a jejich hloubce v řádech centimetrů, se předpokládá minimální vliv na výsledky)
- *Zvlnění závěsu u zadní stěny bylo rovněž zanedbáno* (opět z důvodu potenciálního minimálního vlivu na výsledky)

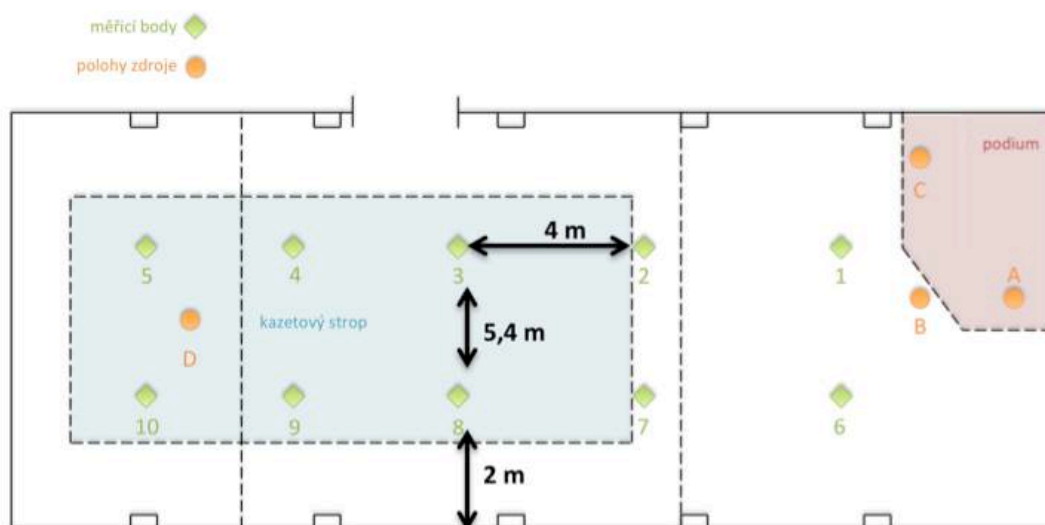
Po dokončení modelu v prostředí SketchUp s respektováním výše uvedených pravidel byl model pomocí Odeon plug-inu převeden na geometrický formát, který je schopný Odeon přečíst. V této fázi končí práce se SketchUpem a dále se budeme zabývat pouze prostředím Odeon.

9.2.2 Volba měřicích bodů a poloh zdroje

Po úspěšném dokončení importu modelu do prostředí Odeon (bez chybových hlášení geometrických vad) je prvním krokem volba měřicích bodů a poloh zdroje. V našem případě, kdy ve zkoumaném prostoru před touto simulací proběhlo skutečné měření doby dozvuku, je toto jednoduché – body se volí stejně, jen místo šesti měřicích bodů bylo kvůli větší přesnosti voleno bodů deset v kratších rozestupech. Body byly voleny takto proto, že už během reálného měření bylo respektováno využití sálu včetně toho, kde se bude vyskytovat publikum či hosté sedící u stolů. Druhým důvodem volby stejných bodů je kalibrace. V případě simulace v totožných bodech totiž bude kalibrace modelu nejpřesnější.

Měřicí body

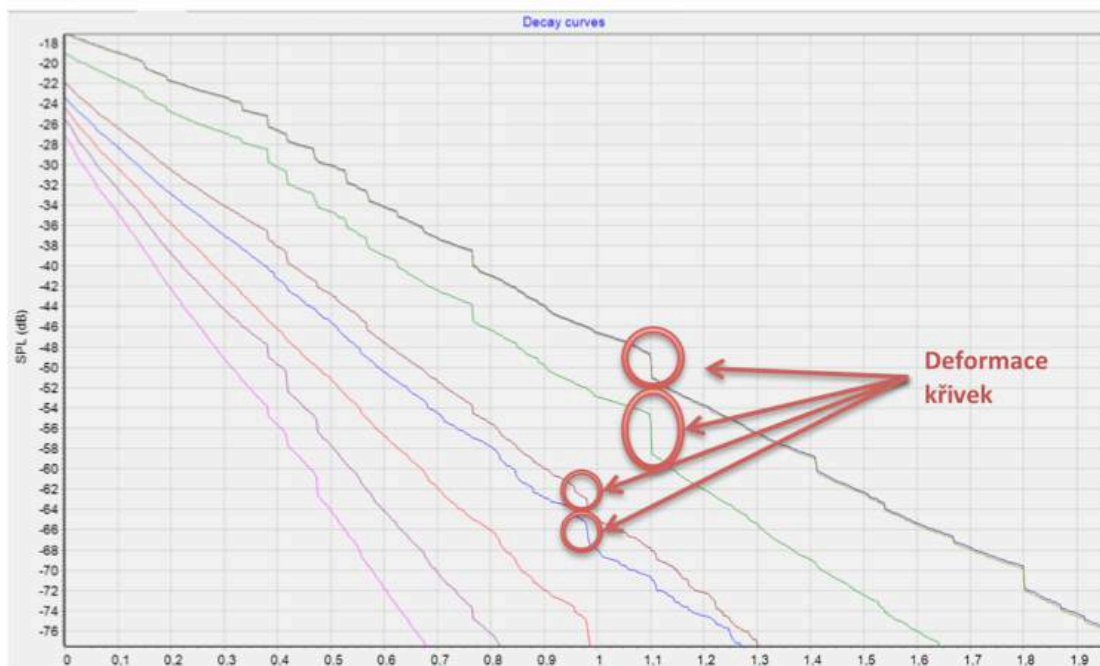
Měřicích bodů bylo zvoleno 10 v rozestavení dle následujícího obrázku. Výška bodů nad podlahou je pro většinu případů 1,2 m dle normy [5] a obecných pravidel. Tato výška odpovídá umístění ucha průměrného sedícího posluchače.



Obrázek 33: Odeon - rozložení měřicích bodů

U variant sálu s hosty sedícími u stolů a 100% obsazením publikem byla u bodů 5 a 10 zvolena výška 1,4 m nad podlahou. Důvodem bylo to, že kontrolní objem těchto bodů byl příliš blízko hrany objektu představujícího návštěvníky. U varianty aproximace publika plochou (s výškou 1,2 m) byly do výšky 1,4 m umístěny všechny body.

Přílišná blízkost kontrolního objemu u kterékoli z ploch způsobuje nepřesnost výpočtu a je tedy vhodné tyto body umístit trochu jinak, i přes narušení pravidel normy [5]. Toto doporučení bylo potvrzeno i simulací, kdy následující obrázek 34 znázorňuje deformované poklesové křivky vypočtené ve špatně umístěných bodech.



Obrázek 34: Odeon - deformace poklesových křivek v bodech blízko plochy

Polohy zdroje

Polohy zdroje byly voleny stejně, jako při skutečném měření – tedy 3 body na podiu, z čehož dva co nejbliže ose sálu, a jeden v prostoru. Zdroj D nebyl vzat v úvahu při průměrování hodnot, výsledky z něj slouží pro představu odezvy sálu vůči účinkujícím na podiu.

9.2.3 Volba povrchových materiálů

Po rozmístění měřicích bodů je dalším krokem v rámci simulace přiřazení materiálů jednotlivým plochám v prostoru. K tomu je možné využít integrovanou databázi, která obsahuje několik stovek nejčastěji používaných povrchových materiálů, včetně speciálních akustických obkladů a prvků. Kromě databáze je samozřejmě možné vytvářet materiály nové, či upravovat stávající. Každý materiál je definován svým činitelem akustické pohltivosti a difúzním činitelem pro 8 oktávových pásem od 62,5 do 8000 Hz. Některé poslední studie zpochybňují přesnost simulačních programů při uvažování difuzivity materiálů. [25] Z toho důvodu, a také vzhledem k jednoduchosti geometrie prostoru, nebyla difuzivita materiálů uvažována a počítalo se pouze s pohltivostí v 6 frekvenčních pásmech od 125 do 4000 Hz.

Výchozí materiály

Každému povrchu byl v počáteční fázi kalibrace přiřazen existující materiál z databáze, který svým popisem nejvíce odpovídal skutečnému stavu. Následující tabulka znázorňuje tuto volbu materiálů. Vstup do sálu byl aproximován 100% pohltivostí, neboť se předpokládá, že většina zvuku, který pronikne do předsálí s barem, se do sálu již nevrátí s dostatečnou energií, aby výsledky ovlivnil. Také bylo ověřeno, že výsledky se výrazně nezmění ani v případě, že se místo 100% pohltivosti zvolí hodnota nižší, např. 70%.

Tabulka 10: Odeon - výchozí materiály

Povrch	Skutečný materiál	Odeon materiál
Vstup do sálu	Nic	100% pohltivost
Dveře	Blíže nespecifikované dřevo	Dveře z masivního dřeva
Kazetový strop	Historické dřevěné kazety	Obklad z masivního dřeva se vzduchovou mezerou
Okna	Plastová eurookna s dvojitým zasklením	Dvojitě zasklení
Podium	Keramický obklad (dlaždice)	Keramické dlaždice tl. 10 mm
Podlaha	Keramický obklad (dlaždice)	Keramické dlaždice tl. 10 mm
Stěny	Sádrokarton	Sádrokarton tl. 25 mm
Stoly	Blíže nespecifikované dřevo	Dveře z masivního dřeva
Strop	Sádrokarton	Sádrokarton tl. 25 mm
Závěs	Těžká tkanina	Závěs 2 kg/m ²
Sedící lidé	Sedící lidé	Sedící publikum podle [26]

Kalibrace a finální volba materiálů

S touto dispozicí materiálů byl spuštěn výpočet Global estimate, který na základě Eyringovy rovnice a proložení poklesových křivek vypočítal dobu dozvuku pro prostor jako celek. Průměr této doby dozvuku pro všechny polohy zdroje by měl být v ideálním případě shodný s hodnotami skutečně naměřenými, pak lze hovořit o zkalibrovaném modelu a je možné považovat výsledky z něj za věrohodné.

Aby tohoto stavu bylo dosaženo, je nutné upravit celkovou pohltivost prostoru a to co nejrovnoměrněji. V případě této simulace byl kalibrován materiál stěn a stropu, které dohromady zaujímají většinovou plochu všech povrchů. Změna pohltivosti materiálu tak bude rovnoměrně rozložena v celém objemu sálu a nebude způsobovat prostorové nepřesnosti.

Hodnoty činitele zvukové pohltivosti se pro daný materiál manuálně upravovaly tak dlouho, dokud nebylo výpočtem Global estimate dosaženo hodnot s přijatelnou odchylkou vůči skutečně naměřené době dozvuku. Následující tabulky znázorňují úspěšnost kalibrace a finální volbu použitých materiálů s jejich činitelem zvukové pohltivosti.

Tabulka 11: Odeon - kalibrace doby dozvuku

[s]	Naměřené hodnoty					Simulované hodnoty			
	Zdroj A	Zdroj B	Zdroj C	Zdroj D	Průměr	T_{30} před	Odchylka před	T_{30} po	Odchylka po
T_{125}	2,88	2,76	2,66	2,76	2,77	2,61	5,6%	2,78	-0,5%
T_{250}	2,65	2,69	2,7	2,68	2,68	2,04	23,9%	2,68	0,0%
T_{500}	2,54	2,56	2,52	2,54	2,54	2,83	-11,4%	2,54	0,0%
T_{1k}	2,29	2,32	2,32	2,3	2,31	2,99	-29,6%	2,32	-0,5%
T_{2k}	1,83	1,81	1,79	1,82	1,81	2,99	-65,0%	1,79	1,2%
T_{4k}	1,3	1,33	1,34	1,34	1,33	2,15	-62,0%	1,33	-0,2%

Tabulka 12: Odeon - činitel akustické pohltivosti povrchů

Povrch	Činitel zvukové pohltivosti α [-]					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Vstup do sálu	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0
Dveře	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Kazetový strop	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Okna	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02
Podium	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Podlaha	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Stěny	0,07	0,065	0,065	0,067	0,106	0,140
Stoly	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Strop	0,07	0,065	0,065	0,067	0,106	0,140
Závěs	0,07	0,31	0,49	0,81	0,66	0,54
Sedící lidé	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87

9.3 Výpočet objektivních akustických parametrů

Po úspěšné kalibraci modelu prázdného sálu je možné přistoupit k plnohodnotnému výpočtu objektivních akustických parametrů. K tomu bylo využito funkce měření impulsové odezvy v jednom bodě pro všechny kombinace 7 verzí sálu, 10 měřicích bodů a 4 poloh zdroje. U každé této kombinace byly zjištěny hodnoty 11 objektivních akustických parametrů pro 6 frekvenčních pásem, celkem tedy přes 18.000 samostatných hodnot.

Odeon umožňuje definovat seznam výpočetních úloh, které mají proběhnout, a parametrů, které mají být získány. Tím značně usnadní a urychlí získání takového množství dat, při kterém není potřeba neustálé přítomnosti obsluhy programu, který pracuje většinu času samostatně. Konkrétně v případě námi analyzovaného sálu trval výpočet na PC s procesorem Intel Core i7 3.5 GHz a RAM pamětí 16 GB zhruba 15 min pro jednu verzi sálu. Pro získání impulsové odezvy v jednom bodě bylo použito 16.000 paprsků, které kontrolním objemem prošly, pro jednu verzi sálu tedy bylo potřeba celkem 640.000 jednotlivých paprsků nesoucích informaci o akustickém tlaku, frekvenci a směru šíření.

9.3.1 Parametry sálu jako celku a frekvenční analýza

Následující tabulky a grafy znázorňují objektivní parametry zkoumaného prostoru jako celku. Bez ohledu na vhodnost pro konkrétní parametr jsou tedy hodnoty prostorově průměrovány

pro základní představu, jak se jednotlivé parametry změní při změně verze sálu (např. z neobsazeného na obsazený).

Tabulka 13: Objektivní akustické parametry KD Bechlín

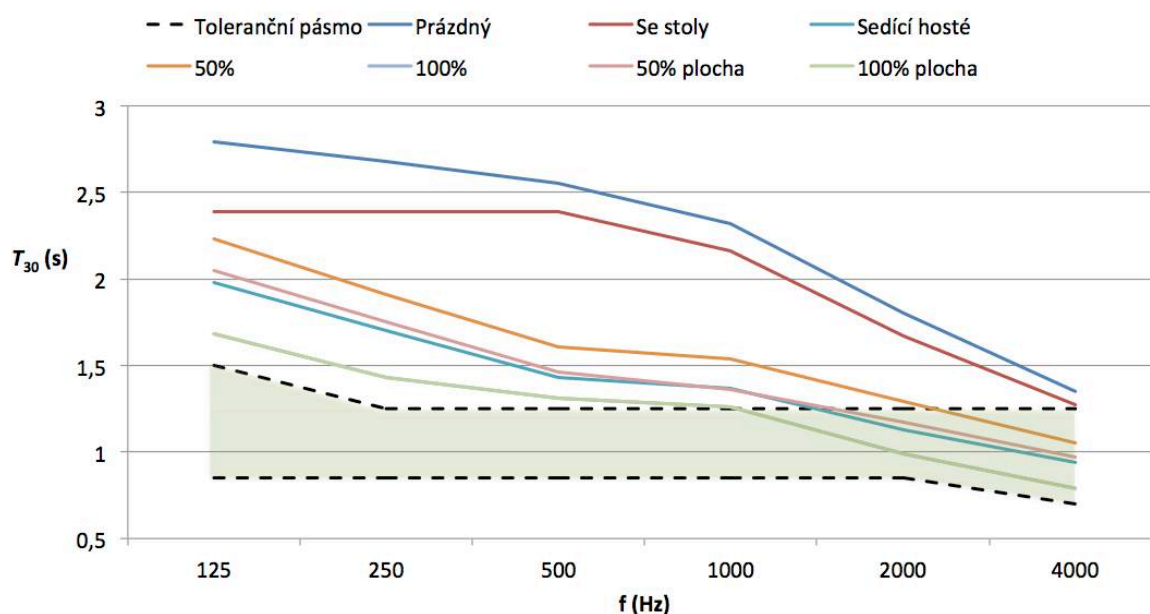
Parametr	f [Hz]	Verze sálu						
		Prázdný	Se stoly	Sedící hosté	50%	100%	50% plocha	100% plocha
T_{30} [s]	125	2,79	2,39	1,98	2,23	1,98	2,05	1,68
	250	2,68	2,39	1,70	1,91	1,64	1,75	1,43
	500	2,55	2,39	1,43	1,61	1,39	1,46	1,31
	1000	2,32	2,16	1,37	1,54	1,33	1,36	1,26
	2000	1,80	1,67	1,13	1,29	1,08	1,17	0,99
	4000	1,35	1,27	0,94	1,05	0,88	0,97	0,79
EDT [s]	125	2,87	2,44	2,04	2,33	2,04	2,10	1,67
	250	2,76	2,46	1,74	1,98	1,65	1,77	1,31
	500	2,60	2,44	1,37	1,60	1,24	1,38	0,92
	1000	2,33	2,18	1,25	1,45	1,11	1,18	0,76
	2000	1,81	1,68	1,05	1,22	0,94	1,04	0,68
	4000	1,35	1,27	0,89	1,01	0,79	0,88	0,60
t_s [ms]	125	207	180	150	176	149	153	121
	250	198	181	127	158	117	127	94
	500	186	179	96	135	83	95	64
	1000	164	159	86	120	73	78	52
	2000	128	122	72	98	62	68	46
	4000	91	92	61	78	53	58	41
C_{50} [dB]	125	-5,54	-5,28	-4,25	-5,02	-4,01	-4,25	-2,95
	250	-5,24	-5,28	-3,20	-3,83	-2,47	-3,04	-1,32
	500	-4,88	-5,20	-1,31	-2,10	-0,20	-0,91	1,57
	1000	-4,18	-4,54	-0,56	-1,22	0,66	0,54	3,12
	2000	-2,96	-3,07	0,37	-0,37	1,52	1,18	3,67
	4000	-1,27	-1,45	1,33	0,71	2,42	2,02	4,28
D_{50} [-]	125	0,22	0,23	0,28	0,25	0,29	0,28	0,34
	250	0,23	0,23	0,33	0,30	0,36	0,34	0,42
	500	0,25	0,24	0,43	0,38	0,49	0,45	0,58
	1000	0,28	0,26	0,47	0,43	0,54	0,53	0,67
	2000	0,34	0,33	0,52	0,48	0,59	0,56	0,69
	4000	0,42	0,42	0,57	0,54	0,64	0,61	0,72
C_{80} [dB]	125	-3,22	-2,71	-1,72	-2,59	-1,57	-1,67	-0,26
	250	-2,90	-2,72	-0,63	-1,37	0,04	-0,43	1,49
	500	-2,52	-2,66	1,33	0,43	2,46	1,72	4,55
	1000	-1,75	-1,93	2,14	1,36	3,42	3,23	6,18
	2000	-0,38	-0,35	3,25	2,37	4,44	3,98	6,88
	4000	1,45	1,45	4,40	3,64	5,56	5,02	7,73

Parametr	f [Hz]	Verze sálu						
		Prázdný	Se stoly	Sedící hosté	50%	100%	50% plocha	100% plocha
SPL [dB]	125	-12,54	-13,61	-15,31	-14,48	-15,59	-14,44	-15,34
	250	-12,79	-13,56	-16,36	-15,60	-17,04	-15,67	-16,88
	500	-13,17	-13,65	-18,28	-17,34	-19,28	-18,01	-19,72
	1000	-14,06	-14,51	-19,23	-18,39	-20,30	-19,73	-21,40
	2000	-15,58	-16,15	-20,27	-19,43	-21,21	-20,42	-21,93
	4000	-17,36	-17,93	-21,35	-20,64	-22,19	-21,21	-22,47
LF [-]	125	0,257	0,270	0,272	0,265	0,277	0,265	0,275
	250	0,254	0,268	0,263	0,260	0,268	0,261	0,266
	500	0,252	0,266	0,249	0,255	0,253	0,256	0,251
	1000	0,249	0,260	0,242	0,251	0,244	0,250	0,240
	2000	0,250	0,256	0,237	0,248	0,239	0,245	0,234
	4000	0,243	0,249	0,232	0,241	0,234	0,236	0,228
IACC_{early} [-]	125	0,319	0,298	0,332	0,280	0,294	0,331	0,285
	250	0,271	0,256	0,269	0,282	0,257	0,279	0,239
	500	0,329	0,333	0,327	0,328	0,317	0,351	0,330
	1000	0,292	0,256	0,324	0,320	0,333	0,344	0,357
	2000	0,220	0,200	0,263	0,231	0,255	0,243	0,262
	4000	0,141	0,132	0,161	0,152	0,149	0,151	0,167
IACC_{late} [-]	125	0,319	0,298	0,332	0,280	0,294	0,331	0,285
	250	0,271	0,256	0,269	0,282	0,257	0,279	0,239
	500	0,329	0,333	0,327	0,328	0,317	0,351	0,330
	1000	0,292	0,256	0,324	0,320	0,333	0,344	0,357
	2000	0,220	0,200	0,263	0,231	0,255	0,243	0,262
	4000	0,141	0,132	0,161	0,152	0,149	0,151	0,167
IACC_{total} [-]	125	0,319	0,298	0,332	0,280	0,294	0,331	0,285
	250	0,271	0,256	0,269	0,282	0,257	0,279	0,239
	500	0,329	0,333	0,327	0,328	0,317	0,351	0,330
	1000	0,292	0,256	0,324	0,320	0,333	0,344	0,357
	2000	0,220	0,200	0,263	0,231	0,255	0,243	0,262
	4000	0,141	0,132	0,161	0,152	0,149	0,151	0,167

Doba dozvuku

Obrázek 35 znázorňuje závislost doby dozvuku T_{30} na frekvenci a na konkrétní verzi obsazenosti sálu. Je zřejmé, že s přibývajícím pohltivostí v podobě stolů nebo návštěvníků doba dozvuku ve všech frekvenčních pásmech klesá. Obzvláště zřetelný je pokles v případě, kdy v sálu přibudou návštěvníci (v libovolné podobě). Také je zřetelná poměrně značná odchylka výsledků dvou různých aproximací sedícího publika.

V grafu je znázorněno pásmo doporučené doby dozvuku stanovené pro tento konkrétní sál jako výsledek analýzy v kapitole 5.3. Je zřejmé, že ani v jednom případě nejsou optimální podmínky splněny a úprava pohltivosti povrchů v sále je tedy nezbytná, zejména na nízkých a středních frekvencích.



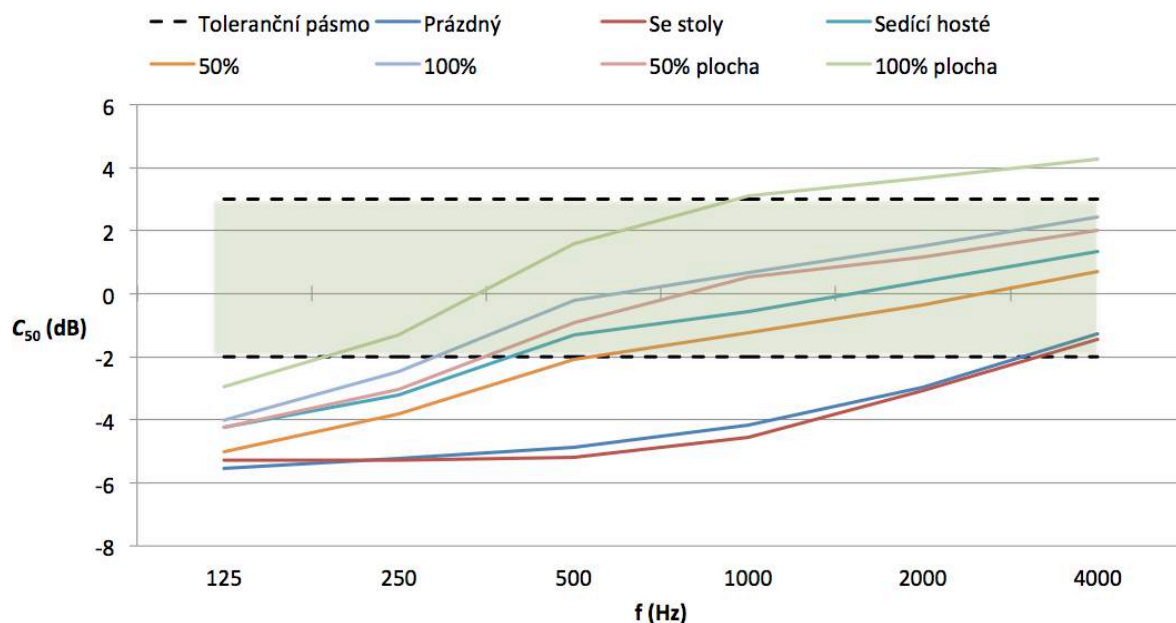
Obrázek 35: Doba dozvuku T_{30} sálu v Bechlíně

Počáteční doba dozvuku EDT

Hodnoty EDT jsou až na výjimky téměř totožné s hodnotami klasické doby dozvuku a proto je nebudeme graficky znázorňovat. Drobné rozdíly jsou k nalezení pouze v oktákových pásmech 500 a 1000 Hz. Podle definice EDT více reflektuje geometrické zvláštnosti prostoru než klasická doba dozvuku, zejména v těchto pásmech by tedy bylo vhodné prozkoumat prostorovou závislost EDT a nalézt vysvětlení anomálií.

Vyváženost počáteční a pozdní energie

Parametry T_s , C_{50} a D_{50} můžeme analyzovat společně, neboť jsou na sobě z definice přímo matematicky závislé. Jako referenční vezmeme např. míru zřetelnosti C_{50} , jejíž závislost na frekvenci a na konkrétní verzi obsazenosti sálu znázorňuje obrázek 36, spolu s doporučeným tolerančním pásmem na základě tabulky 4.

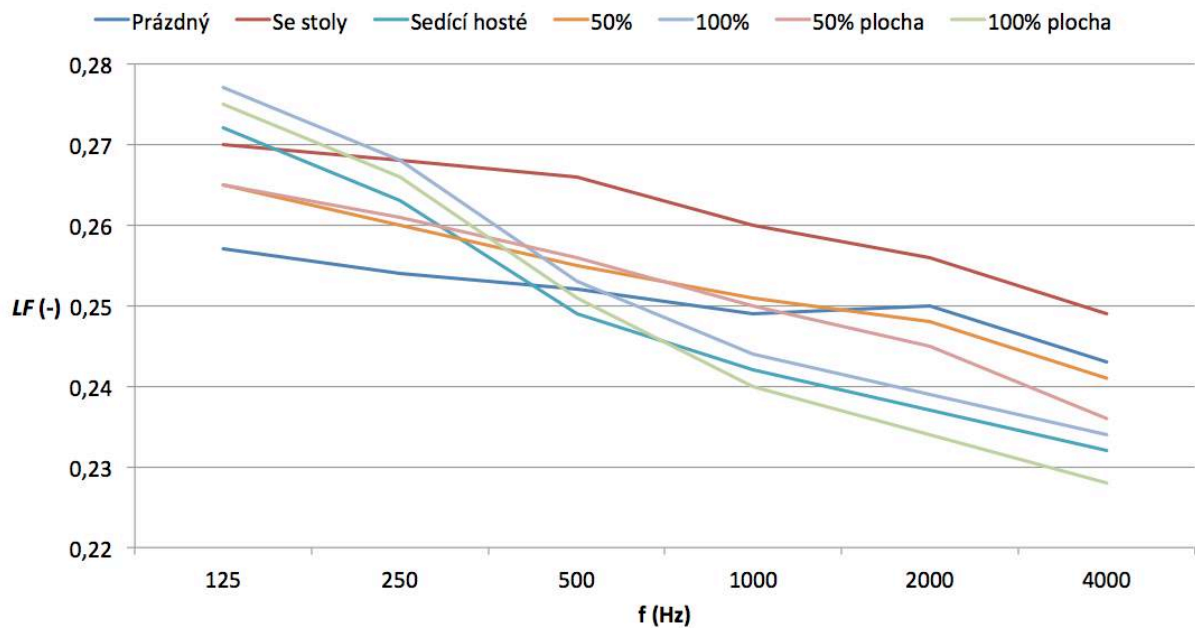
Obrázek 36: Míra zřetelnosti C_{50} sálu v Bechlině

Ze závislosti výše je zřejmé, že v případě obsazení méně než 50% kapacity sálu jsou hodnoty zřetelnosti skutečně nedostačující, subjektivní hodnocení uživatelů špatné srozumitelnosti lze tedy považovat za relevantní. V případě obsazení více než poloviny kapacity sálu již hodnoty C_{50} dosahují ve frekvenčních pásmech kritických pro srozumitelnost řeči (500 až 2000 Hz) uspokojivých hodnot. Frekvenční průběh míry zřetelnosti je však výrazně nevyvážený, což by mělo být v rámci optimalizace zohledněno. Ke zkompletování analýzy srozumitelnosti řeči je však potřeba ještě ověřit prostorové rozložení hodnot C_{50} .

Míra jasnosti C_{80} vykazuje tvarově téměř totožnou závislost, jako C_{50} . Rozdílem je, že hodnoty C_{80} jsou posunuty o cca 2 dB nahoru, z čehož lze usuzovat, že i v případě z poloviny obsazeného sálu bude přednes hudby uspokojivý, avšak stále frekvenčně nevyvážený.

Míra počáteční boční energie LF

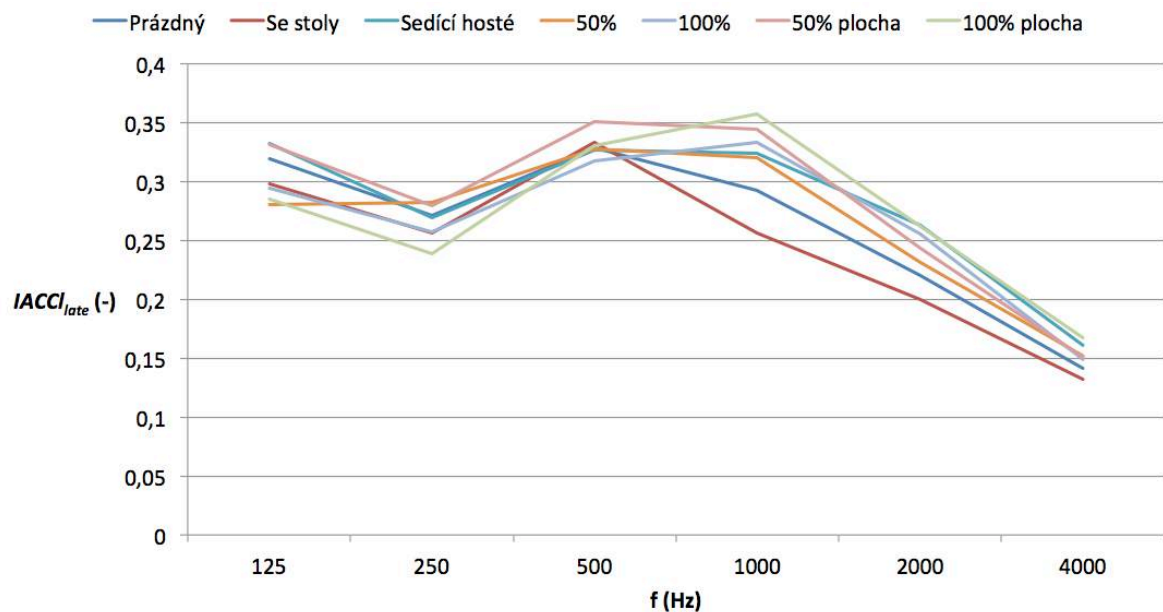
Obrázek 37 znázorňuje závislost míry počáteční boční energie LF na frekvenci a na konkrétní verzi obsazenosti sálu. Ačkoliv tento parametr není pro víceúčelový sál stěžejní, poměrně zajímavý je trend frekvenční závislosti 100% obsazeného sálu a sálu s hosty u stolů, kde dochází k viditelnému poklesu od 500 Hz do vyšších oktávových pásem. Ačkoliv se jedná pouze o řádově procenta, je zde zřejmý vliv plně obsazeného sálu na subjektivně vnímanou šířku zdroje ve vyšších frekvencích, a pro zaručení opravdu kvalitní produkce bude zřejmě potřeba použít dostatečně výkonného a správně rozmístěného ozvučovacího systému.



Obrázek 37: Míra počáteční boční energie LF sálu v Bechlině

Binaurální parametr $IACC$

Obrázek 38 znázorňuje závislost binaurálního parametru $IACC$ na frekvenci a na konkrétní verzi obsazenosti sálu. Trend závislosti je podobný ve všech případech nastavení integračních mezí, tedy pro všechny typy parametru $IACC_{early}$, $IACC_{late}$ a $IACC_{total}$, a proto je zobrazena pouze jedna z variant. Je zřejmé, že verze obsazenosti sálu nemá na prostorový vjem produkce výrazný vliv, nicméně všechny hodnoty jsou obecně nízké, zejména ve vyšších frekvenčních pásmech, a bude tedy nutné je podpořit jednak optimalizací pohltivosti povrchů a jednak vhodným ozvučovací systémem.



Obrázek 38: Binaurální parametr $IACC_{late}$ sálu v Bechlině

9.3.2 Prostorová analýza parametrů sálu

Získaná data z impulsových odezev v jednotlivých měřicích bodech byla také podrobena prostorové analýze. Konkrétně byly analyzovány impulsové odezvy pro verzi se zdrojem v poloze B. K vytvoření následujících konturových grafů byly hodnoty z jednotlivých měřicích bodů lineárně interpolovány v prostředí Matlab, aby byla dosaženo vhodného rozlišení k vykreslení kontur. Následující podkapitoly popisují prostorové závislosti jednotlivých parametrů pro jednotlivé verze obsazenosti sálu. Jsou vybrány pouze ty závislosti, které poukazují na určité zvláštnosti prostorového rozložení hodnot jednotlivých parametrů. Kompletní prostorová analýza všech parametrů ve všech oktákových pásmech může být nalezena na přiloženém médiu v elektronické podobě práce.

Počáteční doba dozvuku *EDT*

Pro parametr *EDT* nebyl nalezen výrazný rozdíl prostorové závislosti pro jednotlivá oktáková pásma, níže se tedy budeme zabývat pouze vlivem obsazenosti sálu na parametr v jednom oktákovém pásmu, konkrétně pro 1000 Hz.

Pro všechny 3 vzorové situace (prázdný sál, 50% obsazenost a hosté u stolů), je na obrázku 39 zřetelné maximum počáteční doby dozvuku kolem vstupu do sálu. Vzhledem ke korelaci ostatních parametrů k době dozvuku lze tedy předpokládat, že tato oblast bude z hlediska kvality přednesu specifická a měla by být analyzována individuálně.

Vyváženost počáteční a pozdní energie

V rámci frekvenční analýzy jsme již ukázali, že hodnoty C_{50} , C_{80} a D_{50} vykazují podobný trend napříč všemi frekvenčními spektry. Pro jejich prostorovou analýzu tedy postačí sledovat pouze jeden z nich, konkrétně míru zřetelnosti C_{50} .

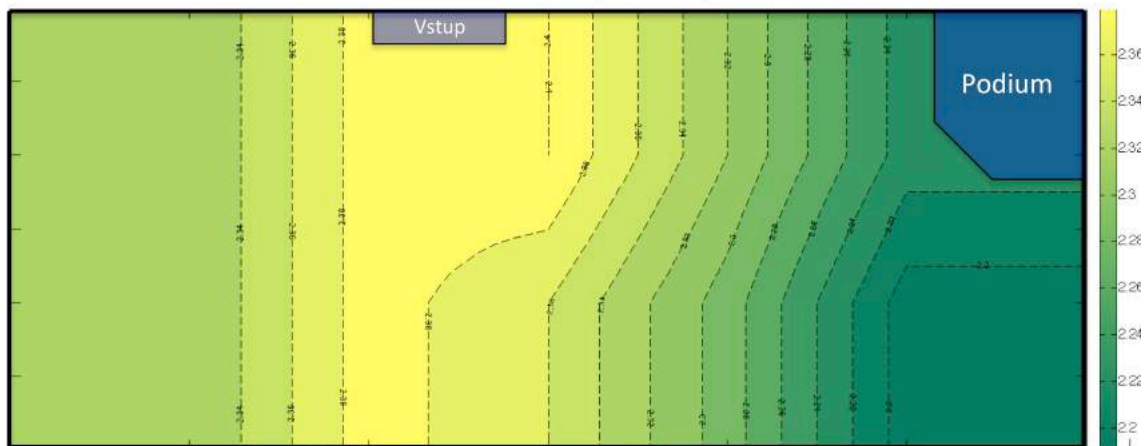
V rámci prostorové analýzy C_{50} opět nenalezneme výrazné rozdíly mezi jednotlivými oktákovými pásmy, na obrázku 40 ukážeme tedy opět pouze vliv obsazenosti sálu na hodnoty parametru. Je zřejmé, že s rostoucí obsazeností sálu se díky přibývajícím pohltivostem zřetelnost zlepšuje, ale roste negativní vliv prostoru vstupu, kvůli čemuž se např. při 100% obsazenosti dostanou hodnoty C_{50} do záporných. V případě stanovení limitu $C_{50} > 0$ dB tedy může být prostor vstupu problematickým elementem.

Hladina akustického tlaku vůči zdroji *SPL*

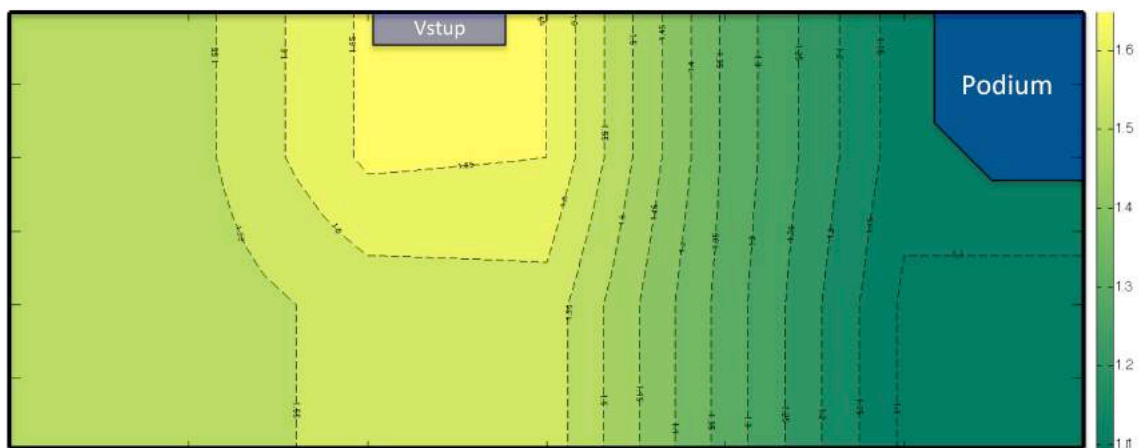
Na rozdíl od předchozích parametrů u *SPL* nemá na prostorové rozložení hodnot výrazný vliv obsazenost sálu. Přibývajícím pohltivostem posouvá hodnoty ve všech oktákových pásmech rovnoměrně dolů, tedy zrychluje pokles vnímané hlasitosti se vzdáleností od zdroje.

Zajímavější je v tomto případě ukázat prostorovou závislost parametru *SPL* pro jednu verzi obsazenosti pro různá frekvenční pásma, jako na obrázku 41. Zde je zřetelný vliv zvyšující se směrovosti zdroje s rostoucí frekvencí, kdy na vysokých frekvencích se objevuje zřetelné minimum v protějším rohu sálu vůči podiu.

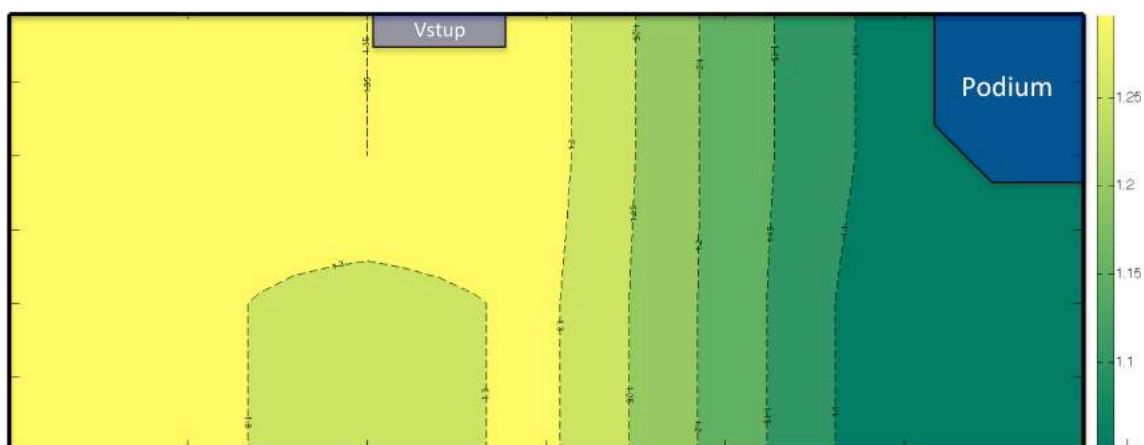
EDT 1000 Hz - prázdný sál



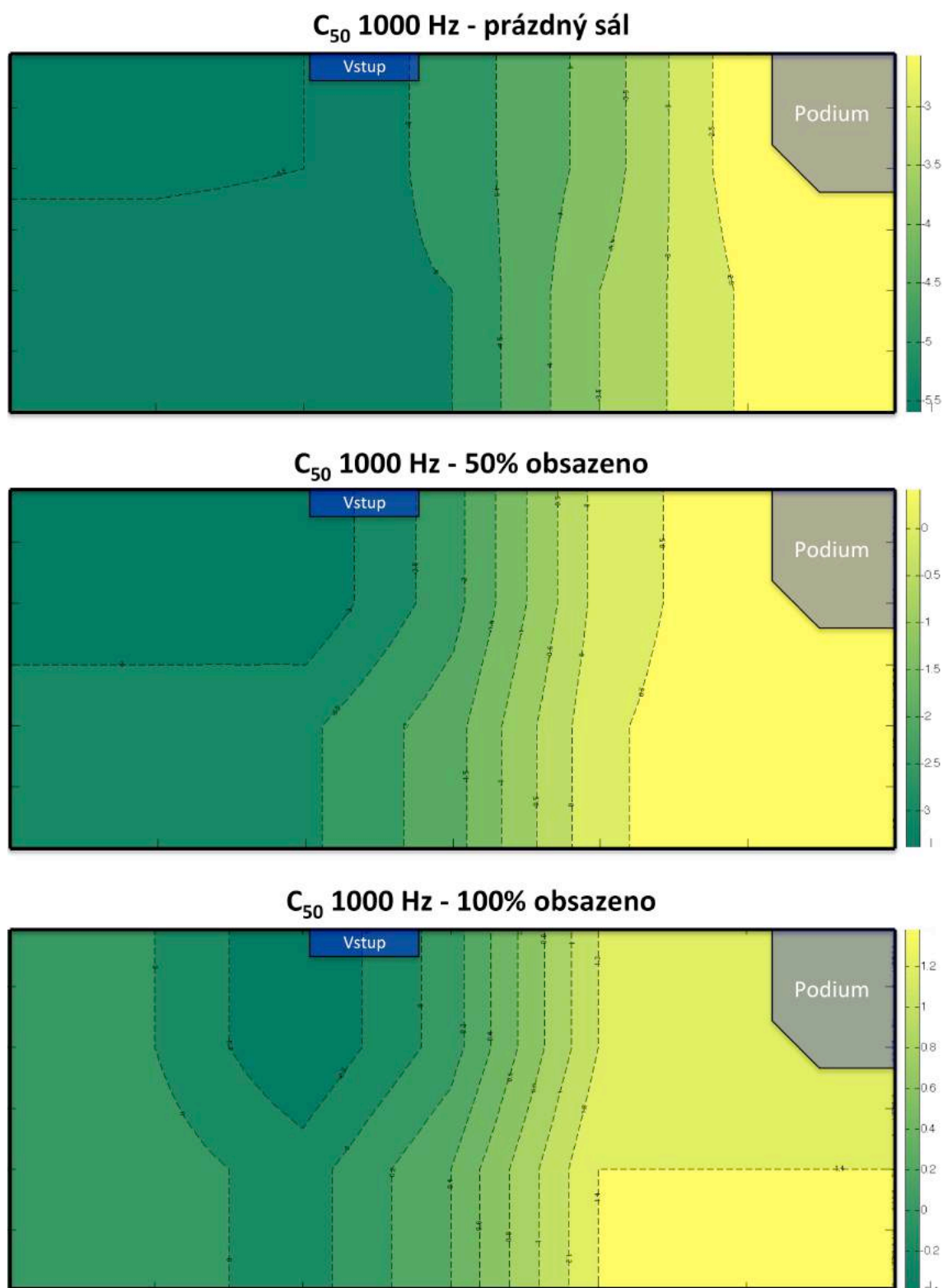
EDT 1000 Hz - 50% obsazeno



EDT 1000 Hz - sedící hosté

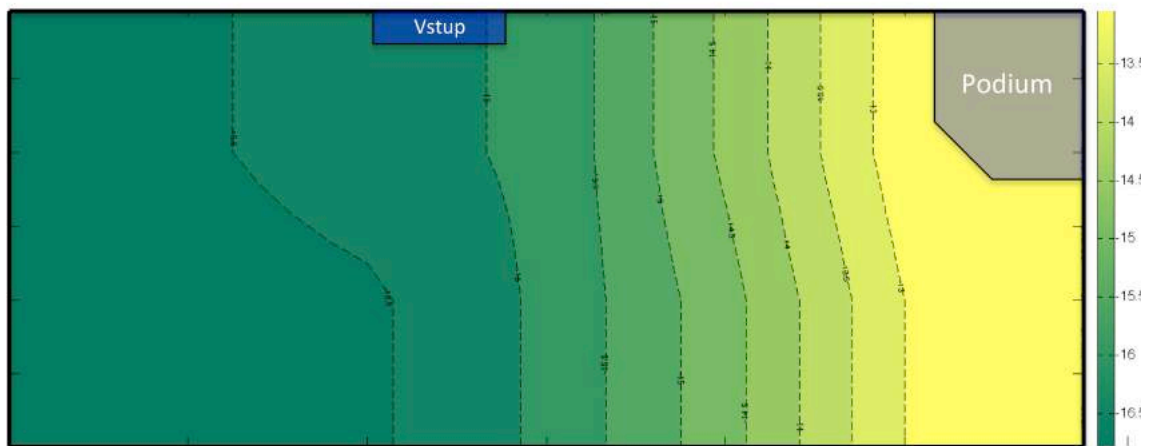


Obrázek 39: Prostorová závislost EDT sálu v Bechlině

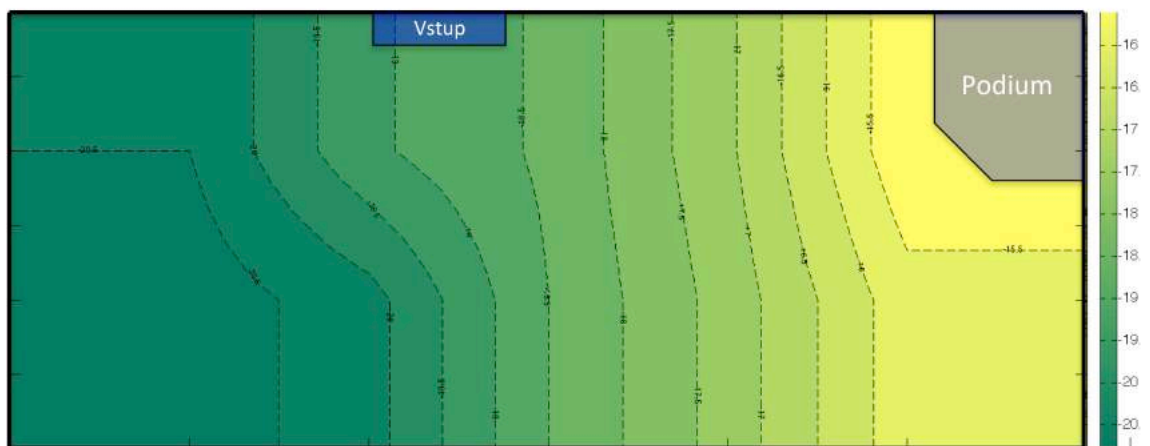


Obrázek 40: Prostorová závislost C_{50} sálu v Bechlině

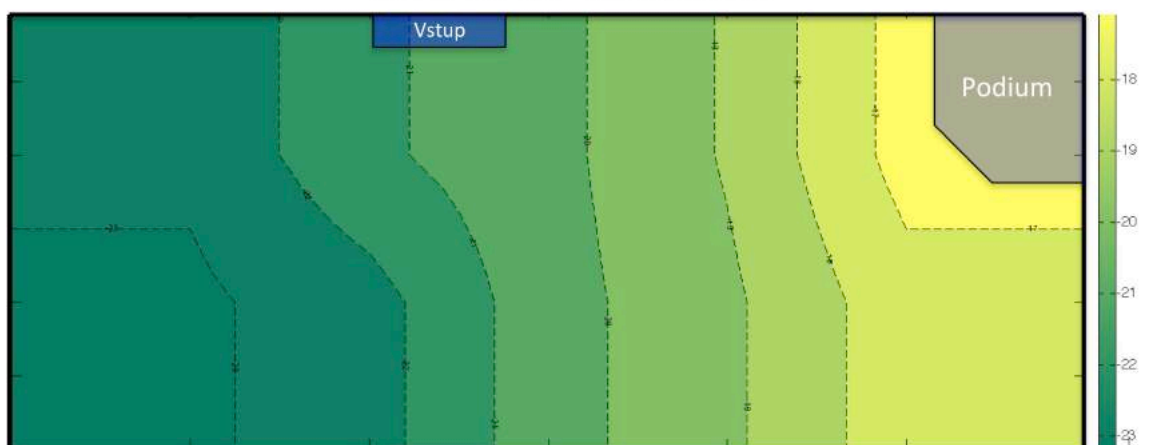
SPL 125 Hz - sedící hosté



SPL 500 Hz - sedící hosté



SPL 2000 Hz - sedící hosté



Obrázek 41: Prostorová závislost SPL sálu v Bechlině

9.4 Shrnutí závěrů simulace

Výše popsaná simulace prostorové akustiky v prostředí Odeon přinesla mnoho důležitých poznatků, kterým je potřeba věnovat dostatečnou pozornost při dalším postupu návrhu optimalizace prostorové akustiky. Následující odstavce tyto závěry stručně shrnují.

9.4.1 Vstupy akustického modelu

Přesnost celé simulace závisí na přesnosti dodaných vstupních dat. Ještě před samotným začátkem simulace je tedy vhodné věnovat maximální pozornost kvalitě vstupních dat. Vzhledem k tomu, že velké množství počítaných parametrů je energetického charakteru (tedy v jejich matematických definicích se objevují druhé a vyšší mocniny), odchylky vstupních dat v řádech jednotek procent můžou na výstupu modelu způsobit chyby až v desítkách procent.

Importovaná geometrie prostoru

Importovaná geometrie modelu by měla být dostatečně detailní na to, aby odpovídala skutečnému stavu prostoru, ale ne až tak detailní, aby zbytečně způsobovala zpomalení výpočetního procesu. U velkých ploch, jako jsou podlaha, strop a obvodové stěny, je vhodné sledovat a v modelu zohledňovat změny úrovní těchto ploch. Naopak občasná nehomogenity v řádech desítek cm (např. světla na stěnách, rámy oken a dřevěných obkladů, atd.) je vhodné zanedbat a v geometrii vůbec neuvažovat. Chyba způsobená tímto zjednodušením je téměř nepostřehnutelná.

Volba vlastností materiálů

V případě, že máme k dispozici data z reálného měření, je vhodné vlastnosti použitých materiálů (činitel zvukové pohltivosti) manuálně upravit tak, aby model dával srovnatelné výsledky s reálným měřením. Proces takové kalibrace byl představen v části 9.2.3. V případě, že data z reálného měření k dispozici nemáme, musíme se spokojit s předem definovanými parametry jednotlivých materiálů.

Je také vhodné zvážit to, zda v případě víceúčelového sálu potřebujeme uvažovat difuzivitu jednotlivých materiálů. Difuzivita není ve víceúčelovém sálu vzhledem k jeho velikosti a účelu zásadním parametrem a její zohledňování může způsobit zpomalení výpočtu a tvorbu dodatečných výpočetních chyb. [25]

Volba měřicích bodů

Měřicí body by měly být obecně voleny obdobně, jako kdybychom prostor reálně měřili. Tedy v prostoru hlediště by měl být zvolen dostatečný rastr poloh posluchačů k pokrytí možných prostorových závislostí, zdroje by měly být umístěny tam, kde se v realitě jejich výskyt nejvíce předpokládá (typicky prostor podia). V případě osové symetrie prostoru je vhodné tohoto využít, měřicí body volit jen na jedné symetrické straně a výsledky následně zrcadlit i do druhé poloviny.

Kromě základního rastru je obrovskou výhodou simulace to, že zdroje a posluchače můžeme umístit i tam, kde by to během skutečného měření nebylo reálné. Můžeme tak např. sledovat vznik třepotavých ozvěn ve vyšších polohách u stropu, abychom mohli vyhodnotit jejich negativní vliv na celkovou dobu dozvuku prostoru.

9.4.2 Frekvenční analýza objektivních akustických parametrů sálu v Bechlíně

Proběhlá frekvenční analýza objektivních akustických parametrů kulturního domu v Bechlíně poukázala na značnou frekvenční nevyrovnanost většiny zkoumaných parametrů. K zajištění dostatečného akustického komfortu bude nutné značně snížit dobu dozvuku zejména na nižších a středních frekvencích. Současně ovšem nesmí dojít k přetlumení prostoru na vyšších frekvencích, aby prostor nezačal působit nepřírozně akusticky „menší“, než ve skutečnosti je. Optimalizací doby dozvuku se předpokládá i dosažení lepších hodnot stěžejních parametrů C_{50} a C_{80} , neboť ty jsou z velké části přímo závislé na době dozvuku. Frekvenčním vyrovnáním doby dozvuku by pak mělo dojít i k vyrovnání frekvenčního průběhu těchto parametrů.

9.4.3 Prostorová analýza objektivních akustických parametrů sálu v Bechlíně

Prostorová analýza kulturního domu v Bechlíně poukázala na problematickou oblast kolem prostoru vstupu. Velký otvor do předsálí se z pohledu velkého sálu chová jako plocha se 100% zvukovou pohltivostí, což způsobuje nevyváženou distribuci zvukového pole v okolí vstupu. To má za následek lokální zhoršení zejména vyváženosti počáteční a pozdní energie – tedy parametrů zřetelnosti a jasnosti.

Zajímavým zjištěním je to, že vliv vstupu se zhoršuje s rostoucí obsazeností sálu, i když bychom předpokládali, že rovnoměrně rozložená zvuková pohltivost publika tento jev odstraní. Jako závěr tedy lze uvést, že v rámci optimalizace bude vhodné se na prostor kolem vstupu zaměřit a pokusit se jeho negativní vliv odstranit, např. přidáním větší pohltivé plochy na protější stěnu tak, aby se distribuce zvukového pole vyrovnala.

10. Optimalizace prostorové akustiky kulturního domu Bechlín

Závěry z proběhlého měření doby dozvuku a následné simulace a analýzy ostatních objektivních akustických parametrů jasně poukázaly na nedostatečný akustický komfort kulturního domu v Bechlíně pro téměř všechny předpokládané funkce jeho využití. Objektivní závěry tak potvrzují subjektivní ohlasy místních uživatelů, kteří si od dokončení nedávné rekonstrukce na kvalitu zvukového projevu sálu stěžují.

V rámci zlepšení akustické použitelnosti sálu bude nutné provést optimalizaci jeho prostorové akustiky. V rámci následujících podkapitol bude představeno několik možných přístupů k optimalizaci prostorové akustiky víceúčelového sálu. Budou zohledněny jak akustické, tak i jiné (finanční, logistické, vizuální) aspekty. Cílem této kapitoly není jen navrhnout úpravy konkrétního prostoru, měla by zejména posloužit jako obecné doporučení, jakou cestou se při návrhu prostorové akustiky podobných prostorů ubírat.

Vzhledem k předpokladu převládajícího využití prostoru pro setkávací účely byl sál všemi variantami lehce „přetlumen“ oproti doporučenému pásmu doby dozvuku definovanému v kapitole 5.3. Střední hodnota doby dozvuku byla místo 1,05 s zvolena 0,9 s. Nižší hodnoty doby dozvuku by měly zajišťovat snížení vnímané hlučnosti a zlepšení srozumitelnosti konverzace. Oproti doporučenému pásmu však hodnoty doby dozvuku neklesají o více než 0,2 s, na kvalitu případné hudební produkce tedy toto přetlumení nebude mít zásadní negativní dopad.

10.1 Postup optimalizace

Následující podkapitola detailně popisuje postup, který byl pro jednotlivé varianty optimalizace prostorové akustiky použit. Vzhledem k tomu, že většina bodů postupu se u všech variant principiálně shoduje, budou představeny hromadně.

10.1.1 Empirické výpočty – volba referenční varianty sálu

V úvodní fázi návrhu akustických úprav by bylo velice neefektivní aplikovat úpravy rovnou na vytvořený 3D model sálu. Simulace je zejména ve fázi vyplňování a nastavování vstupních dat velmi časově náročná a tak je vhodné před jejím zahájením mít jistotu, že námi navrhovaná optimalizace vůbec dokáže zajistit požadované výsledky.

V případě použití špatných materiálů nebo jejich celkových aktivních ploch by se následné úpravy ve 3D modelu prováděly velmi složitě a celá simulace by přišla vniveč. Proto je vhodné jako první krok návrhu zvolit empirický výpočet doby dozvuku podle Eyringovy rovnice.

Výpočet podle Eyringovy rovnice platí podle jeho definice pouze pro difúzní pole [1]. U sálu s objemem nad 1000 m³ a s ne přesně definovaným zdrojem zvuku sice nelze difuzivitu potvrdit s jistotou, nicméně pro prvotní odhad, který bude následně ověřen simulací, je přesnost metody i v tomto případě dostačující.

Pro správný přístup optimalizace je nejprve vhodné zvolit referenční verzi sálu, na kterou budou následně akustické úpravy aplikovány. Tato varianta by měla dávat v případě empirického výpočtu co nejpodobnější výsledky, jako výsledky předchozí simulace. Pro všechny

varianty využití sálu (prázdný, se stoly, 50% obsazený, atd.) byla vytvořena speciální tabulka v prostředí MS Excel počítající celkovou zvukovou pohltivost a dobu dozvuku prostoru na základě znalosti objemu sálu, zvukových pohltivostí a ploch jednotlivých materiálů v sálu. Hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro jednotlivé materiály byly voleny totožné, jako v případě simulace, která proběhla v rámci předchozí kapitoly. Následující tabulka znázorňuje porovnání vypočtených dob dozvuku oběma způsoby pro jednotlivé varianty:

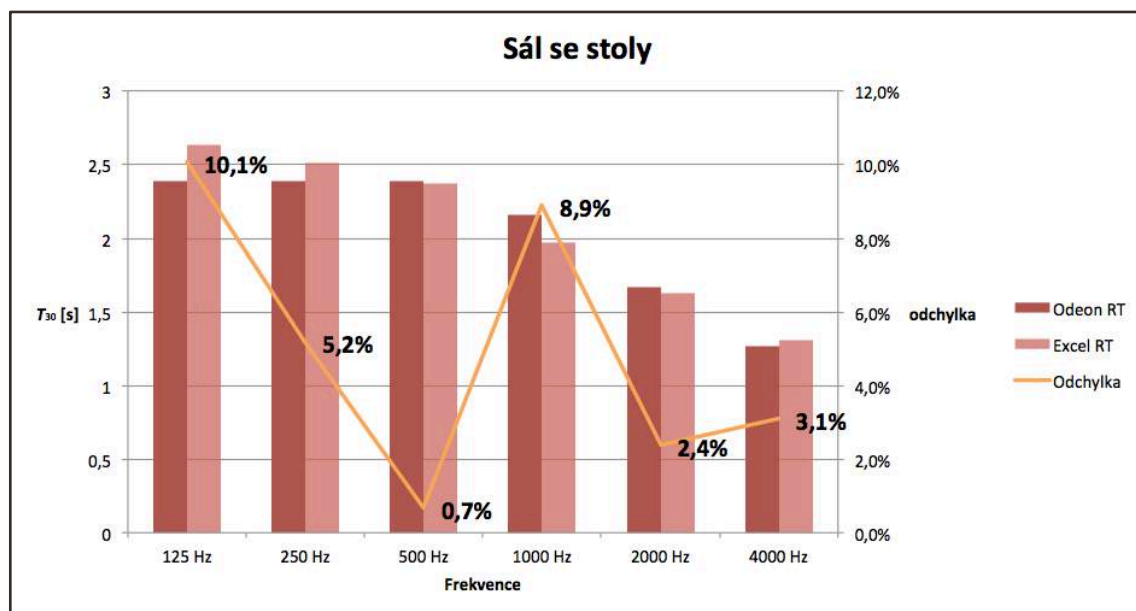
Tabulka 14: Odchylky empirických výpočtů doby dozvuku

Prázdný sál						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	2,79	2,68	2,55	2,32	1,8	1,35
Excel T_{30}	3,07	2,78	2,50	2,09	1,73	1,37
Odchylka	10,2%	3,8%	1,9%	9,8%	3,9%	1,8%
					Prům. odch.	5,2 %
Sál se stoly						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	2,39	2,39	2,39	2,16	1,67	1,27
Excel T_{30}	2,63	2,51	2,37	1,97	1,63	1,31
Odchylka	10,1%	5,2%	0,7%	8,9%	2,4%	3,1%
					Prům. odch.	5,0 %
Sedící hosté						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	1,98	1,7	1,43	1,37	1,13	0,94
Excel T_{30}	2,24	1,96	1,54	1,25	1,11	0,97
Odchylka	13,3%	15,2%	8,0%	8,8%	1,9%	3,5%
					Prům. odch.	8,5%
50% obsazeno						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	2,23	1,91	1,61	1,54	1,29	1,05
Excel T_{30}	2,61	2,18	1,67	1,36	1,20	1,04
Odchylka	17,1%	14,1%	3,5%	11,8%	6,9%	0,8%
					Prům. odch.	9,0%
100% obsazeno						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	1,98	1,64	1,39	1,33	1,08	0,88
Excel T_{30}	2,26	1,78	1,23	0,99	0,91	0,83
Odchylka	14,3%	8,7%	11,3%	25,7%	16,2%	5,9%
					Prům. odch.	13,7%
50% obsazeno plocha						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	2,05	1,75	1,46	1,36	1,17	0,97
Excel T_{30}	2,58	2,14	1,62	1,32	1,17	1,02
Odchylka	25,8%	22,3%	11,1%	2,9%	0,1%	5,2%
					Prům. odch.	11,3%

100% obsazeno plocha						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Odeon T_{30}	1,68	1,43	1,31	1,26	0,99	0,79
Excel T_{30}	2,32	1,84	1,30	1,04	0,95	0,86
Odchylka	38,1%	28,9%	1,1%	17,4%	4,2%	8,9%
					Prům. odch.	16,4%

Z tabulky je zřejmé, že nejmenší průměrnou odchylku obou typů výpočtů dává varianta sálu se stoly. Právě tuto variantu je tedy vhodné použít jako referenční, na kterou budou aplikovány jednotlivé varianty akustických úprav.

Nutno doplnit, že varianta sálu se stoly nezahrnuje zvukovou pohltivost přítomných osob, nicméně norma [22] udává posuzovat víceúčelový sál jako obsazený. Zvukovou pohltivost osob tedy bude nutné do návrhu optimalizace přičíst tak, aby výpočty dávaly relevantní výsledky. Pro úplné doplnění ukažme ještě frekvenční průběh odchylky obou metod výpočtů pro zvolenou referenční variantu:



Obrázek 42: Odchylka empirického výpočtu a simulace - referenční varianta sálu se stoly

10.1.2 Empirické výpočty – návrh optimalizace

Na výše zvolené referenční variantě následně proběhl prvotní návrh optimalizace pro jednotlivé varianty akustických úprav. V rámci empirických výpočtů je důležité kontrolovat celkovou zadanou plochu všech materiálů, která by měla být po celou dobu konstantní. Je nutné zohledňovat, že některé nově přidané materiály nahrazují část plochy předchozího materiálu, příp. ho částečně zakrývají.

Konkrétní výpočty jsou součástí následujících podkapitol popisujících jednotlivé varianty úprav.

10.1.3 Úprava 3D modelu na základě empirických výpočtů

Empirické výpočty optimalizace popsané v předchozím kroku poskytly celkové plochy jednotlivých akustických materiálů potřebné k dosažení požadovaných hodnot dob dozvuku. V rámci následné úpravy 3D modelu bylo cílem tyto celkové plochy rozmístit v prostoru co

nejefektivněji. Finální rozmístění akustických prvků popisují níže jednotlivé varianty optimalizace.

10.1.4 Import upraveného modelu do prostředí ODEON + simulace

Takto upravený 3D model byl poté opět importován do prostředí ODEON. Novým materiálům byly zadefinovány jejich akustické vlastnosti a proběhla opětovná simulace, tentokrát jak v režimu Global Estimate, tak Grid, aby byla získána i prostorová závislost všech zkoumaných parametrů. Na závěr byly tyto výstupy interpretovány a celá varianta optimalizace prostorové akustiky zhodnocena.

10.2 Varianta 1 – materiály na minerální bázi

Varianta 1 počítá s profesionálními akustickými materiály na minerální bázi, s přesně definovanými vlastnostmi a nejvyšší předpokládanou efektivitou, ovšem za cenu nejvyšších nákladů realizace.

10.2.1 Konkrétní použité materiály

Na úpravu stropu byla použita kombinace dvou typů minerálních podhledových panelů výrobce Ecophon, konkrétně Ecophon Gedina Alpha s nízkofrekvenční vložkou ExtraBass a Ecophon Gedina Gamma v poměru 1:1. Oba typy desek výrobce nabízí v rozměru 600 x 600 mm a s totožnou povrchovou úpravou, což umožňuje vytvořit pravidelný a jednotný rastr podhledu.

Na stěny pak byly použity panely stejného výrobce typu AcustoWall A v rozměru 1200 x 2700 mm a tloušťky 40 mm, které je možné upevnit jak na stávající SDK konstrukci, tak i do stávající konstrukce vsadit pro zachování jednotné plochy.

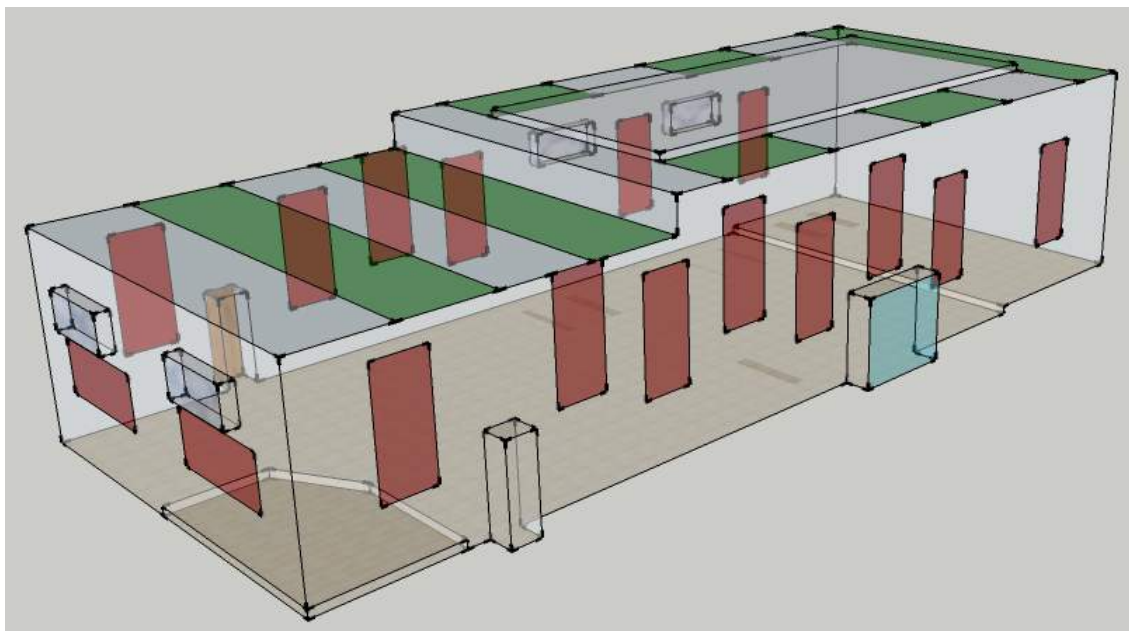
Uvažované činitele akustické pohltivosti těchto prvků znázorňuje následující tabulka:

Tabulka 15: Varianta 1 - zvuková pohltivost použitých materiálů

Prvek	$\alpha_{125 \text{ Hz}}$	$\alpha_{250 \text{ Hz}}$	$\alpha_{500 \text{ Hz}}$	$\alpha_{1000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{2000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{4000 \text{ Hz}}$	S (m ²)
Ecophon Gedina Alpha + ExtraBass	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	40
Ecophon Gedina Gamma	0,5	0,4	0,3	0,45	0,25	0,3	40
Ecophon AcustoWall A 40 mm	0,25	0,75	1	1	1	1	50

10.2.2 Rozmístění akustických materiálů v prostoru

Rozmístění materiálů v prostoru ukazuje následující obrázek 3D modelu:



Obrázek 43: Varianta 1 - rozmístění prvků v prostoru

Pro strop byl zvolen rastr pravidelných pasů, ve kterých se střídá původní SDK podhled a nově uvažovaný kombinovaný minerální podhled. Část stropu s dobovými kazetami byla z úprav vynechána. V případě, kdy by byl minerální podhled koncentrován pouze na jedno místo (např. nad podiem), došlo by k nerovnoměrné distribuci zvukového pole uvnitř sálu, což by mělo za důsledek výrazné prostorové výkyvy jednotlivých parametrů.

V rámci simulace byla rovněž uvažována varianta, ve které byl minerální podhled instalován ve středu jednotlivých částí stropu, s následným obvodovým pasem stávajícího SDK. Simulace ovšem dala téměř totožné výsledky všech parametrů a tak se dále budeme zabývat pouze variantou s pravidelnými pasy.

Stěnové panely AcustoWall byly umístěny rovnoměrně po celé ploše obou delších stran. Cílem návrhu je, aby panely pokryly co možná nejvíce z vertikálního rozměru stěn. V případě jejich koncentrace např. směrem k podlaze by ve výšce u stropu vznikaly nežádoucí třepotavé ozvěny, které by dobu dozvuku zvyšovaly.

Panely byly rovněž umístěny v režimu „cik-cak“, tedy že přímo proti každému pohltivému panelu je na protější stěně odrazivá sádkokartonová část. Toto rozmístění by mělo mít pozitivní vliv na celkovou distribuci zvukového pole.

Dva horizontálně umístěné panely na čelní stěně u podia pak mají funkci eliminovat flutter echoes v delším směru sálu.

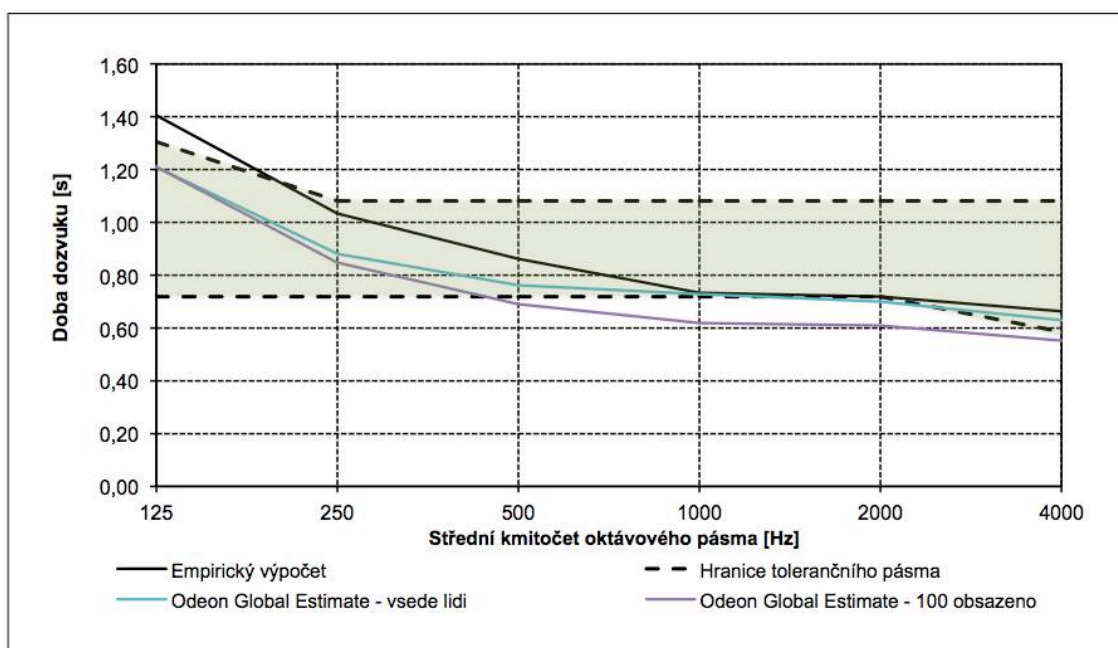
Při návrhu je ovšem nutné uvažovat i další, než akustické aspekty. Stěnové panely byly proto umístěny v takové minimální výšce, kde už nehrozí mechanické poškození či znečištění přítomnými osobami.

10.2.3 Výsledky simulace – objektivní akustické parametry

Účinnost optimalizace byla ověřována pro 2 verze využití prostoru – pro sál se stoly a sedícími hosty, simulující funkci jako setkávací a restaurační prostor, a pro 100% obsazený sál publikem v případě hudební či mluvené produkce.

Doba dozvuku

Frekvenční závislost empiricky vypočtené a simulované doby dozvuku znázorňuje následující obrázek a tabulka:



Obrázek 44: Varianta 1 - výsledná doba dozvuku

Tabulka 16: Varianta 1 - výsledná doba dozvuku

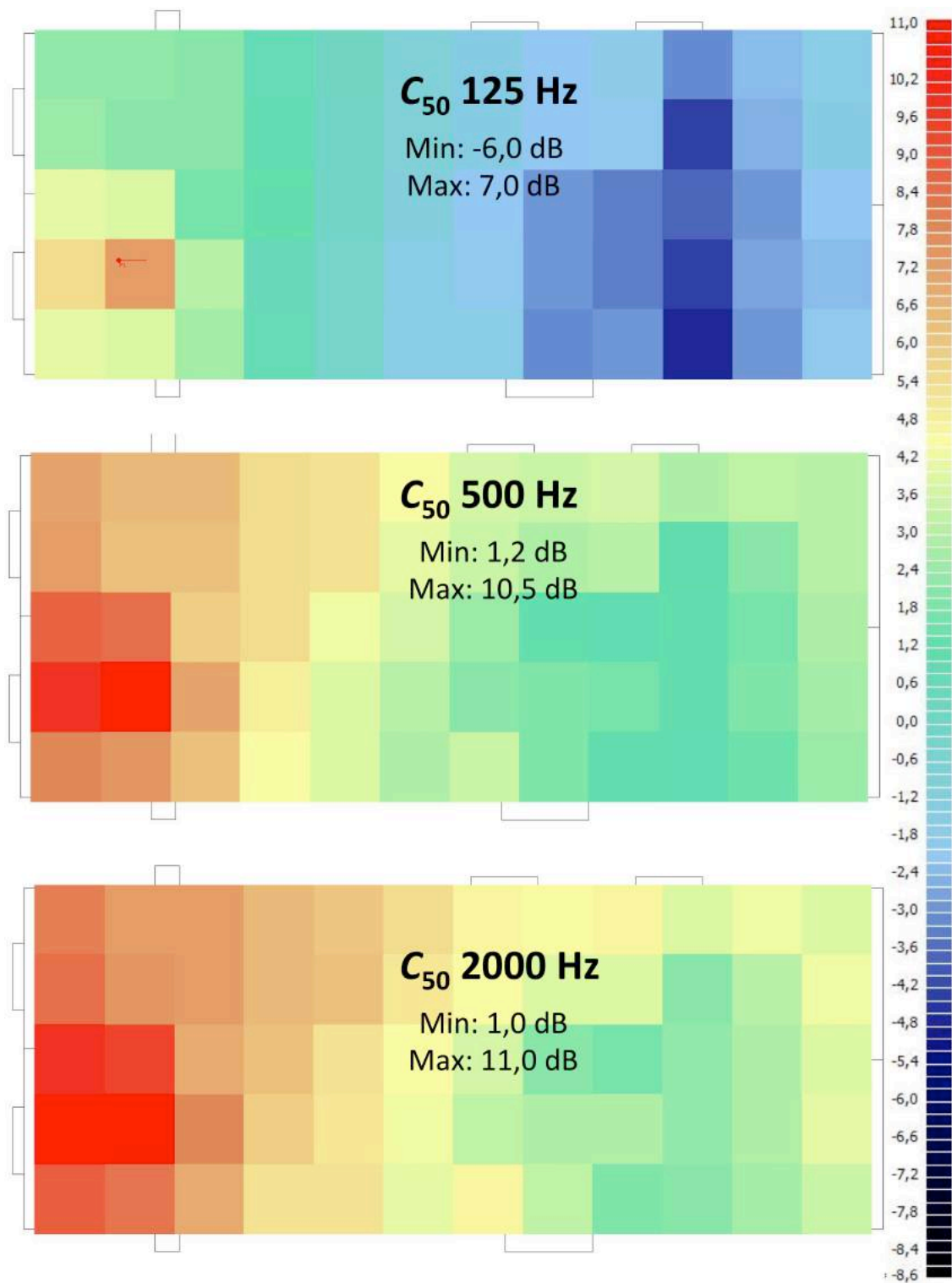
Varianta 1	Doba dozvuku (s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Empirický (50 osob)	1,40	1,03	0,86	0,73	0,72	0,66
Odeon – sedící hosté	1,21	0,88	0,76	0,73	0,70	0,63
Odeon – 100% obsazeno	1,21	0,85	0,69	0,62	0,61	0,55

Z průběhu výše je zřejmá odchylka empiricky vypočtené doby dozvuku od výsledků simulace. To je předvídatelný fakt vzhledem k tomu, že v tak velkém prostoru není 100% zaručena difuzivita zvukového pole, se kterou empirické výpočty počítají. Potvrzuje se tedy pravidlo, že pro relevantní výsledky je počítačová simulace nezbytná.

Pro variantu se sedícími hosty u stolů leží průběh doby dozvuku uvnitř zvoleného tolerančního pásma, dají se tedy předpokládat optimální akustické podmínky. V případě obsazení 100% kapacity sálu během hudební produkce dojde vlivem pohltivosti přítomných osob k mírnému přetlumení oproti optimu. Ve většině případů ovšem nelze předpokládat naplnění celé kapacity sálu a tak i podmínky pro hudební produkci by měly být dobré.

Míra zřetelnosti C_{50}

Následující obrázek znázorňuje prostorovou závislost míry zřetelnosti C_{50} :



Obrázek 45: Varianta 1 - prostorová závislost C_{50}

Ve všech frekvenčních pásmech je znatelný negativní vliv prostoru vstupu na míru zřetelnosti těsně za ním. Zvuková vlna, která by se jinak přímo odrazila od stěny a s dostatečnou energií dorazila do oblasti ještě před ostatními odrazy, je vstupem pohlcena. Nicméně vidíme, že pro frekvence nad 500 Hz jsou i hodnoty minima C_{50} nad hranicí 0 dB, dá se tedy předpokládat, že srozumitelnost bude i v této kritické oblasti dostatečná.

Míra jasnosti C_{80}

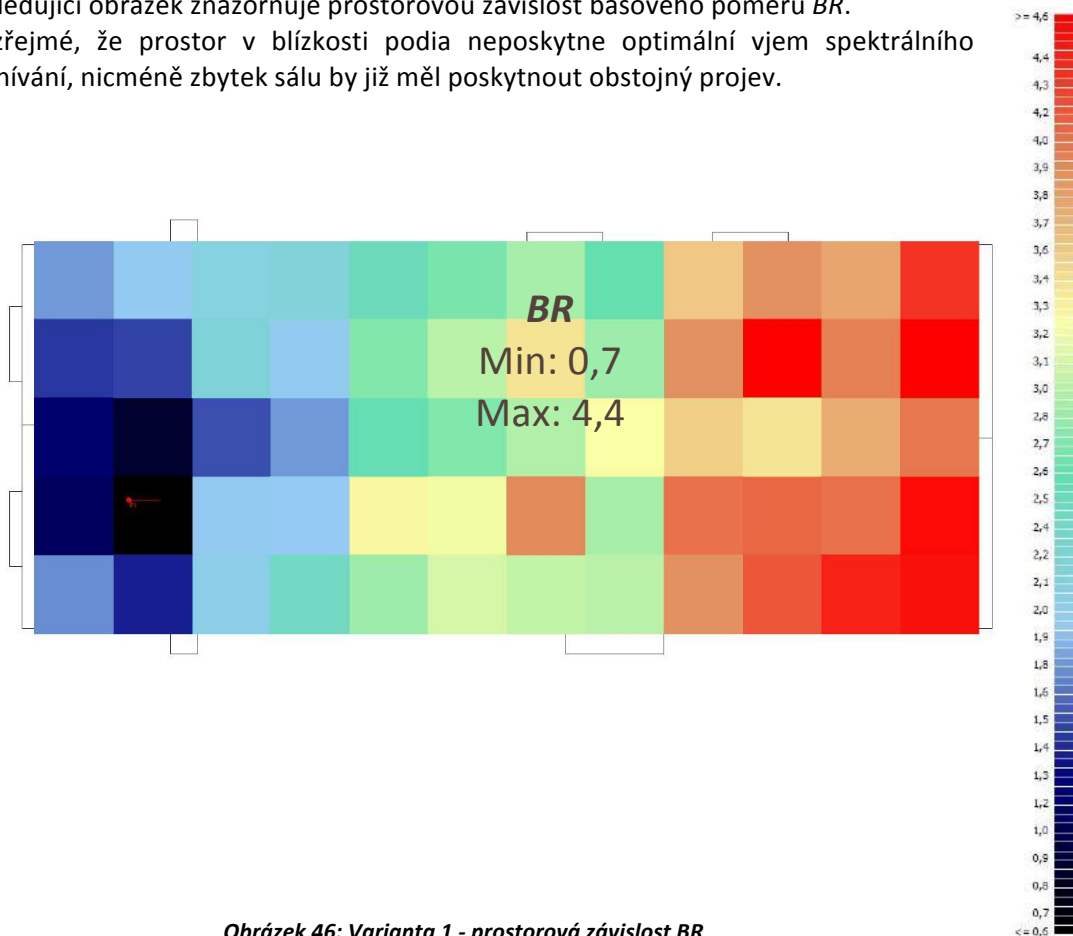
Obrázek 47 na následující straně znázorňuje prostorovou závislost míry jasnosti C_{80} .

I zde můžeme pozorovat podobný jev kolem prostoru vstupu, jako tomu je u parametru C_{50} . Nicméně v tomto případě jsou už hodnoty i v oblastech svého minima uspokojivé. U míry jasnosti vzniká ovšem opačný problém – maxima kolem 15 dB jasně poukazují na to, že prostor nebude vhodný pro přednes hudby orchestrálního nebo podobného typu, kterému nebude schopen poskytnout dostatečné doznívání. Nicméně pro produkce jiných žánrů hudby – folk, rock, pop, kdy je obvykle velkým problémem přebuzení prostoru, bude mít toto přetlumení prostoru pozitivní vliv na vnímanou hlasitost produkce, nehledě na to, že během většiny podobných produkcí je potřebné doznívání kompenzováno analogovými efekty (tzv. *reverb* příp. *hall*).

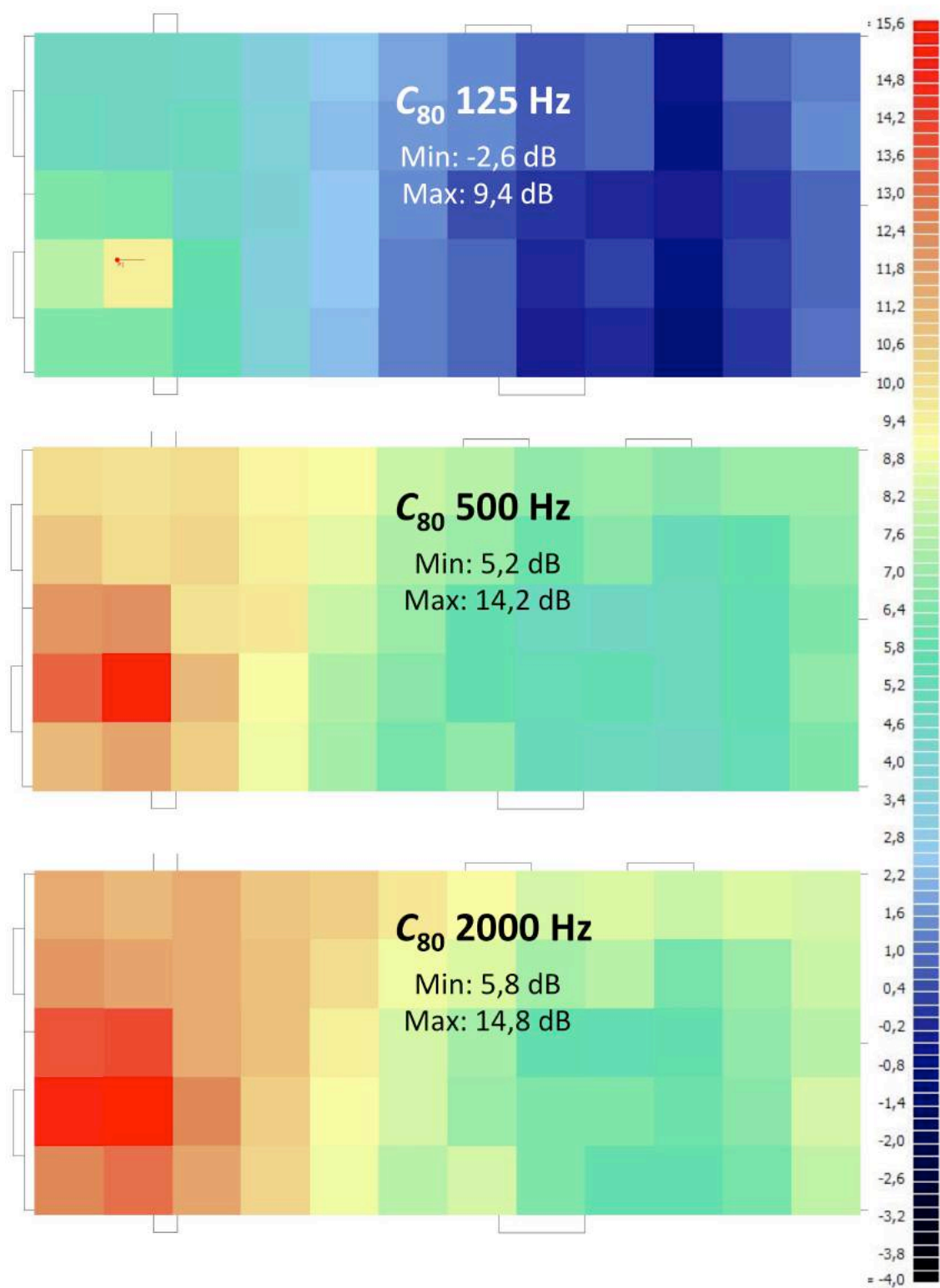
Basový poměr BR

Následující obrázek znázorňuje prostorovou závislost basového poměru BR .

Je zřejmé, že prostor v blízkosti podia neposkytne optimální vjem spektrálního doznívání, nicméně zbytek sálu by již měl poskytnout obstojný projev.



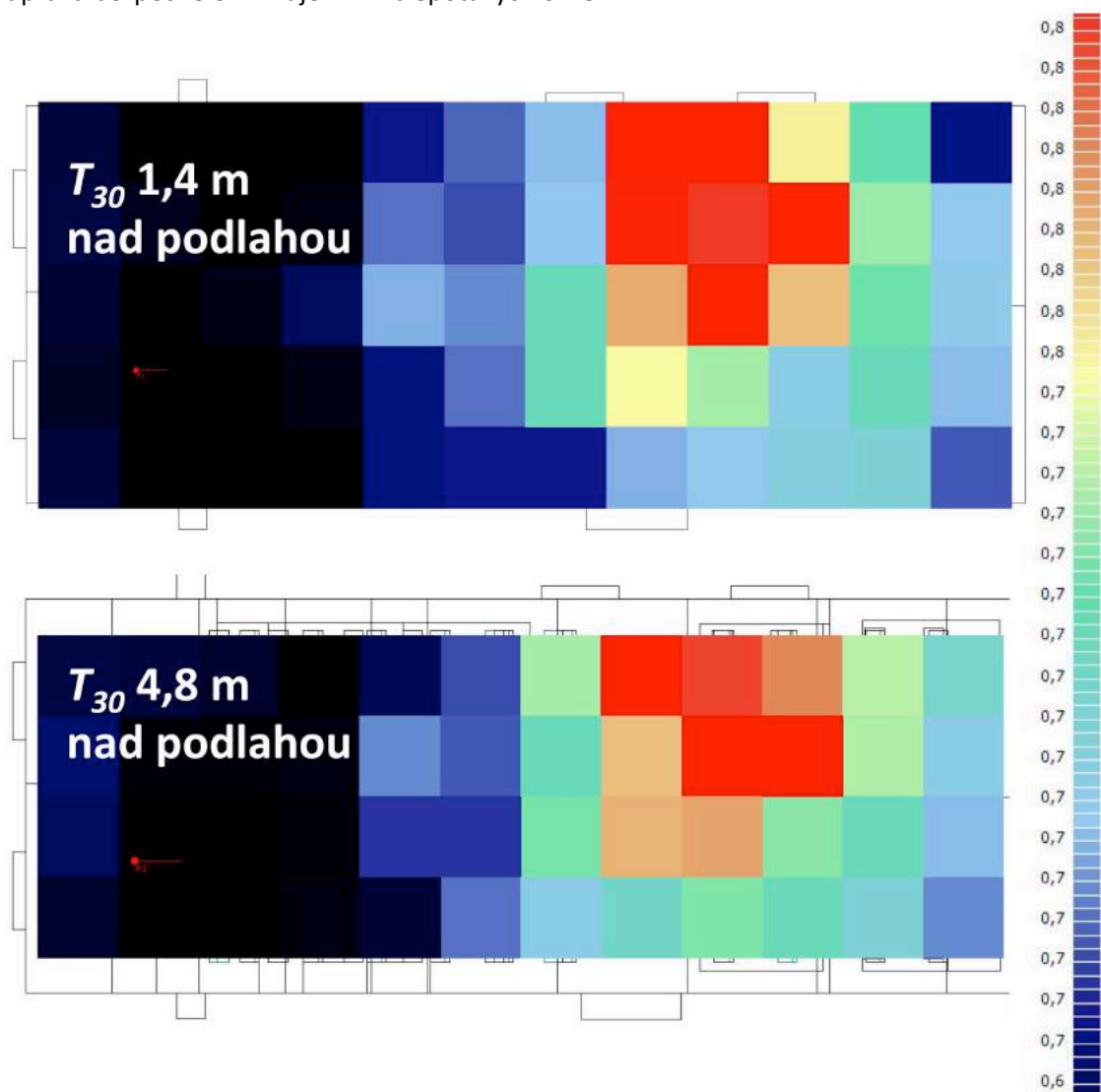
Obrázek 46: Varianta 1 - prostorová závislost BR



Obrázek 47: Varianta 1 - prostorová závislost C₈₀

Eliminace třepotavých ozvěň

Následující obrázek znázorňuje porovnání prostorového rozložení doby dozvuku ve výšce 1,4 m a 4,8 m nad podlahou. V rovině u stropu nejsou zřetelné žádné extrémny, které by se lišily od prostorového průběhu doby dozvuku u podlahy. Lze tedy konstatovat, že takto navržená úprava bezpečně eliminuje vznik třepotavých ozvěň.



Obrázek 48: Varianta 1 - eliminace třepotavých ozvěň

10.2.4 Cenový odhad optimalizace

Následující tabulka představuje projektantský odhad cen pro realizaci výše představené varianty optimalizace prostorové akustiky pro KD v Bechlíně.

Tabulka 17: Varianta 1 - projektantský odhad ceny optimalizace (ceny materiálu vypočteny na základě údajů v [27] se započtením všech potřebných prvků a přírážky za montáž)

Prvek	Jednotka	Cena za jednotku (bez DPH, včetně kotvení)	Počet jednotek	Cena celkem
Ecophon Gedina Alpha + ExtraBass	m ²	1.600,- Kč	40	64.000,- Kč
Ecophon Gedina Gamma	m ²	1.300,- Kč	40	52.000,- Kč
Ecophon AcustoWall A	m ²	2.500,- Kč	50	125.000,- Kč
Doprava	-	5.000,- Kč	1	5.000,- Kč
Bourací a stavební práce	m ²	400,- Kč	120	48.000,- Kč
Cena CELKEM (bez DPH)				294.000,- Kč

10.2.5 Ne-akustické aspekty dané varianty optimalizace

Z hlediska prostorové akustiky řešeného víceúčelového sálu představuje varianta 1 optimální řešení. Nicméně objevují se zde i další, ne-akustické aspekty, které je potřeba v rámci návrhu zvážit.

Složitost úprav

Takto navržené úpravy budou mít za následek poměrně zásadní stavební zásahy do interiéru prostoru. Bude potřeba odstranit zhruba polovinu sádkartonového podhledu, který bude nahrazen minerálními panely. Stejně tak bude nutné odstranit část sádkartonových předstěn v případě, že bude zvolena varianta vsazení stěnových panelů do stávajících konstrukcí.

Vliv na architekturu interiéru

Z architektonického hlediska se v rámci varianty 1 nebude jednat o nijak zásadní zásahy do stávající architektury prostoru. Hladký sádkartonový podhled bude z poloviny nahrazen nenápadným rastrem a dobový kazetový strop zůstane nedotčen. Stěny zůstanou v případě vsazení minerálních panelů do stávajících předstěn taktéž vizuálně prakticky nedotčeny.

Mechanická odolnost

U minerálního podhledu nepředpokládáme žádné zásadní požadavky na jeho mechanickou odolnost. Vzhledem k výšce jeho zavěšení a předpokládanému využití prostoru bez sportovního vyžití prakticky nehrozí žádná možnost jeho poškození.

Stěnové minerální panely jsou v tomto aspektu podstatně náchylnější. V navrhované variantě se jejich spodní hrana pohybuje kolem 1,8 m nad podlahou, což je oblast, kde stále hrozí poškození či znečištění nezodpovědnými návštěvníky. Bude tedy nutné počítat s občasnými dodatečnými náklady na čištění, příp. výměnu poškozených panelů.

10.3 Varianta 2 – materiály na bázi perforovaného sádrokartonu

Varianta 2 počítá s akustickými materiály na bázi perforovaného sádrokartonu. Tyto materiály lze pořídit jako profesionální akustické prvky, s přesně definovanými vlastnostmi. Ovšem vzhledem k tomu, že tyto vlastnosti i přesná podoba SDK panelů jsou veřejně dostupné informace (na rozdíl od složení minerálních panelů), je teoreticky možné část nákladů ušetřit svépomocí využitím služeb šikovného místního stavebníka.

10.3.1 Konkrétní použité materiály

Na úpravu stropu byly použity perforované sádrokartonové desky výrobce Rigips, konkrétně typ Rigiton 8-15/50 s 50 mm vrstvou minerální izolace.

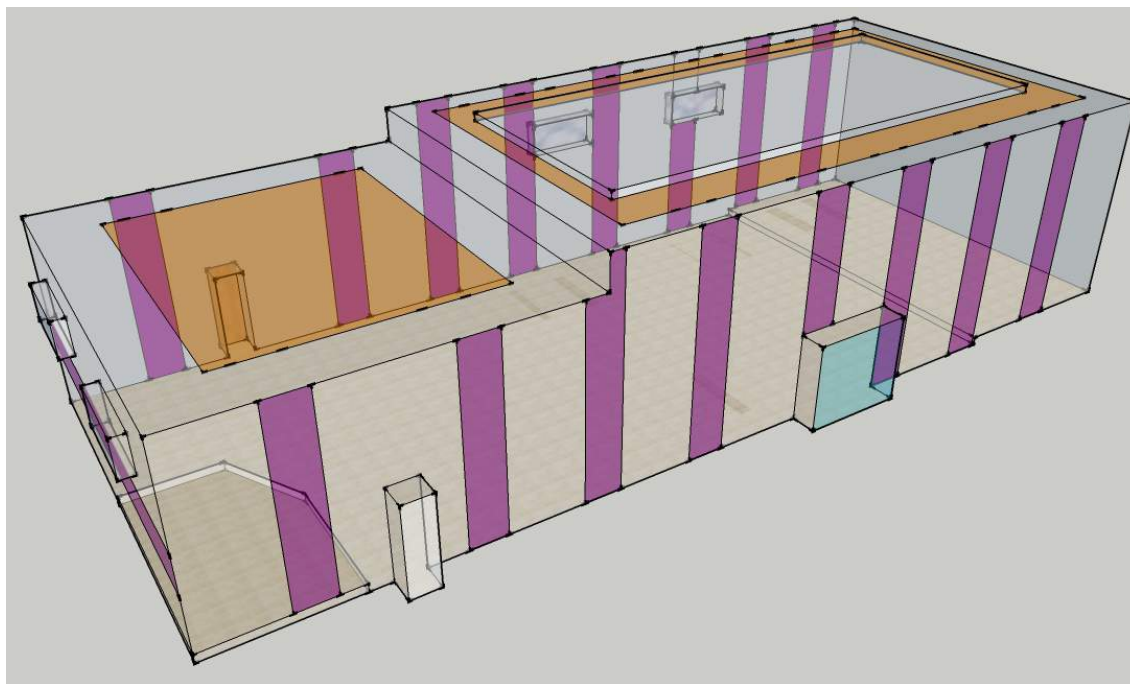
Na stěny pak byly použity desky stejného výrobce typu Gyptone BIG Line 5 se vzduchovou mezerou 200 mm bez minerální izolace, kterými budou částečně nahrazeny současné SDK předstěny.

Tabulka 18: Varianta 2 - zvuková pohltivost použitých materiálů

Prvek	$\alpha_{125 \text{ Hz}}$	$\alpha_{250 \text{ Hz}}$	$\alpha_{500 \text{ Hz}}$	$\alpha_{1000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{2000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{4000 \text{ Hz}}$	S (m ²)
Strop – Rigiton 8-15/50 s 50 mm MV	0,4	0,7	0,75	0,7	0,6	0,45	83
Stěny – Gyptone BIG Line 5, 200 mm o.d.s. bez MV	0,5	0,6	0,65	0,6	0,6	0,6	80

10.3.2 Rozmístění akustických materiálů v prostoru

Rozmístění materiálů v prostoru ukazuje následující obrázek 3D modelu:



Obrázek 49: Varianta 2 - rozmístění prvků v prostoru

V tomto případě byla zvolena varianta, kdy je perforovaný SDK podhled koncentrován vždy ke středu jednotlivých částí stropu. V porovnání s pravidelnými pásy dává simulace téměř totožné

výsledky, pravděpodobně díky poměrně velké světlé výšce prostoru, kdy se pro měřicí body strop jeví jako jednolitá plocha s konstantní pohltivostí. Toto uspořádání má pozitivní vliv na vizuální stránku interiéru, kdy strop nebude narušen perforací na příliš mnoha místech. Stejně jako v předchozí variantě je zachován dobový kazetový strop.

Stěnová pohltivost v tomto případě zaujímá celý vertikální rozměr od podlahy až k podhledu. Vzhledem k tomu, že perforované sádkartonové desky bude v rámci této varianty již nutné začlenit do stávajících předstěn, je toto nejvhodnější varianta, která navíc umožňuje využití stávajících kotvících konstrukcí pro SDK desky. Pasy s perforací jsou opět pravidelně prostřídány na obou bočních stěnách tak, aby nikdy nebyly přímo proti sobě. Na čelní stěně za podiem byl vytvořen jeden horizontální pas s perforací pro eliminaci třepotavých ozvěn.

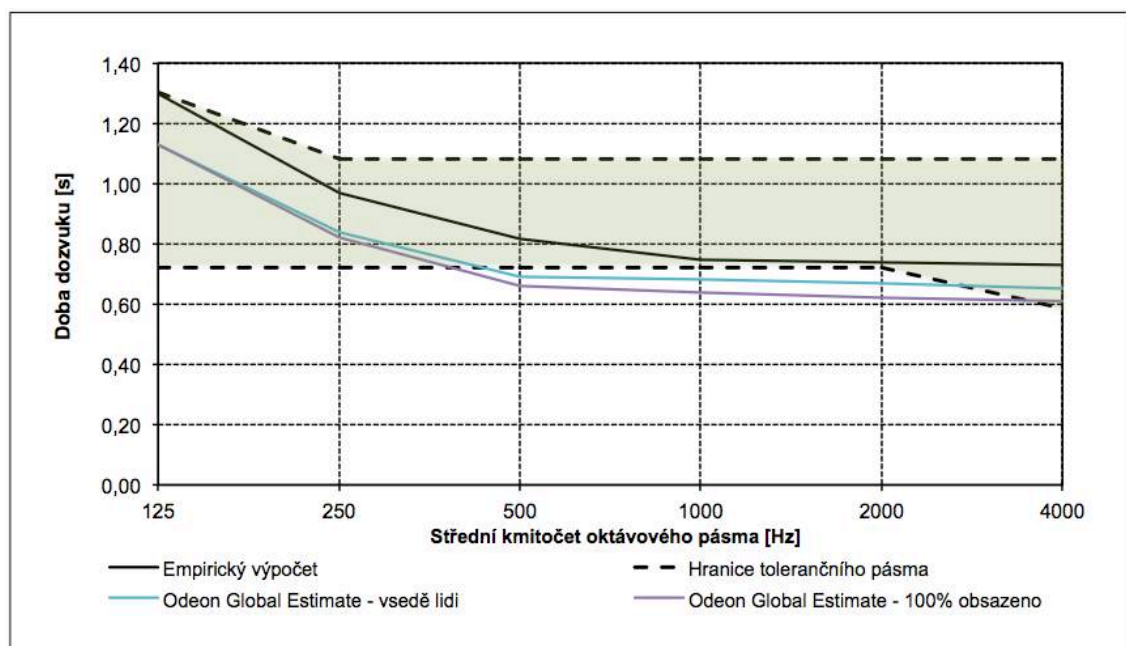
V případě sádkartonových desek s podstatně lepší mechanickou odolností již není nezbytné, aby byly z dosahu možného poškození návštěvníky.

10.3.3 Výsledky simulace – objektivní akustické parametry

Účinnost optimalizace byla ověřována pro 2 verze využití prostoru – pro sál se stoly a sedícími hosty, simulující funkci jako setkávací a restaurační prostor, a pro 100% obsazený sál publikem v případě hudební či mluvené produkce.

Doba dozvuku

Frekvenční závislost empiricky vypočtené a simulované doby dozvuku znázorňuje následující obrázek a tabulka:



Obrázek 50: Varianta 2 - výsledná doba dozvuku

Tabulka 19: Varianta 2 - výsledná doba dozvuku

Varianta 2	Doba dozvuku (s)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Typ výpočtu						
Empirický (50 osob)	1,30	0,97	0,82	0,75	0,74	0,73
Odeon – sedící hosté	1,13	0,84	0,69	0,68	0,67	0,65
Odeon – 100% obsazeno	1,13	0,82	0,66	0,64	0,62	0,61

V tomto případě již hodnoty i pro verzi sálu obsazeného hosty lehce klesají pod doporučené rozmezí. V případě, kdy optimální pásmo dle normy pro nás slouží pouze jako doporučení, není nezbytné se tímto faktem znepokojovat. Aby hodnoty doby dozvuku vyšly v rámci optimálního rozmezí, bylo by nutné odstranit některé ze stěnových panelů. Zmenšit plochu perforace na stropě by nebylo vhodné, neboť by pak vznikly větší odrazivé plochy a vůči podlaze by se mohlo objevit flutter echo. Vynechání stěnových panelů je však nežádoucí z hlediska architektury, pro kterou je nejlepší zachovat pravidelné rozmístění.

Když navíc uvážíme fakt, že prostor ani v rámci setkávací funkce pravděpodobně nebude téměř nikdy 100% zaplněn, dá se předpokládat, že při menším obsazení budou výsledné hodnoty doby dozvuku optimální.

Míra zřetelnosti C_{50}

Obrázek 51 na následující straně znázorňuje prostorovou závislost míry zřetelnosti C_{50} .

Je zřejmé, že oproti předchozí variantě s minerálními panely dává varianta s perforovaným sádkartonem vyváženější prostorové charakteristiky. Negativní vliv vstupu je již částečně eliminován a minimální hodnota C_{50} se oproti předchozí variantě zvýšila o více než 2 dB. Také maxima míry zřetelnosti již nedosahují takových extrémů a drží se pod hranicí 10 dB.

Míra jasnosti C_{80}

Prostorová závislost míry jasnosti C_{80} dává podobné výsledky, jako C_{50} , proto ji zde nebudeme graficky představovat. K nalezení může být na přiloženém médiu v elektronické podobě. Uvedme pouze, že prostorové minimum parametru C_{80} dává v rámci této varianty hodnotu -0,8 dB, což je oproti variantě 1 také zlepšení téměř o 2 dB. Maxima se poté pohybují v závislosti na frekvenci od 8 do 12 dB, což je také pozitivní, neboť se zde neobjevují takové extrémy, jako v případě minerálních panelů.

Basový poměr BR

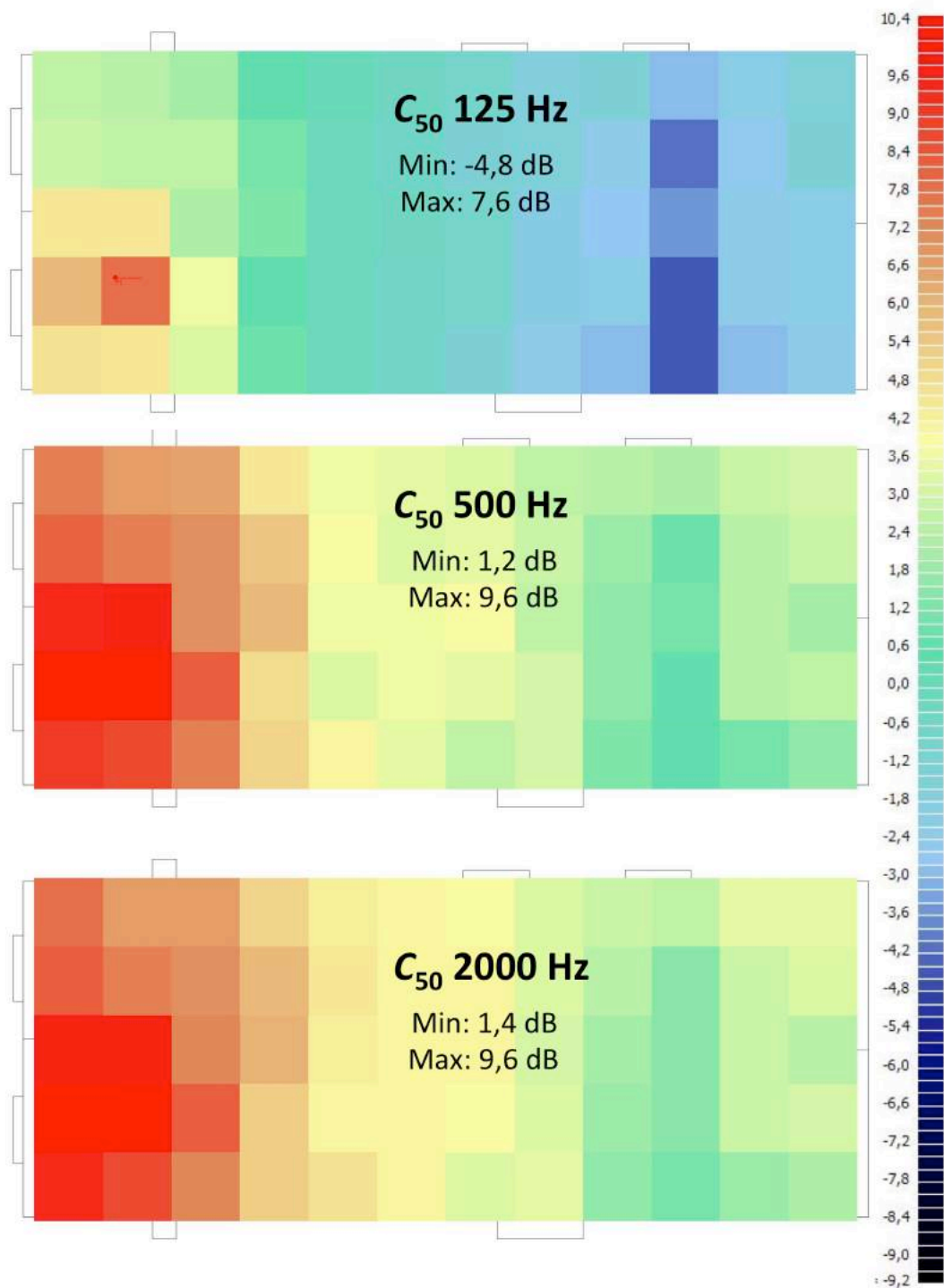
Prostorovou závislost basového poměru ukazuje obrázek 52.

Na první pohled je znatelná lepší distribuce parametru v prostoru, kdy maximum v zadní části u závěsu není tak výrazné, jako v případě první varianty. Lze tedy očekávat podstatně lepší projev spektrálního doznívání a více frekvenčně vyvážený přednes hudební produkce.

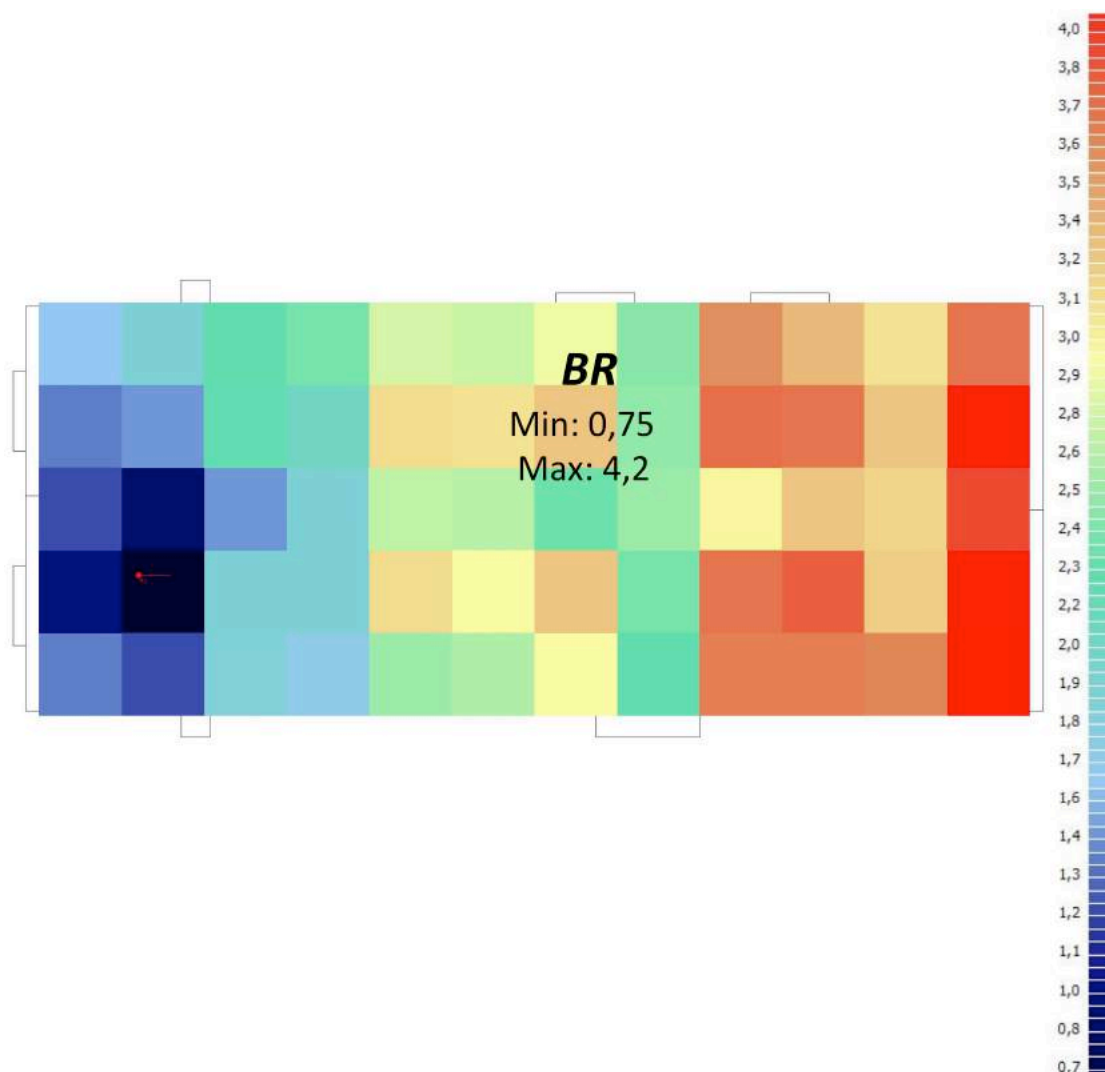
Eliminace třepotavých ozvěn

Vzhledem k tomu, že v rámci této varianty sahají perforované stěnové panely až ke stropu, je zřejmé, že třepotavé ozvěny budou zcela eliminovány. Tento předpoklad potvrzuje i výstup simulace, který není nutné graficky představovat, neboť dává téměř totožné výsledky jak v rovině u podlahy, tak pod stropem.

Jako shrnutí analýzy lze tedy předpokládat, že varianta se sádkkartonem bude z hlediska použitelnosti prostoru vhodnější a univerzálnější, neboť poskytne vyváženější přednes hudební produkce libovolného druhu se zachováním stejné vnímané hlučnosti během setkávacích akcí.



Obrázek 51: Varianta 2 - prostorová závislost C_{50}



Obrázek 52: Varianta 2 - prostorová závislost BR

10.3.4 Cenový odhad optimalizace

Následující tabulka představuje projektantský odhad cen pro realizaci výše představené varianty optimalizace prostorové akustiky pro KD v Bechlně.

Tabulka 20: Varianta 2 - projektantský odhad ceny optimalizace (ceny materiálu vypočteny na základě údajů v [28] se započtením všech potřebných prvků a přírážky za montáž)

Prvek	Jednotka	Cena za jednotku (bez DPH, včetně kotvení)	Počet jednotek	Cena celkem
Strop – Rigiton 8-15/50 s 50 mm MV	m ²	1.200,- Kč	83	99.600,- Kč
Stěny – Gyptone BIG Line 5, 200 mm o.d.s. bez MV	m ²	850,- Kč	80	68.000,- Kč
Doprava	-	5.000,- Kč	1	5.000,- Kč
Bourací a stavební práce	m ²	400,- Kč	163	65.200,- Kč
Cena CELKEM (bez DPH)				237.800,- Kč

10.3.5 Ne-akustické aspekty dané varianty optimalizace

Z hlediska prostorové akustiky řešeného víceúčelového sálu představuje varianta 2 ještě lepší řešení, než první navrhovaná varianta s minerálními panely. Porovnejme nyní i ostatní aspekty.

Složitost úprav

Nevýhodou této varianty z hlediska složitosti úprav může být nutnost částečně demontovat současné sádkokartonové předstěny. Velkou výhodou je ovšem možnost využití stávajících kotvicích prvků pro SDK desky, díky kterým může být ušetřena značná část nákladů.

Vliv na architekturu interiéru

Varianta 2 již současnou čistou architekturu interiéru částečně naruší. Perforace bude viditelná jak na stropě, tak na bočních stěnách, a plochy tedy již nebudou působit jako jednolitě. Na druhou stranu může být pravidelná perforace zajímavým designovým prvkem, se kterým se dá v rámci interiéru pracovat a nadále rozšiřovat, např. vytvořením podobného vzoru na ostatních povrchích výmalbou nebo tapetáží.

Mechanická odolnost

Stejně jako u varianty 1 nepředpokládáme žádné zásadní riziko mechanického poškození pohledu. Stěnové perforované panely ze sádkokartonu jsou podstatně odolnější, než minerální prvky navrhované předchozí variantou, k mechanickému poškození návštěvníky by tak mělo dojít pouze zřídka. Větší problém bude pravděpodobně pravidelné znečištění, neboť perforace bude zachytávat nejrůznější nečistoty. Vhodným opatřením tedy bude zasíťování otvorů stěnových desek průzvučnou tkaninou, která zaručí alespoň částečnou ochranu.

10.4 Varianta 3 – solitérní, volně zavěšené prvky

Varianta 3 vychází z předpokladu, že v prostoru nebude z libovolného důvodu možné provádět zásadní stavební zásahy. V rámci zkoumaného prostoru může jít o velmi pravděpodobnou variantu, kdy investor nebude otevřený demontáži prakticky nových konstrukcí stěn a stropu. K úpravě prostorové akustiky sálu tak bude použito pouze takových prvků, které je možné upevnit či zavěsit malými kotevními prvky na stávající konstrukce.

10.4.1 Konkrétní použité materiály

Na úpravu stropu byly použity solitérní závěsné minerální panely výrobce Ecophon, typu Solo Rectangle 1200 x 2400 mm. Ty jsou zavěšeny na lankách či řetízcích a kotveny do stávajícího pohledu. Svěšení pod stropem bylo voleno 400 mm jako jedna z typových variant výrobce, pro které udává ověřená data akustických vlastností.

Na stěny pak byly použity stejné minerální desky, jako v případě varianty 1, tentokrát ve verzi kotvení na stávající SDK předstěny.

Vzhledem k tomu, že žádné z instalovaných materiálů nefungují jako zvukově pohltivé na rezonančním principu, dá se předpokládat nedostatečné ztlumení prostoru na nízkých frekvencích. Z toho důvodu byly do výpočtu doplněny nízkotónové šterbinové rezonátory v podobě kompaktních dřevěných prvků, které budou instalovány pod strop.

Tabulka 21: Varianta 3 - zvuková pohltivost použitých materiálů

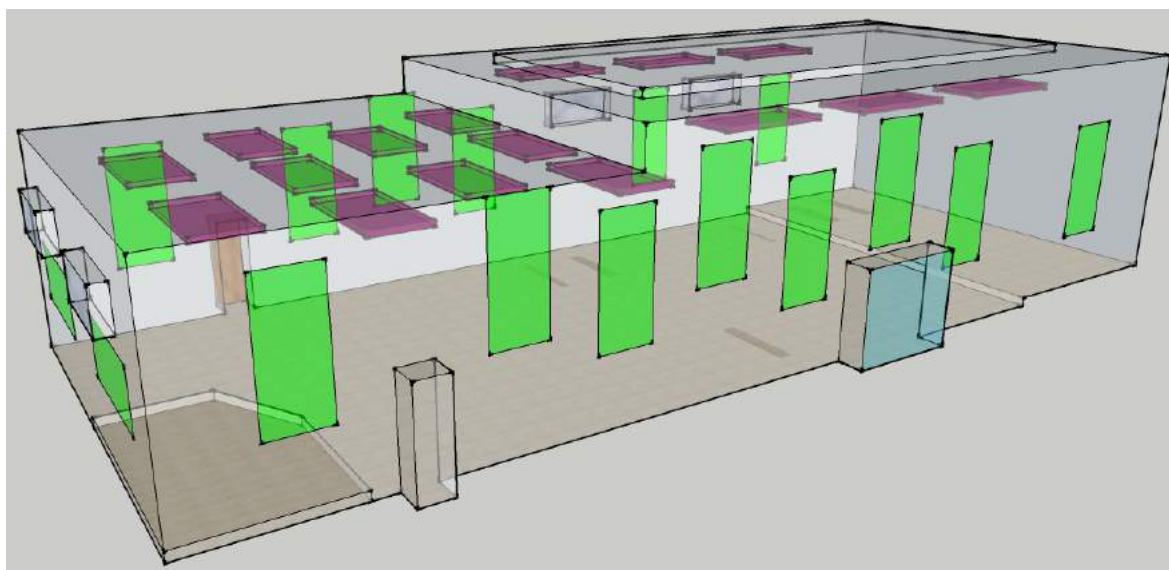
Prvek	$A_{125\text{ Hz}}$	$A_{250\text{ Hz}}$	$A_{500\text{ Hz}}$	$A_{1000\text{ Hz}}$	$A_{2000\text{ Hz}}$	$A_{4000\text{ Hz}}$	ks
Ecophon Solo Rectangle 1200 x 2400 mm, 400 mm o.d.s.	1,3	2	3,2	4,6	4,6	4,3	15
	$\alpha_{125\text{ Hz}}$	$\alpha_{250\text{ Hz}}$	$\alpha_{500\text{ Hz}}$	$\alpha_{1000\text{ Hz}}$	$\alpha_{2000\text{ Hz}}$	$\alpha_{4000\text{ Hz}}$	$S\text{ (m}^2\text{)}$
NTR – nízkotónový rezonátor, 200 x 200 mm, 50 mm štěrbina	0,7	0,6	0,45	0,3	0,2	0,2	17,5
Ecophon AcustoWall A 40 mm	0,25	0,75	1	1	1	1	50

Závěsné panely pod stropem nelze uvažovat jako rovinnou pohltivost, protože podle výšky svého zavěšení budou zvuk částečně pohlcovat i z boků a ze svrchní strany. Proto také výrobce místo činitele zvukové pohltivosti udává pohltivost A , která je dána jako součin středního činitele akustické pohltivosti a celkové aktivní plochy prvku.

U nízkotónových rezonátorů zase není vhodné posuzovat jejich celkovou plochu, neboť se jedná spíše o liniové, než plošné prvky. V rámci výpočtu vycházíme z předpokladu, že 1 běžný metr takového rezonátoru funguje jako 0,25 m² plošné pohltivosti se stejnými parametry.

10.4.2 Rozmístění akustických materiálů v prostoru

Rozmístění materiálů v prostoru ukazuje následující obrázek 3D modelu:



Obrázek 53: Varianta 3 - rozmístění prvků v prostoru

Soliterní panely jsou pod stropem zavěšeny v pravidelném rozmístění po celé ploše. Opět je vynechána část s dobovými kazetami, neboť se nepředpokládá možnost zastínění nebo dokonce kotvení prvků do této části. Prvky NTR nejsou do obrázku výše zakresleny, nicméně jsou uvažovány v rozích stropu a stěn, vždy po obvodu dané části stropu. Celková délka rezonátorů by měla být cca 70 m tak, aby množství odpovídalo aktivní ploše 17,5 m²

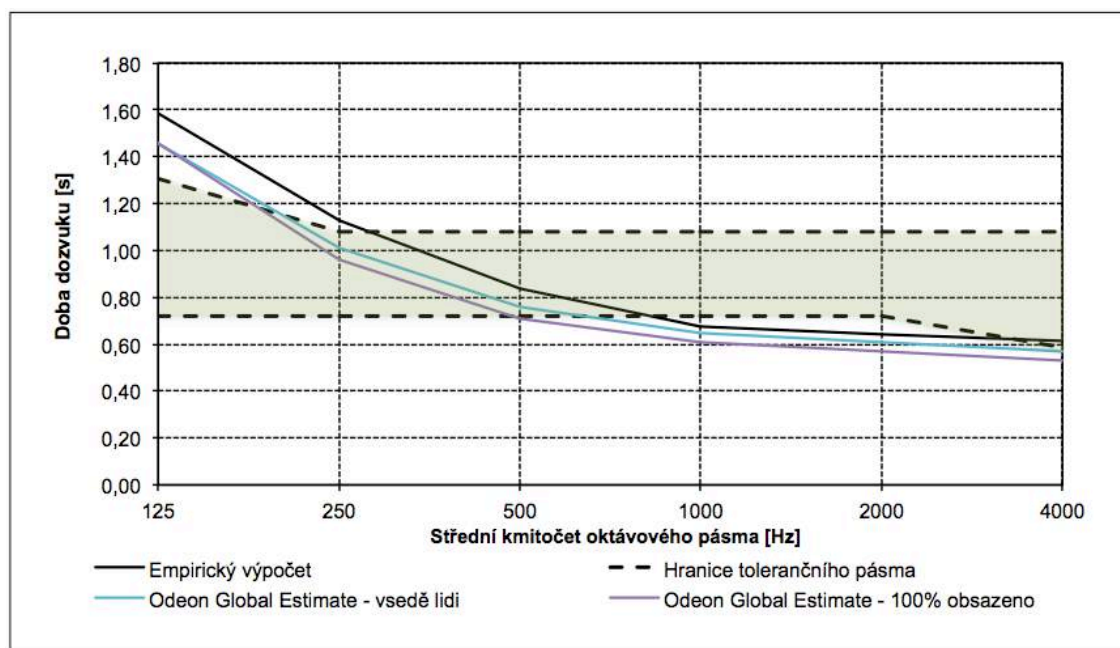
Stěnové panely jsou rozmístěny totožně jako v první variantě.

10.4.3 Výsledky simulace – objektivní akustické parametry

Účinnost optimalizace byla ověřována pro 2 verze využití prostoru – pro sál se stoly a sedícími hosty, simulující funkci jako setkávací a restaurační prostor, a pro 100% obsazený sál publikem v případě hudební či mluvené produkce.

Doba dozvuku

Frekvenční závislost empiricky vypočtené a simulované doby dozvuku znázorňuje následující obrázek a tabulka:



Obrázek 54: Varianta 3 - výsledná doba dozvuku

Tabulka 22: Varianta 3 - výsledná doba dozvuku

Varianta 3	Doba dozvuku (s)						
	Typ výpočtu	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
	Empirický (50 osob)	1,58	1,13	0,84	0,68	0,64	0,61
	Odeon – sedící hosté	1,46	1,01	0,76	0,65	0,61	0,57
	Odeon – 100% obsazeno	1,46	0,96	0,71	0,61	0,57	0,53

Je zřejmé, že průběh doby dozvuku je u této varianty horší, než v případě předchozích variant. V rámci optimálního pásma se hodnoty pohybují prakticky jen v pásmech 250 a 500 Hz. Volně zavěšené prvky pod stropem ani minerální stěnové panely nedokáží ze své podstaty pohlcování zvuku bez rezonance dostatečně tlumit nízké frekvence. Nízkotónové rezonátory sice účinně pomáhají, ale vzhledem ke své omezené velikosti nedokáží ani ty nízké frekvence dostatečně pohlitit. (V případě, že by se rezonátory nepoužily, hodnoty doby dozvuku by pro nejnižší frekvence vystoupaly nad 1,8 s).

Tím, že je prvků v prostoru rozmístěno tolik, aby aktivně pohlcovaly střední frekvence, které jsou kritické pro srozumitelnost lidské řeči, dojde naopak k přetlumení na vyšších frekvencích. Toto přetlumení ovšem není o moc výraznější, než u předchozích variant a při ne zcela obsazeném prostoru pravděpodobně vymizí.

Míra zřetelnosti C_{50} a míra jasnosti C_{80}

Prostorová závislost míry zřetelnosti C_{50} a míry jasnosti C_{80} je pro tuto variantu téměř shodná s variantou 1, včetně minimálních a maximálních hodnot, nebudeme ji zde tedy graficky představovat. K nalezení může být na přiloženém médiu v elektronické podobě.

Počáteční doba dozvuku EDT

Místo prostorových závislostí parametrů vyváženosti počáteční a pozdní energie ukažme v tomto případě prostorovou závislost počáteční doby dozvuku, na obrázku 55 na následující straně. Je zřejmé, jak lokální doba dozvuku přímo souvisí s hodnotami jasnosti a zřetelnosti. V prostoru vstupu, kde jsou tyto parametry obecně nejhorší, můžeme pozorovat jasná maxima počáteční doby dozvuku EDT prakticky v celém zkoumaném frekvenčním spektru. Minimální hodnoty doby dozvuku v těsné blízkosti zdroje by měly být brány s rezervou, neboť doba dozvuku předpokládá difúzní pole a těsnou blízkost zdroje za difúzní rozhodně označit nelze.

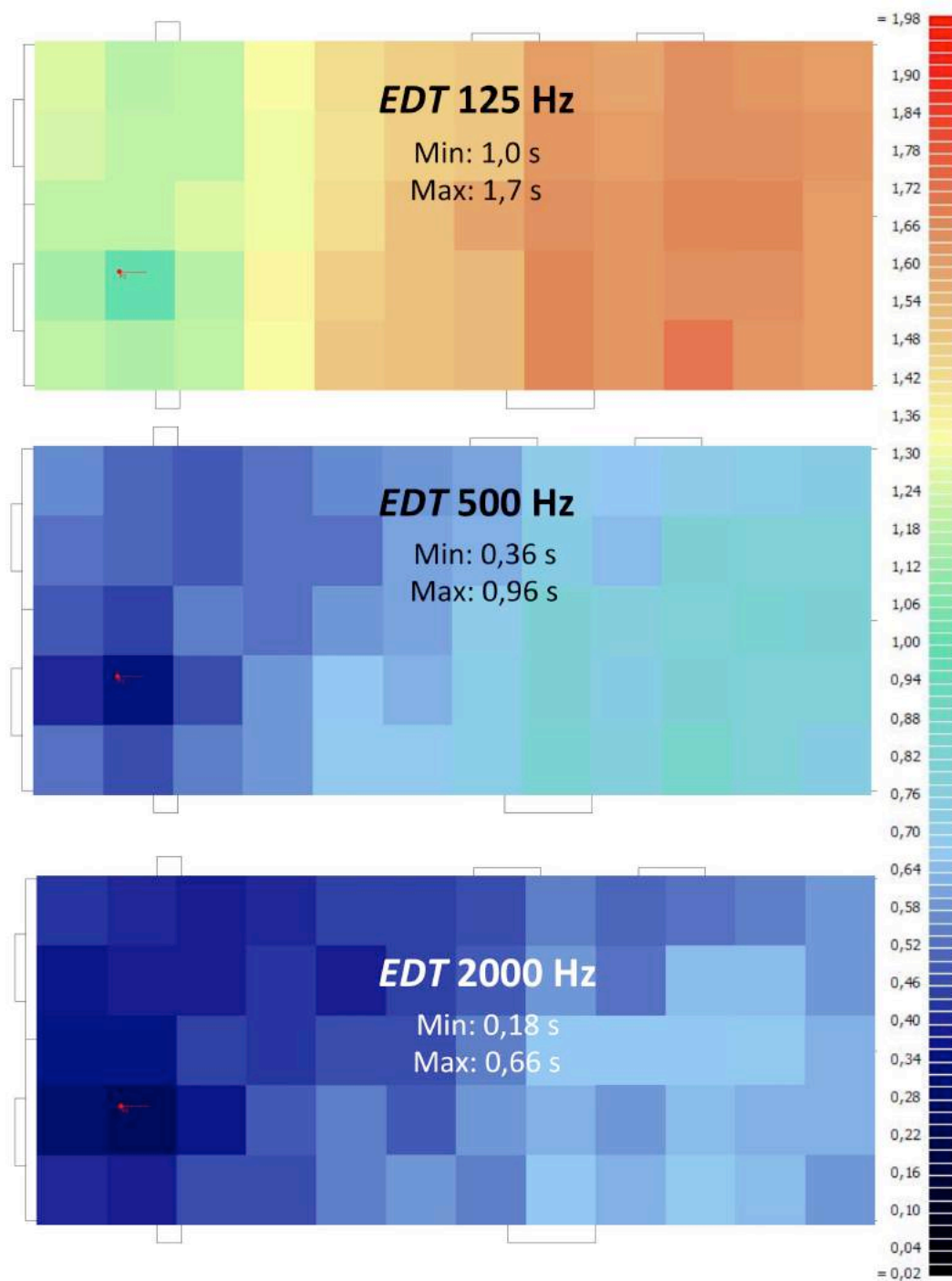
Basový poměr BR

Basový poměr vykazuje pro variantu se soliterně zavěšenými prvky podobný trend jako pro variantu č. 1. Je zde znatelné maximum v zadní části sálu a nedostatečné hodnoty v části blízko u podla. Graficky může být tato závislost nalezena na přiloženém médiu v elektronické podobě.

Eliminace třepotavých ozvěn

Třepotavé ozvěny jsou touto variantou optimalizace dostatečně eliminovány, neboť v nejexponovanější části u stropu je zvukové pole rozbito množstvím závěsných panelů. Pro optimální efekt by bylo vhodné, aby panely byly zavěšeny v různých výškách, nicméně to by mělo poměrně zásadní vliv na vnímání architektury interiéru.

Z akustického hlediska lze tedy shrnout, že varianta se soliterními prvky je přijatelná, avšak ne optimální. V případě realizace bude na rozhodnutí investora, zda ochudí sál o lepší prostorovou akustiku s přihlédnutím k dalším aspektům.



Obrázek 55: Varianta 3 - prostorová závislost EDT

10.4.4 Cenový odhad optimalizace

Následující tabulka představuje projektantský odhad cen pro realizaci výše představené varianty optimalizace prostorové akustiky pro KD v Bechlině.

Tabulka 23: Varianta 3 - projektantský odhad ceny optimalizace (ceny materiálu vypočteny na základě údajů v [27] se započtením všech potřebných prvků a přírážky za montáž)

Prvek	Jednotka	Cena za jednotku (bez DPH, včetně kotvení)	Počet jednotek	Cena celkem
Ecophon Solo Rectangle 1200 x 2400 mm	ks	4.500,- Kč	15	67.500,- Kč
Ecophon AcustoWall A	m ²	2.500,- Kč	50	125.000,- Kč
Doprava	-	5.000,- Kč	1	5.000,- Kč
Bourací a stavební práce (pouze kotvení)	m ²	400,- Kč	20	8.000,- Kč
Cena CELKEM (bez DPH)				205.500,- Kč

10.4.5 Ne-akustické aspekty dané varianty optimalizace

Složitost úprav

Stavební úpravy v rámci této navrhované varianty jsou minimální. Všechny stávající konstrukce zůstanou zachovány, dojde pouze k ukotvení nových akustických prvků. Finanční i časová úspora na stavební práce je tedy značná.

Vliv na architekturu interiéru

Solitérní závěsné panely výrazně změny celkovou architekturu interiéru. Již nepůjde o skryté prvky, ale optimalizace prostorové akustiky jimi bude vizuálně přiznána. Podle přístupu se může jednat jak o negativní, tak o pozitivní změnu. V případě přepracování architektonického konceptu by mohly závěsné panely zejména v případě jejich zavěšení v různých výškách a např. s různým natočením vůči horizontální rovině vytvořit zajímavý interiérový prvek.

Mechanická odolnost

Otázka mechanické odolnosti stěnových panelů je totožná jako v případě první varianty. Negativním závěsných panelů pod stropem je to, že budou fungovat jako lapače prachu, takže bude nutná jejich pravidelná údržba vysáváním. Zahlcení panelů prachem není jen otázkou dodržení hygieny vnitřního prostoru, ale i otázkou akustiky. Nadměrná vrstva prachu zásadně mění akustické vlastnosti panelů a výrazně snižuje jejich zvukovou pohltivost.

10.5 Varianta 4 – modulární řešení

Varianta 4 představuje modulární a současně nejlevnější řešení. Předpokládá se řešení bez jakýchkoliv zásahů do stavebních konstrukcí s možností přesouvání akustických prvků. Ty jsou tedy voleny v podobě volně stojících paravanů s výplní na minerální bázi a zástěně v zadní části sálu, kterou je možné zatáhnout přes celý průřez prostorem.

10.5.1 Konkrétní použité materiály

Akustické paravany mají rozměr 2000 x 2000 mm a jsou řešeny jako dvoudílné s pantovým spojem. Podle potřeby je tedy možné je využít jako rovné či rohové akustické prvky. V pevném dřevěném rámu je výplň v podobě minerální izolace tloušťky 70 mm, potažená průzvučnou tkaninou.

Zadní zástěna je uvažována obecně, neboť se nepodařilo nalézt hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro konkrétní výrobek. Předpokládá se skládací konstrukce s částečnou zvukovou pohltivostí na vyšších frekvencích, avšak s výraznějším účinkem na středních a nižších frekvencích vlivem rezonančního principu pohlcování zvuku.

Tabulka 24: Varianta 4 - zvuková pohltivost použitých materiálů

Prvek	$A_{125 \text{ Hz}}$	$A_{250 \text{ Hz}}$	$A_{500 \text{ Hz}}$	$A_{1000 \text{ Hz}}$	$A_{2000 \text{ Hz}}$	$A_{4000 \text{ Hz}}$	ks
Akustický paravan 2000x2000 mm s 70 mm minerální izolace	1,76	1,92	4,76	4,48	4,64	4,64	10
	$\alpha_{125 \text{ Hz}}$	$\alpha_{250 \text{ Hz}}$	$\alpha_{500 \text{ Hz}}$	$\alpha_{1000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{2000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{4000 \text{ Hz}}$	$S \text{ (m}^2\text{)}$
Akustická zástěna	0,4	0,6	0,5	0,3	0,15	0,1	55

Stejně jako v případě závěsných panelů v předchozí variantě je vhodné akustické vlastnosti volně stojících paravanů posuzovat na základě jejich celkové pohltivé plochy A , neboť podle umístění budou částečně pohlcovat i ze své rubové strany.

10.5.2 Rozmístění akustických materiálů v prostoru

Rozmístění materiálů v prostoru ukazuje obrázek 56 na následující straně. U akustických paravanů nelze přesně určit jejich polohu, protože se předpokládá, že pro každou akci obsluhující personál sálu zvolí jinou dispozici sedadel. Jsou proto umístěny v pravidelných rozestupech u bočních stěn tak, aby jejich pozitivní vliv na zvukovou pohodu byl co nejvíce rovnoměrně rozložený.

Akustická zástěna v zadní části sálu má v tomto případě dvě funkce. První z nich je samozřejmě její schopnost plošně pohlcovat zvukovou energii na základě kombinace rezonančního a pórovitého principu, která se projeví zejména na středních a nižších frekvencích. Druhou a podstatně významnější funkcí ovšem je to, že zatažením zástěny prakticky dojde ke zmenšení celkového objemu sálu, ve kterém se bude zvukové pole distribuovat. Prostor za zástěnou se po jejím zatažení v rámci optimalizace neuvažuje. Objem sálu se zatažením zmenší z původních cca 1.300 m³ na zhruba 1.000 m³, což má za následek výrazný pokles přirozené doby dozvuku bez jakýchkoliv dalších akustických úprav.



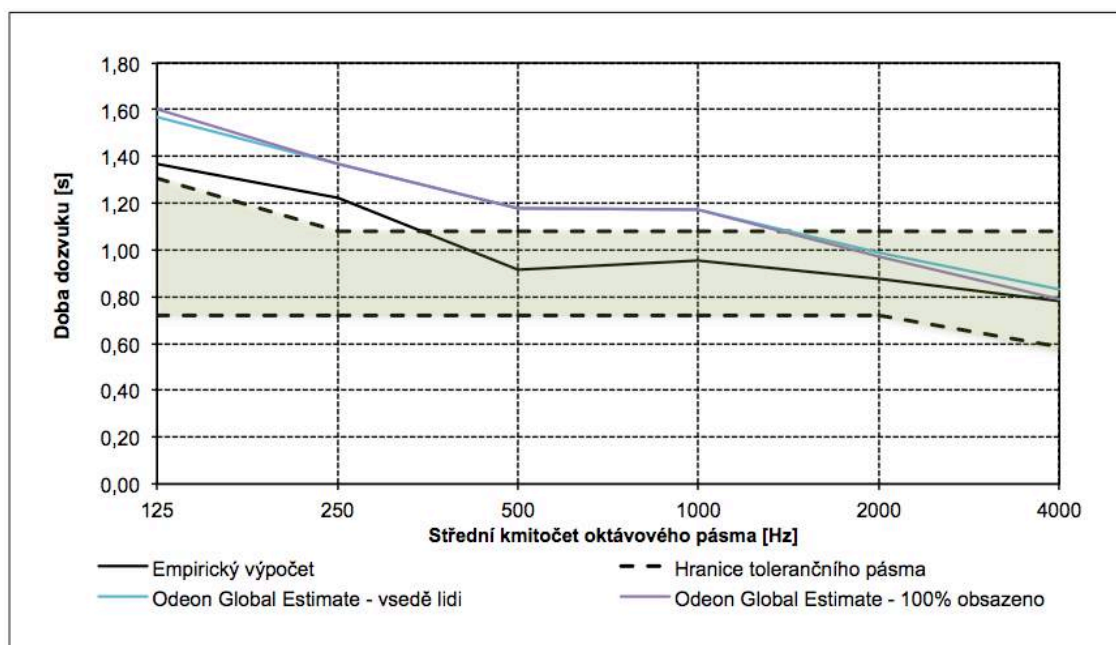
Obrázek 56: Varianta 4 - rozmístění prvků v prostoru

10.5.3 Výsledky simulace – objektivní akustické parametry

Účinnost optimalizace byla ověřována pro 2 verze využití prostoru – pro sál se stoly a sedícími hosty, simulující funkci jako setkávací a restaurační prostor, a pro 100% obsazený sál publikem v případě hudební či mluvené produkce.

Doba dozvuku

Frekvenční závislost empiricky vypočtené a simulované doby dozvuku znázorňuje následující obrázek a tabulka:



Obrázek 57: Varianta 4 - výsledná doba dozvuku

Tabulka 25: Varianta 4 - výsledná doba dozvuku

Varianta 4	Doba dozvuku (s)					
	Typ výpočtu	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Empirický (50 osob)	1,37	1,22	0,92	0,96	0,87	0,78
Odeon – sedící hosté	1,57	1,37	1,18	1,17	0,99	0,83
Odeon – 100% obsazeno	1,60	1,37	1,18	1,17	0,97	0,79

V případě této varianty můžeme pozorovat, že simulované hodnoty doby dozvuku jsou v celém zkoumaném spektru o cca 0,2 s vyšší, než empirický výpočet. To je způsobeno vznikem třepotavých ozvěn mezi bočními stěnami, které jsou akusticky neošetřené. Výstup simulace ukazující četnější odrazy od bočních stěn je představen níže.

Celkově se hodnoty pohybují nad stanoveným optimálním pásmem. Nutno ovšem podotknout, že tato varianta je oproti ostatním představeným skutečným low-cost řešením a vzhledem k její nízké ceně jsou tyto hodnoty více než uspokojivé. Navíc díky tomu, že došlo ke zmenšení celkového objemu sálu, už také nebude takový problém naplnit jeho celou kapacitu. Nehrozí zde už tedy tolik skutečnost, že chybějící zvuková pohltivost přítomných osob bude dobu dozvuku nadále zvyšovat.

Míra zřetelnosti C_{50}

Obrázek 58 na následující straně znázorňuje prostorovou závislost míry zřetelnosti C_{50} .

Přiblížením zadní stěny v podobě zástěny směrem ke vstupu byl prakticky eliminován negativní vliv této oblasti. Hodnoty míry zřetelnosti jsou v celém zkoumaném frekvenčním spektru přijatelné a poukazují na to, že i toto levné řešení zajistí dostatečný akustický komfort pro produkce mluveného slova

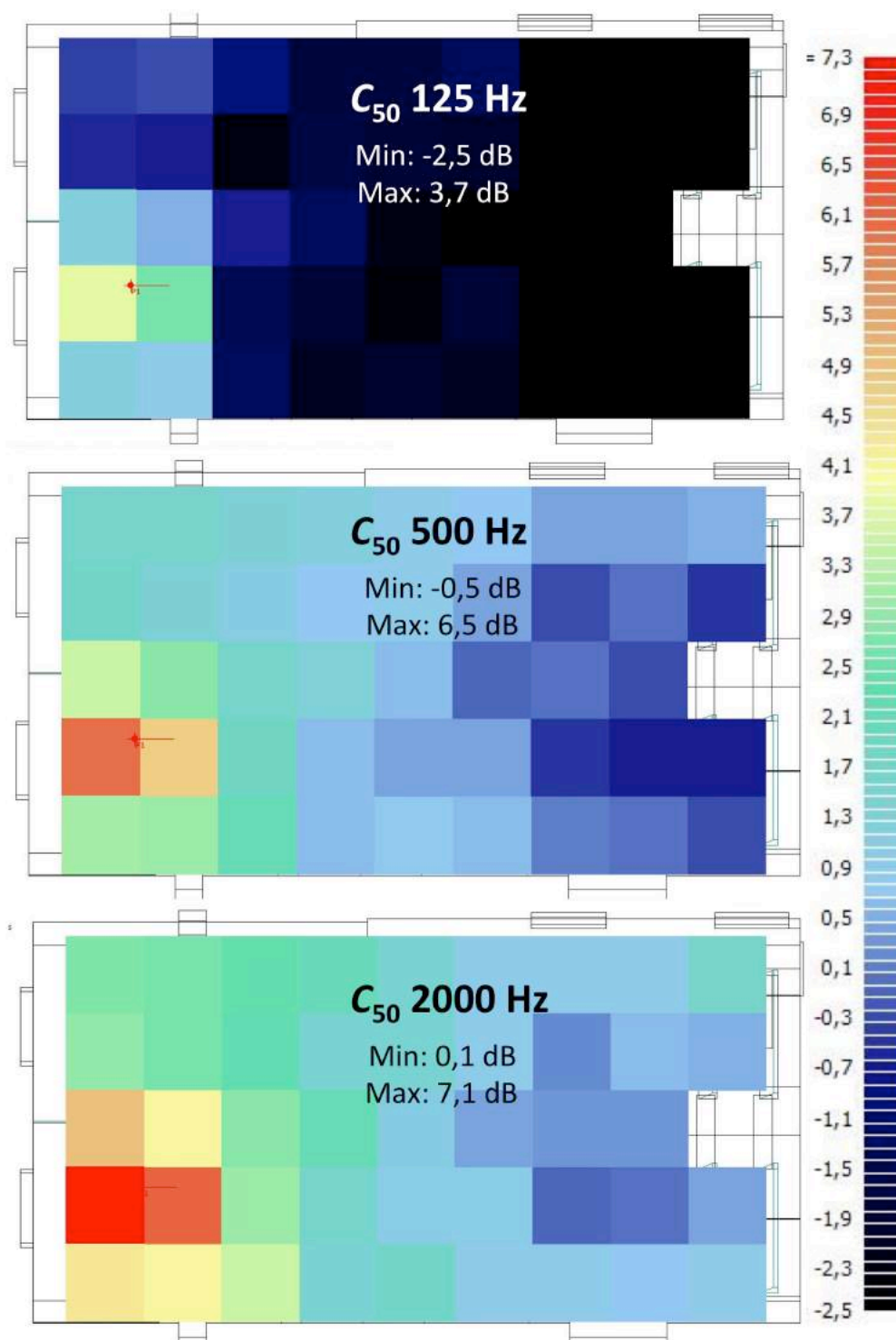
Míra jasnosti C_{80}

Prostorová závislost míry jasnosti C_{80} dává podobné výsledky, jako C_{50} , proto ji zde nebudeme graficky představovat. K nalezení může být na přiloženém médiu v elektronické podobě. Uvedme pouze, že hodnoty C_{80} jsou s porovnáním s hodnotami C_{50} průměrně o 2 až 3 dB vyšší pro všechny frekvence a místa měření. Minima C_{80} se pohybují kolem 0 dB a maxima kolem 9 dB, což není tak dobrý výsledek, jako u předchozích variant, avšak vzhledem k rozsahu úprav v rámci této varianty jsou to hodnoty více než uspokojivé.

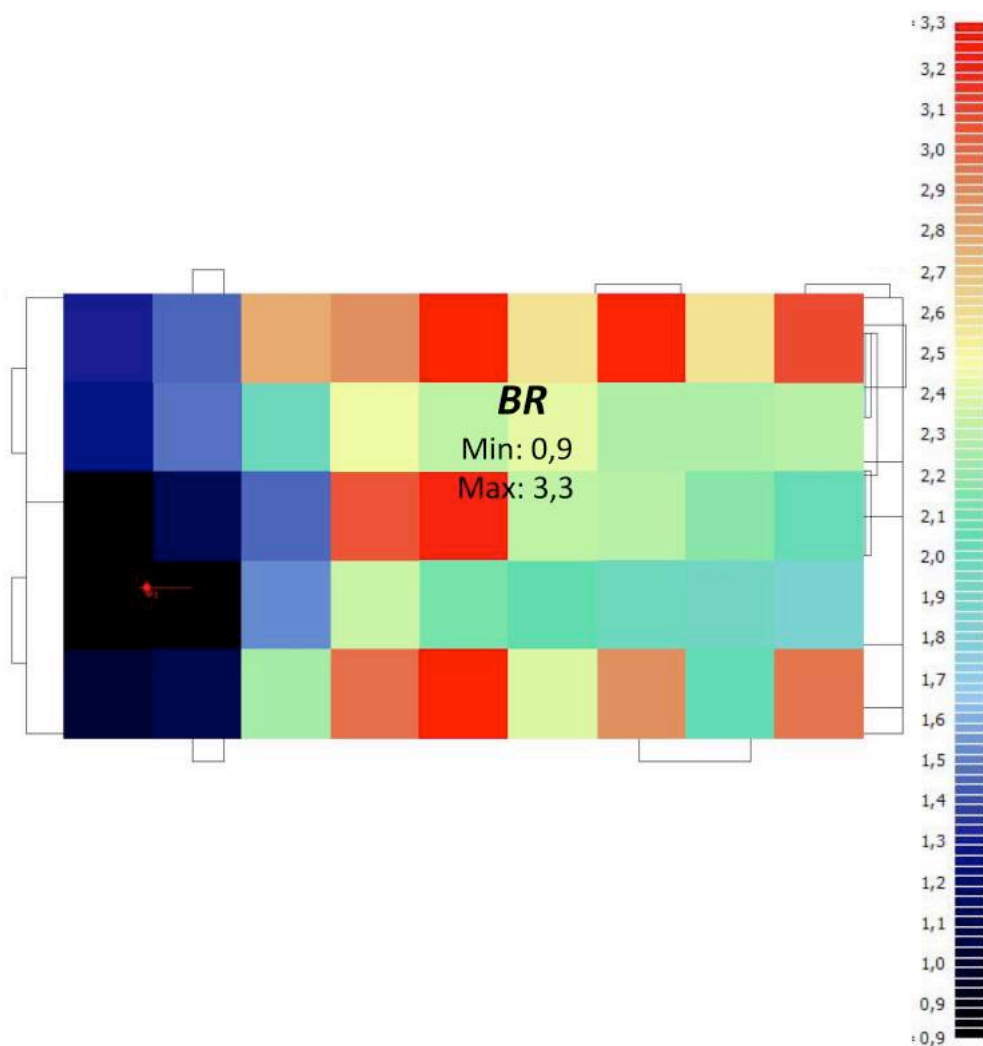
Basový poměr BR

Prostorovou závislost basového poměru ukazuje obrázek 59.

Hodnoty parametru BR se zdají být poměrně rovnoměrně rozloženy v celé ploše sálu, což dává předpoklad dobrého vnímání spektrálního doznívání.



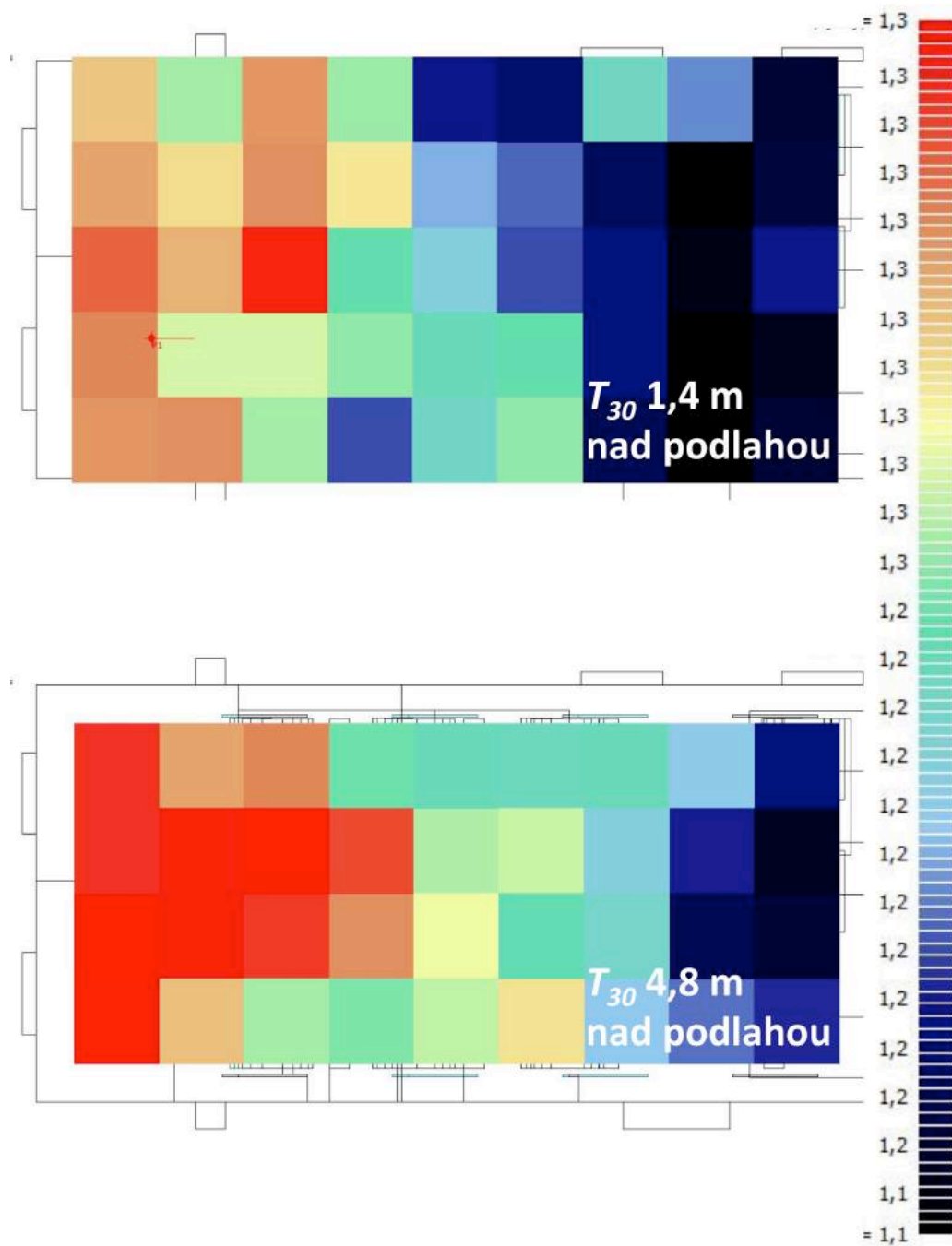
Obrázek 58: Varianta 4 - prostorová závislost C_{50}



Obrázek 59: Varianta 4 - prostorová závislost BR

Eliminace třepotavých ozvěn

Podle předpokladu a porovnání empirického výpočtu se simulací se v rámci této varianty projevily negativní vliv flutter echoes v horní části sálu. Vícenásobné odrazy mezi dvěma bočními neupravenými stěnami zvyšují dobu dozvuku v celém zkoumaném spektru o cca 0,2 s oproti empirickému předpokladu. Důkazem může být i obrázek 60, na kterém jsou znatelné vícenásobné odrazy pod stropem zejména v první polovině sálu od podia.



Obrázek 60: Varianta 4 - vznik třepotavých ozvěn

10.5.4 Cenový odhad optimalizace

Následující tabulka představuje projektantský odhad cen pro realizaci výše představené varianty optimalizace prostorové akustiky pro KD v Bechlině.

Tabulka 26: Varianta 4 - projektantský odhad ceny optimalizace ([29])

Prvek	Jednotka	Cena za jednotku (bez DPH, včetně kotvení)	Počet jednotek	Cena celkem
Akustický paravan	ks	4.800,- Kč	10	48.000,- Kč
Akustická zástěna	ks	60.000,- Kč	1	60.000,- Kč
Doprava	-	3.000,- Kč	1	3.000,- Kč
Instalace zástěny	ks	8.000,- Kč	1	8.000,- Kč
Cena CELKEM (bez DPH)				119.000,- Kč

10.5.5 Ne-akustické aspekty dané varianty optimalizace

Složitost úprav

Jediným stavebním zásahem v rámci této varianty optimalizace bude instalace akustické zástěny v zadní části sálu. Do podlahy a stropu budou muset být pravděpodobně ukotveny kolejnice či jiný podobný systém pro volný pohyb zástěny. U podlahy bude možné vhodně využít výškový rozdíl, takže kotevní konstrukce zástěny nevytvoří nevhodnou překážku pohybu.

Vliv na architekturu interiéru

Je otázkou, zda v rámci této varianty vliv na architekturu interiéru vůbec posuzovat. Akustické paravany budou vždy způsobovat vizuální narušení prostoru i v případě, že budou designově kvalitně navrženy. Zástěna v zadní části může být barevně libovolně barevně přizpůsobena, avšak vždy bude tvořit viditelnou bariéru.

Mechanická odolnost

U akustické zástěny se nepředpokládá žádné výrazné riziko mechanického poškození. Tyto systémy se většinou navrhují z odolných a snadno omyvatelných materiálů, ani neukáznění návštěvníci by tak pro zástěnu neměli být nebezpečím.

Volně stojící paravany jsou samozřejmě k mechanickému poškození a znečištění podstatně náchylnější. Dá se předpokládat, že bude nutná občasná oprava nebo výměna poškozených kusů. Vzhledem k jejich poměrně nízké ceně to ovšem nebude výrazná finanční zátěž pro provozovatele prostoru. U paravanů se ovšem objevuje ještě další riziko, a sice možnost jejich pádu. Padající paravan může způsobit zranění návštěvníků. Zejména u dětí se bavíme dokonce o možnosti trvalých následků, za které samozřejmě nese zodpovědnost provozovatel prostoru. Bude tedy v jeho vlastním zájmu vhodným způsobem zajistit paravany proti možnosti volného pádu, aby předešel případným právním nepříjemnostem.

10.6 Vzájemné porovnání variant a shrnutí

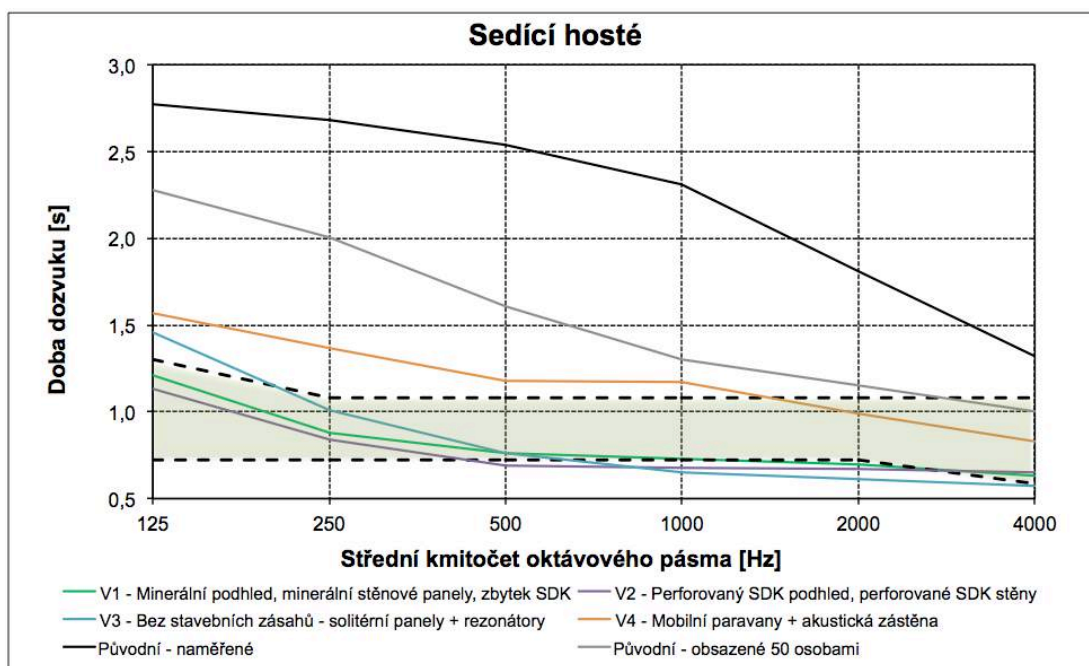
V předchozích podkapitolách byly představeny 4 varianty možné optimalizace prostorové akustiky konkrétního víceúčelového sálu. Kromě vlivu úprav na akustické vlastnosti prostoru byly sledovány i jiné aspekty ne-akustického charakteru. Tato podkapitola má za cíl zjištěné poznatky přehledně shrnout a vyhodnotit.

10.6.1 Porovnání doby dozvuku

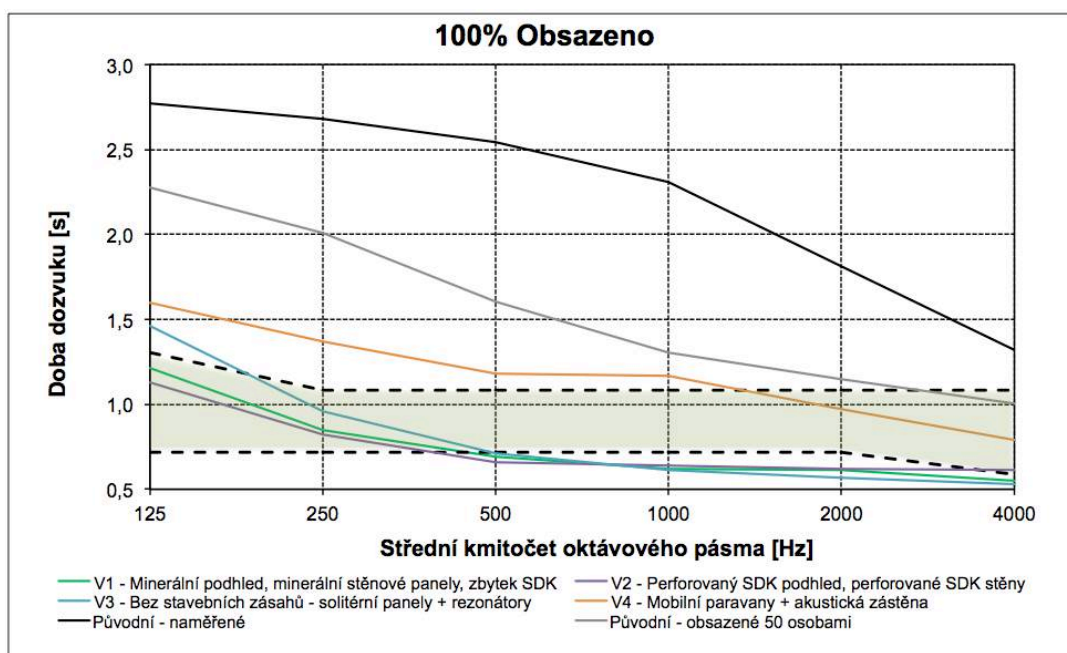
Následující tabulky a grafy ukazují srovnání výsledné doby dozvuku po provedení jednotlivých variant optimalizace. Hodnoty „původní – naměřené“ jsou skutečné výsledky reálného měření prostoru, „původní – obsazené“ počítají se zvukovou pohltivostí cca 50 osob, hodnoty jednotlivých variant jsou výstupem počítačové simulace.

Tabulka 27: Porovnání doby dozvuku jednotlivých variant optimalizace

KD Bechlín – doba dozvuku po provedení úprav (s)							
Varianta		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Původní – naměřené		2,77	2,68	2,54	2,31	1,81	1,32
Původní - obsazené		2,28	2,01	1,61	1,30	1,15	1,00
V1 – Minerální panely	Sedící hosté	1,21	0,88	0,76	0,73	0,70	0,63
	100% Obsazeno	1,21	0,85	0,69	0,62	0,61	0,55
V2 – Perforovaný SDK	Sedící hosté	1,13	0,84	0,69	0,68	0,67	0,65
	100% Obsazeno	1,13	0,82	0,66	0,64	0,62	0,61
V3 – solitérní prvky	Sedící hosté	1,46	1,01	0,76	0,65	0,61	0,57
	100% Obsazeno	1,46	0,96	0,71	0,61	0,57	0,53
V4 – modulární řešení	Sedící hosté	1,57	1,37	1,18	1,17	0,99	0,83
	100% Obsazeno	1,60	1,37	1,18	1,17	0,97	0,79



Obrázek 61: Porovnání doby dozvuku - sedící hosté



Obrázek 62: Porovnání doby dozvuku - 100% obsazeno

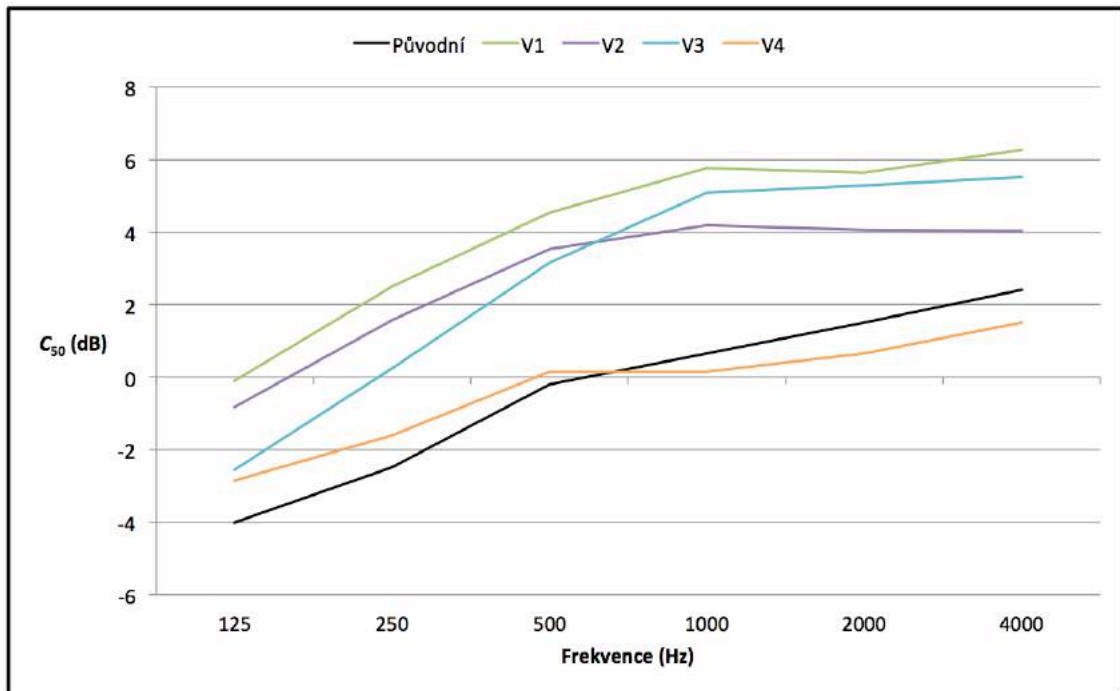
Je zřejmé, že v obou případech vychází nejlépe varianty 1 a 2. Jejich lehké přetlumení na vyšších frekvencích oproti zvolenému optimálnímu pásmu již bylo vysvětleno výše a v případě obsazení méně než 100% kapacity sálu zanikne a hodnoty doby dozvuku budou v optimu. Varianta 3 poskytuje dostatečný akustický komfort pro většinu předpokládaných využití prostoru, pouze na vyšších frekvencích může sál déle doznívat a způsobovat tak frekvenčně nevyvážený projev. Varianta 4 je low-cost řešením, které není optimální, avšak dokáže zaručit alespoň uspokojivé akustické podmínky.

10.6.2 Porovnání míry zřetelnosti C_{50}

Frekvenční průběh průměrné míry zřetelnosti C_{50} jednotlivých variant znázorňuje následující tabulka a graf. Zajímavým zjištěním je v tomto případě varianta 4. I když akustické paravany a zástěna pomůžou snížení doby dozvuku na přípustnou úroveň, parametr zřetelnostilepší pouze na nejnižších frekvencích. Ve vyšších frekvencích dojde naopak ke zhoršení stavu oproti současnému stavu. To je důsledkem pravděpodobně přílišné blízkosti paravanů a míst posluchačů, do kterých je kvůli pohlcování zvuku paravany distribuováno méně energie přímé vlny a prvních odrazů, která je pro srozumitelnost klíčová. Ostatní varianty pak přinášejí celkové zlepšení hodnot C_{50} podle očekávání.

Tabulka 28: Porovnání míry zřetelnosti C_{50} jednotlivých variant optimalizace

C_{50}	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Původní	-4,01	-2,47	-0,2	0,66	1,52	2,42
V1	-0,1	2,52	4,55	5,76	5,65	6,28
V2	-0,83	1,58	3,54	4,19	4,07	4,05
V3	-2,56	0,26	3,16	5,08	5,29	5,52
V4	-2,85	-1,6	0,16	0,15	0,65	1,51



Obrázek 63: Porovnání míry zřetelnosti C_{50} jednotlivých variant optimalizace

10.6.3 Porovnání míry jasnosti C_{80}

Analýza míry jasnosti vykazuje stejný frekvenční průběh i závěr jako u míry srozumitelnosti, jak každopádně vyplývá z jejich podobné matematické definice. Varianty 1 až 3 hodnoty C_{80} podstatně zlepší, čtvrtá varianta s paravany a zástěnou v průměru hodnoty C_{80} prakticky neovlivní. Uvedme pouze pro přehlednost číselné hodnoty tohoto parametru:

Tabulka 29: Porovnání míry jasnosti C_{80} jednotlivých variant optimalizace

C_{80}	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Původní	-1,57	0,04	2,46	3,42	4,44	5,56
V1	2,68	5,84	8,37	10,16	9,89	10,53
V2	1,97	4,81	7,14	7,94	7,79	7,76
V3	0,07	3,31	6,66	9,03	9,24	9,50
V4	0,00	1,27	3,28	3,33	4,06	5,16

10.6.4 Celkové shrnutí

Pro potřeby shrnutí a porovnání efektivity všech uvažovaných variant optimalizace nejen z pohledu prostorové akustiky, ale i při uvažování ostatních aspektů, byla vytvořena následující tabulka. Každá varianta byla v každém aspektu hodnocena body od 1 do 10 a každému aspektu byl v rámci váhování přidělen určitý poměr významnosti na definitivní volbě.

Nutno uvést, že zejména váhování bylo vytvořeno subjektivně, na základě předpokladů, jak by se mohla optimalizace prostorové akustiky vyvíjet v konkrétním posuzovaném sále KD Bechlín. Váhování je ovlivněno i předpokladem autora nabytým z pocitů během jednání se zastupitelstvem obce a celkovým stavem místního kulturního dění.

Tabulka 30: Multikriteriální porovnání jednotlivých variant optimalizace

Multikriteriální porovnání jednotlivých variant optimalizace				
Varianta	V1 - minerální	V2 - SDK	V3 - solitérní	V4 - modulární
Posuzovaný aspekt				
T_{30} - body	9	8	6	3
T_{30} - váha	0,3			
C_{50}, C_{80} - body	7	8	6	1
C_{50}, C_{80} - váha	0,3			
BR - body	6	8	6	8
BR - váha	0,2			
Flutter - body	7	9	9	3
Flutter - váha	0,2			
CELKEM Aku - body	7,4	8,2	6,6	3,4
CELKEM Aku - váha	0,3			
Cena (tis. Kč)	294	234	201	112
Cena - body	3,1	4,5	5,3	7,2
Cena - váha	0,4			
Stav. úpravy - body	5	4	7	9
Stav. úpravy - váha	0,1			
Architektura - body	8	7	5	2
Architektura - váha	0,1			
Odolnost - body	5	8	5	3
Odolnost - váha	0,05			
Údržba - body	7	6	3	8
Údržba - váha	0,05			
Body CELKEM	5,35	6,05	5,68	5,55

Dle tabulky výše se jako nejvhodnější varianta jeví řešení s perforovanými SDK deskami. Ta za přijatelnou cenu nabídne optimální akustické podmínky spolu s dobrou mechanickou odolností a snadnou údržbou.

Jako druhá nejlepší se při uvažování všech aspektů jeví varianta se solitérně zavěšenými panely. Velká úspora v podobě jednoduché instalace bude ovšem v budoucnu pravděpodobně vyrovnána zvýšenými náklady na údržbu zejména stropních panelů.

Varianta 4 vychází jako třetí nejlepší zejména díky své nízké ceně. Ovšem jak již bylo popsáno výše, z hlediska akustiky ani z hlediska vizuální stránky to není nejvhodnější řešení.

Paradoxně technologicky nejdokonalejší varianta 1 skončila v rámci tohoto porovnání na posledním místě. Důvodem je to, že varianta 2 s perforovaným SDK nabízí srovnatelné, ne-li lepší akustické podmínky za nižší cenu. Náročnost stavebních úprav a vliv na architekturu interiéru jsou pro obě tyto varianty srovnatelné.

Nutno dodat, že výše uvedený závěr platí jen pro tento konkrétní posuzovaný sál. V případě jiného prostoru je pravděpodobné, že některá z představených variant nebude z jakéhokoliv důvodu proveditelná. Projektant také může narazit na specifické požadavky investora, což ovlivní zejména váhování při posuzování důležitosti jednotlivých aspektů. Systém multikriteriálního hodnocení zde představený tedy rozhodně není univerzální, ale může sloužit jako vhodná reference při posuzování optimalizace prostorové akustiky více podobných prostorů.

11. Citlivostní analýza počítačové simulace prostorové akustiky

Počítačová simulace prostorové akustiky na 3D modelu je velmi efektivním nástrojem při návrhu optimalizace téměř jakéhokoliv uzavřeného prostoru. Spolu s velkými možnostmi však pochopitelně přináší i velké riziko v podobě nepřesných výsledků. Jelikož se celý proces odehrává jen ve virtuálním prostoru a ve většině případů výsledky nelze podložit reálným měřením, relevantnost výsledků je kriticky závislá na zadaných vstupech a zkušenostech obsluhy.

Některá úskalí a kritické body simulace již byly popsány v kapitole 9.4, tato část práce má za cíl tyto závěry rozšířit a poukázat na konkrétní aspekty, které mohou negativně ovlivnit vypovídací hodnotu simulovaných výsledků.

11.1 Počet použitých paprsků pro ray tracing

Jednou z možností nastavení výpočetního programu je volba, kolik paprsků má být v rámci metody ray tracing použito k získání impulsové odezvy v daném bodě. Nejedná se o počet paprsků vyslaných zdrojem, ale o počet unikátních paprsků, které od zdroje dorazí pomocí mnohočetných odrazů do zvoleného měřicího bodu ještě předtím, než ztratí většinu své energie. Počet paprsků přímo ovlivňuje přesnost simulovaných výsledků, neboť výsledná impulsová odezva je dána složitým procesem energetických součtů a průměrování dat, která jednotlivé paprsky nesou.

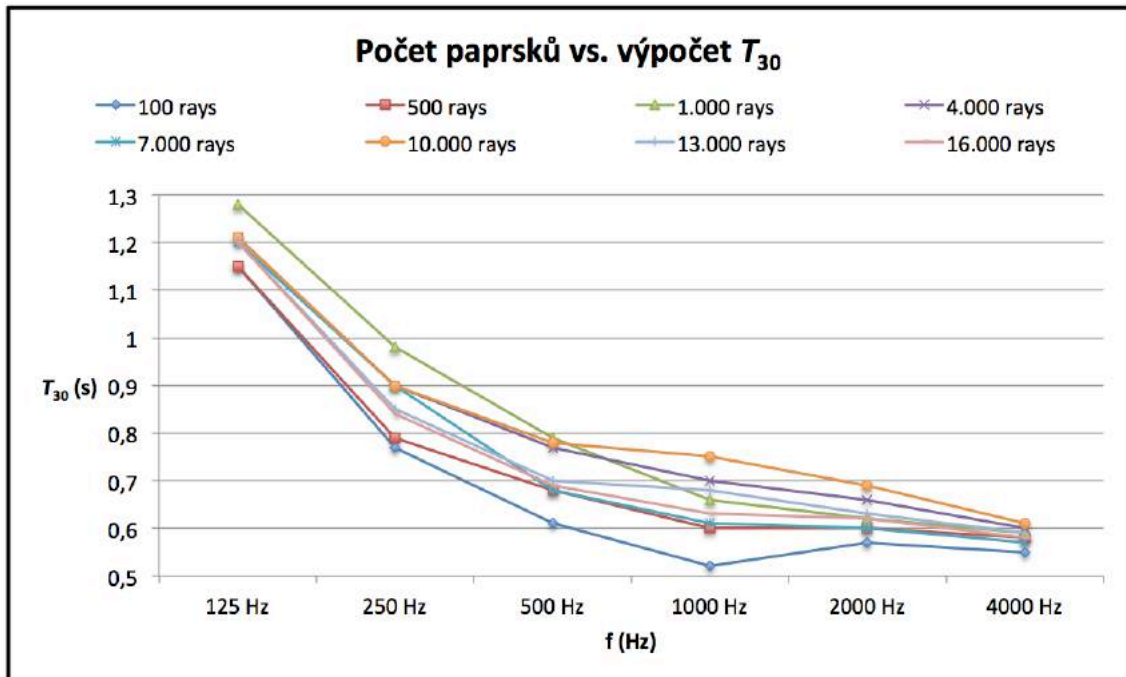
Zdálo by se tedy, že čím více paprsků pro simulaci použijeme, tím lépe. V případě jednoduchého prostoru s několika málo měřicími polohami je to pravda. Ovšem u velkých sálů, kde se pohybujeme v rádech desítek poloh měřicích bodů a u každého paprsku předpokládáme desítky následných odrazů, může nadměrný počet paprsků způsobit v lepším případě neúnosnou výpočetní dobu, v horším případě zahlcení výpočetního výkonu a kolaps celého systému. Proto by měl být počet použitých paprsků volen rozumně vzhledem k tomu, o jaký prostor se jedná, jaké konkrétní parametry chceme získat a jak přesnou simulaci potřebujeme.

V rámci této citlivostní analýzy byla pro nejdůležitější počítané parametry vypočtena závislost jejich výsledků na počtu použitých paprsků tak, aby bylo možné určit, pro výpočty kterých parametrů je počet paprsků kritický a které parametry se obejdou s nižší výpočetní přesností s přijatelnými odchylkami. U všech parametrů bylo uvažováno 100, 500, 1000, 4000, 7000, 10000, 13000 a 16000 paprsků a výsledky byly vyhodnocovány jako prostorový průměr pro 3 měřicí body rovnoměrně rozmístěné v modelu.

11.1.1 Doba dozvuku

Obrázek 64 na následující straně znázorňuje vliv počtu paprsků na výpočet doby dozvuku. Na první pohled je zřejmá odchylka od střední hodnoty při volbě 100, 500 nebo 1000 paprsků. Nutno ovšem uvést, že tyto odchylky dosahují maximálně 0,1 s. Pro srovnání – reálné měření doby dozvuku přesně podle pravidel stanovených normou s použitím zvukoměru třídy I. má maximální přesnost 0,15 s. Z tohoto pohledu lze tedy usuzovat, že v případě, že potřebujeme z akustického modelu získat pouze dobu dozvuku, není nutné použít velké množství paprsků. Nutno ovšem dodat, že toto se týká pouze jednoho měřicího bodu, avšak doba dozvuku je definována jako střední hodnota pro celý prostor. Volba více než 1000 paprsků pro jednu

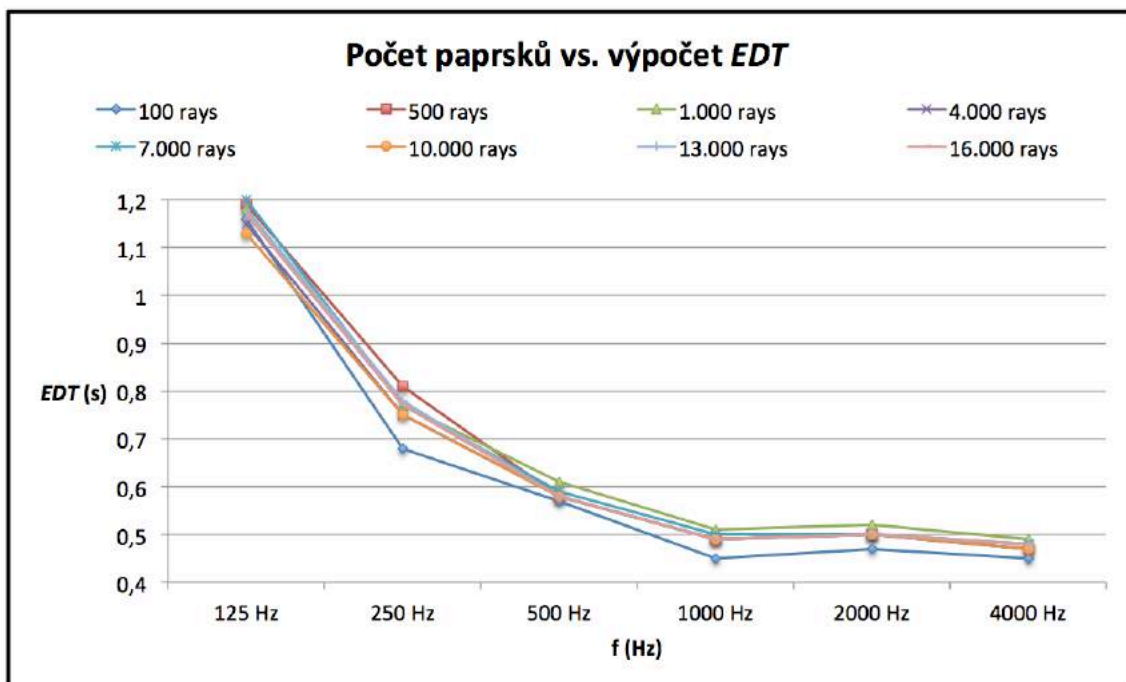
kombinaci polohy zdroje a měřicího bodu se tedy jeví pro získání přesné doby dozvuku jako dostatečná.



Obrázek 64: Vliv počtu paprsků na výpočet T_{30}

11.1.2 Počáteční doba dozvuku EDT

Následující obrázek znázorňuje vliv počtu paprsků na výpočet počáteční doby dozvuku EDT:



Obrázek 65: Vliv počtu paprsků na výpočet EDT

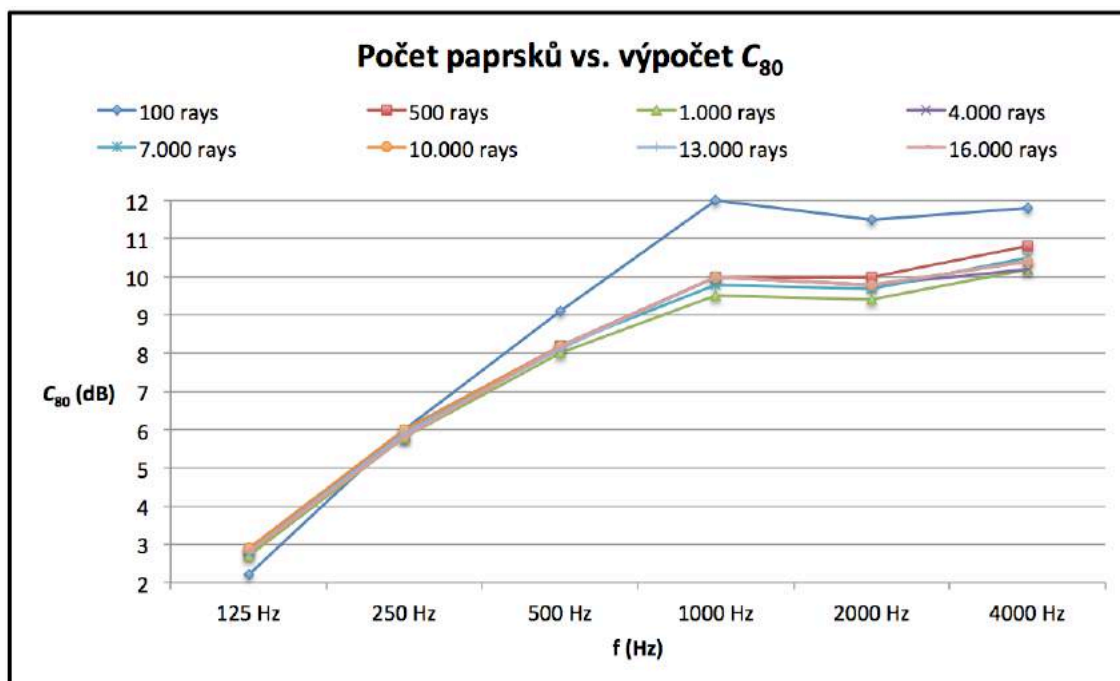
Oproti době dozvuku je odchylka výsledků EDT v závislosti na počtu použitých paprsků zanedbatelná. Důvod je pochopitelný – EDT zkoumá sklon poklesové křivky v prvních 10 ms,

v rámci ray tracingu tedy zkoumá zejména ty paprsky, které do měřicího bodu dorazí od zdroje buď přímo, nebo max. pomocí jednoho odrazu od okolních povrchů. Počet těchto paprsků bude od určitého celkového počtu vždy konstantní, protože měřicí bod má pouze omezený kontrolní objem, kterým zkoumané paprsky prochází.

Jako závěr lze tedy konstatovat, že pro výpočet EDT není počet paprsků kritický. Ovšem pokud v praxi budeme vyhodnocovat tento parametr, pravděpodobně nás budou zajímat i parametry následující, na které už počet použitých paprsků může mít zásadní vliv.

11.1.3 Vyváženost počáteční a pozdní energie

Následující obrázek znázorňuje vliv počtu paprsků na výpočet míry jasnosti C_{80} :



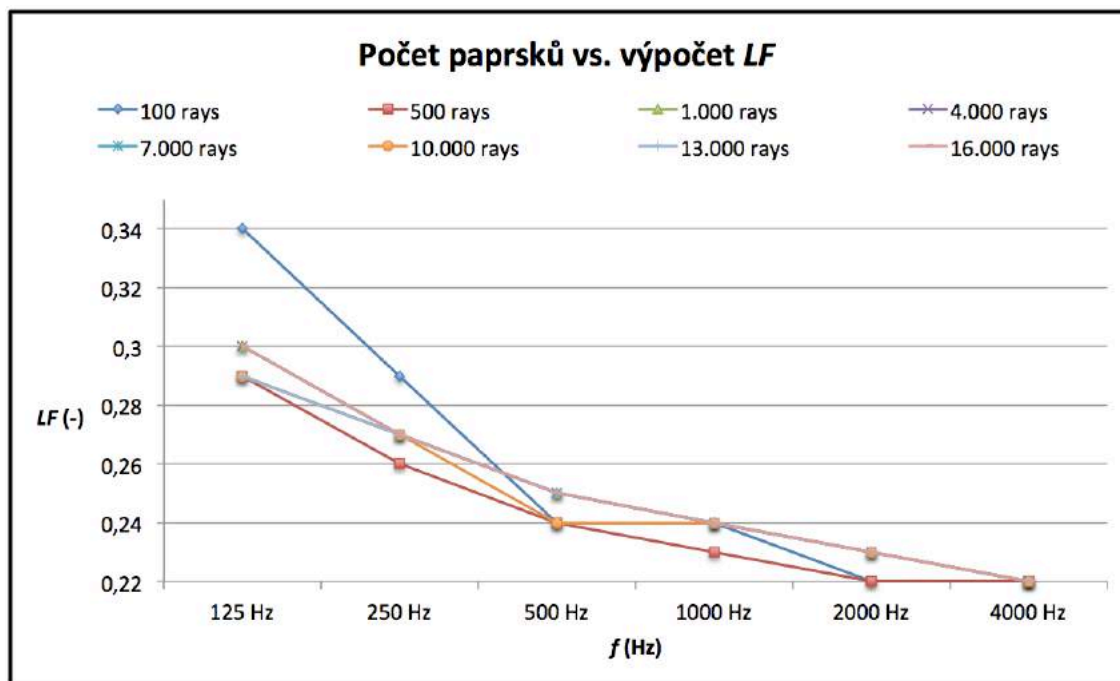
Obrázek 66: Vliv počtu paprsků na výpočet C_{80}

V průběhu výše je zřejmá výrazná odchylka výsledné hodnoty v případě použití pouhých 100 paprsků. Od 500 paprsků výše jsou však odchylky zanedbatelné do 1 dB. Důvod je podobný, jako v případě počáteční doby dozvuku. Při výpočtu parametrů C_{50} , C_{80} a T_5 nás zajímá zejména počáteční energie, která do měřicího bodu přichází přímo od zdroje nebo pomocí prvotních odrazů.

Ostatní parametry ze skupiny vyváženosti počáteční a pozdní energie vykazují podobné chování v závislosti na zvoleném počtu paprsků, proto není nutné je zde taktéž graficky představovat.

11.1.4 Míra počáteční boční energie LF

Následující obrázek znázorňuje vliv počtu paprsků na výpočet míry počáteční boční energie LF :



Obrázek 67: Vliv počtu paprsků na výpočet LF

Oproti parametrům vyváženosti počáteční a pozdní energie je u míry počáteční boční energie LF znatelná odchylka i v případě použití 500 paprsků. Jako vhodné doporučení se tedy jeví použít min. 1000 paprsků pro jeden měřicí bod, ovšem pro víceúčelové sály není tento parametr nikterak stěžejní.

11.2 Volba konkrétního materiálu z databáze

Správné zadání akustických vlastností materiálů je pro přesnost simulace kritická, jak již bylo popsáno v kapitole 9. Problém nastává, uvědomíme-li si, že všechny volně dostupné hodnoty činitele akustické pohltivosti materiálů pochází z různých zdrojů, od různých výrobců, autorů a na základě rozdílných rešerší. V různých zdrojích se tedy může tentýž materiál objevit s rozdílnými hodnotami zvukové pohltivosti, které se mohou vzájemně lišit až o desítky procent. Dalším cílem citlivostní analýzy bylo tedy zjistit, jaký vliv na výsledky simulace bude mít volba konkrétního materiálu dostupného z výchozí databáze ODEONU. Pro srovnání byl uvažován sádkartón, který byl v rámci zkoumaného sálu použit na většinu plochy stěn a stropu. Výchozí kalibrovaný materiál byl nahrazen těmito alternativami z databáze:

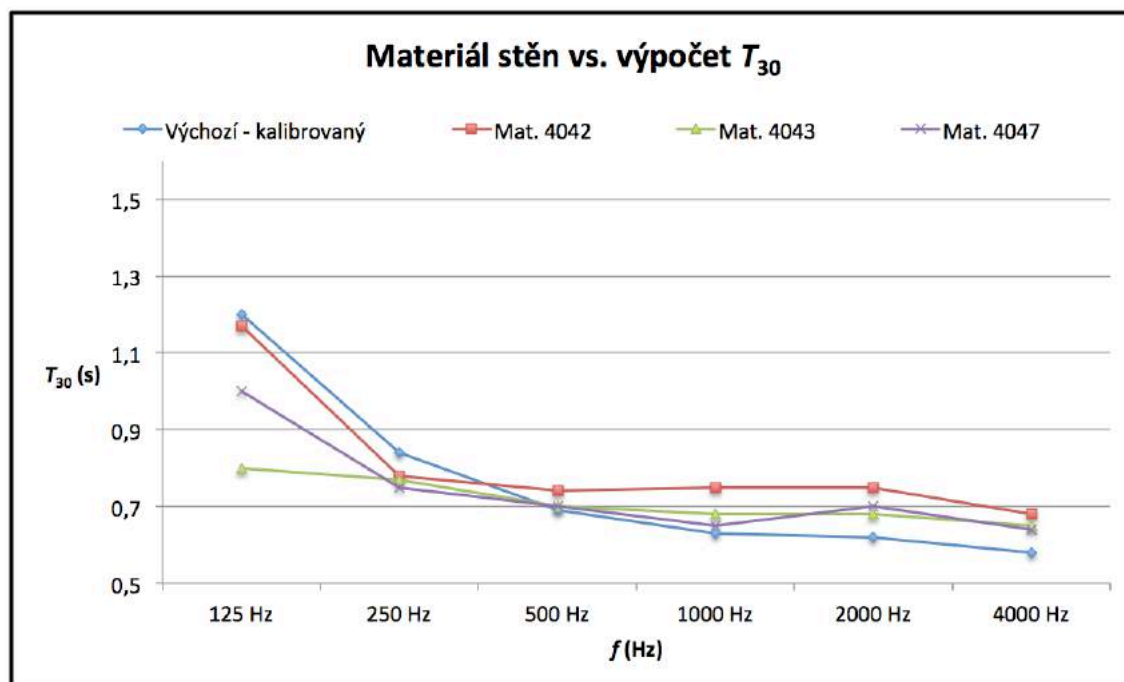
Tabulka 31: Zvuková pohltivost materiálů z rozdílných zdrojů

Materiál	$\alpha_{125 \text{ Hz}}$	$\alpha_{250 \text{ Hz}}$	$\alpha_{500 \text{ Hz}}$	$\alpha_{1000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{2000 \text{ Hz}}$	$\alpha_{4000 \text{ Hz}}$
Výchozí SDK – kalibrovaný na základě reálného měření	0,07	0,065	0,065	0,067	0,106	0,140
Materiál 4042 – 13 mm SDK bez minerální izolace – autor A	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
Materiál 4043 – 13 mm SDK s vrstvou minerální izolace – autor A	0,3	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
Materiál 4047 – 13 mm SDK bez minerální izolace – autor B	0,16	0,15	0,07	0,08	0,05	0,06

Už bez grafické interpretace jsou zřejmé zásadní rozdíly mezi definovanými vlastnostmi zvolených materiálů. Velmi často se při reálném návrhu prostorové akustiky potýkáme s nedostatkem informací o tom, jak prostor momentálně vypadá, nebo jak bude vypadat po plánovaných úpravách. Pro laika akusticky nepodstatná informace, např. zda bude za vrstvou sádkartonu minerální izolace či nikoliv, nebo jak tlusté SDK desky budou použity, může způsobit kritické chyby v simulovaných výsledcích, které mohou mít až právní následky v případě, že bude návrh posuzován úřadem pro hygienu a prostor bude vyhodnocen jako akusticky nevyhovující.

11.2.1 Doba dozvuku

Následující obrázek znázorňuje vliv konkrétního zvoleného materiálu SDK na výpočet doby dozvuku:



Obrázek 68: Vliv konkrétně zvoleného materiálu na výpočet T_{30}

Při porovnání vypočtené doby dozvuku pro materiály 4042 a 4043 vidíme zásadní odchylky zejména na nízkých frekvencích. Diference zde dosahují i více než 0,4 s, což je prakticky celá

šířka optimálního pásma doby dozvuku dle normy [22] pro jakýkoliv typ prostoru. Špatná informace o tom, zda bude či nebude minerální izolace za SDK deskami použita má tak na simulované výsledky vliv prakticky „vyhovuje/nevyhovuje normě“.

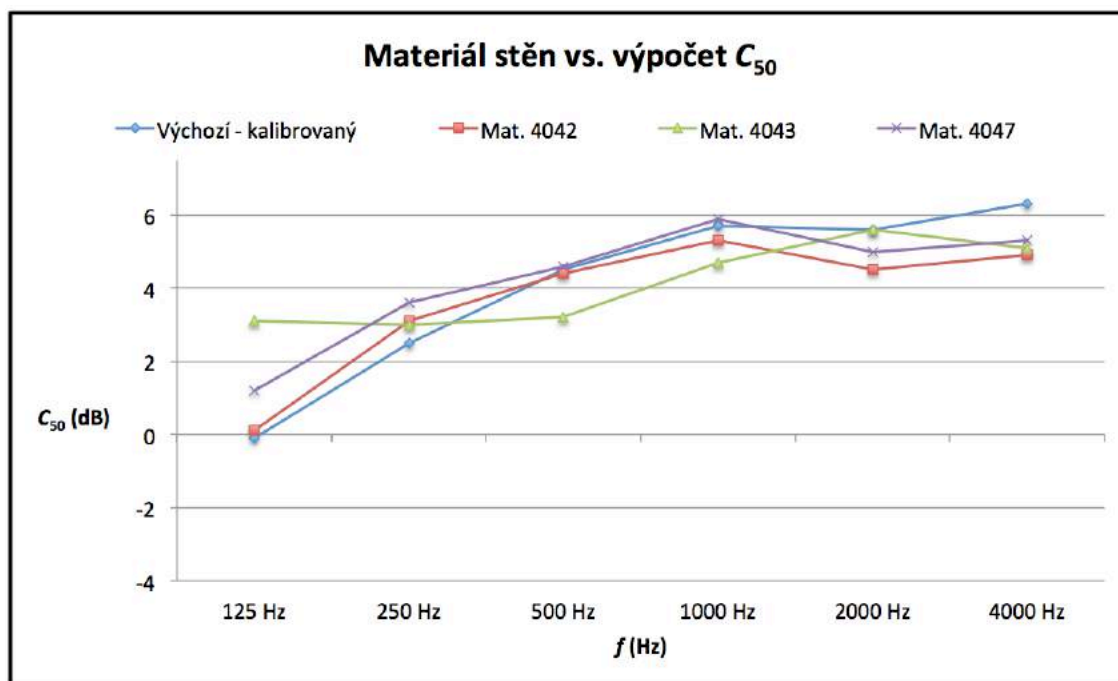
Při porovnání materiálů 4042 a 4047, kdy se jedná prakticky o totožné skladby, pouze od různých autorů, můžeme i zde pozorovat odchylky větší než 0,2 s. Jako jediný závěr lze vyvodit doporučení detailního prověření informací ohledně skladby jednotlivých materiálů před zahájením simulace, aby byl projektant vyvážen zodpovědností v případě, že nedojde k přesnému dodržení stavu, se kterým v rámci simulací počítá.

11.2.2 Počáteční doba dozvuku EDT

Výsledné hodnoty EDT vykazují v případě vlivu konkrétního zvoleného materiálu téměř totožný trend, jako právě analyzovaná doba dozvuku, proto není potřeba je zde graficky představovat.

11.2.3 Vyváženost počáteční a pozdní energie

Následující obrázek znázorňuje vliv konkrétního zvoleného materiálu SDK na výpočet míry zřetelnosti C_{50} :



Obrázek 69: Vliv konkrétně zvoleného materiálu na výpočet C_{50}

V případě míry zřetelnosti je znatelný pouze rozdíl v případě, kdy je použita vrstva minerální izolace za sádkartonem a kdy nikoliv. Rozdíly těchto dvou případů nabývají v extrému až 3 dB, což je rozdíl postřehnutelný i nezkušeným posluchačem. V případě alternace konkrétního typu sádkartonu a jeho hodnot činitele zvukové pohltivosti od různých autorů jsou již rozdíly do 1 dB a tedy přijatelné.

Pro ostatní parametry této kategorie – C_{80} a T_S vykazuje závislost podobný trend, není třeba je tedy taktéž graficky znázorňovat. Jen uvedme, že pro míru jasnosti C_{80} jsou rozdíly mezi variantami bez a s minerální izolací ještě o něco výraznější.

Závěrem lze pro zkoumání vyváženosti počáteční a pozdní energie pouze doporučit kontrolovat kvalitu vstupních informací o použitých materiálech, zejména o vrstvách minerální izolace za nimi.

11.2.4 Míra počáteční boční energie LF

Vliv konkrétního materiálu na výsledné hodnoty LF nevykazuje žádné výrazné odchylky a pro tento parametr zřejmě není volba konkrétního zdroje kritická.

11.3 Pohltivost publika

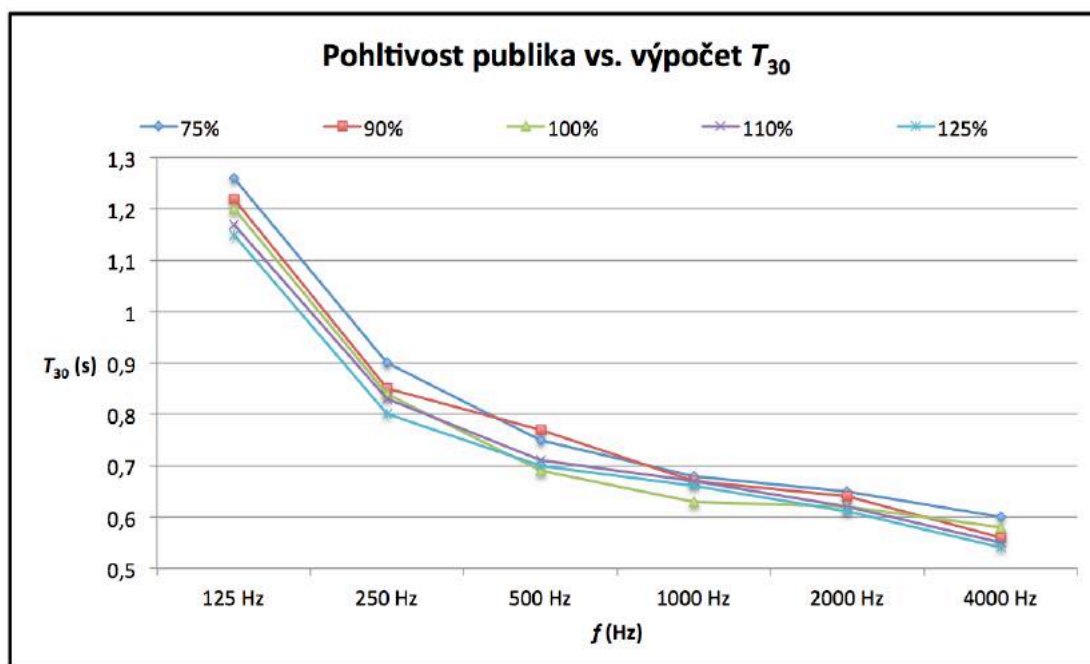
Otázka volby typu aproximace publika klíny či jednodílnou plochou už byla představena v rámci kapitoly 9. Nyní se podíváme na případ, kdy z libovolného neznámého důvodu budeme v rámci simulace uvažovat jinou zvukovou pohltivost publika, než tomu bude ve skutečnosti.

Typickým příkladem může být sál bez prostoru šatny. V zimním období tak budou návštěvníci přímo do sálu nosit silné bundy a zimní kabáty, které po usazení na místo zavěsí na opěradlo sedadla. Každá tepelná izolace, tedy i ta v zimním kabátu či bundě, funguje částečně jako zvukově pohltivá látka díky svému pórovitému charakteru. Když uvážíme, že kabátů bude při naplnění prostoru i několik stovek, je to poměrně velká zvuková pohltivost, se kterou nebylo v rámci návrhu prostorové akustiky počítáno, a která může způsobit nežádoucí přetlumení prostoru zejména na vyšších frekvencích.

V rámci citlivostní analýzy byla jako referenční zvolena zvuková pohltivost lidského publika na tvrdých sedadlech v případě, kdy na 1 m^2 připadají dvě sedící osoby. Ta byla následně ponížena, resp. navýšena o 10% a 25% a byl sledován vliv této změny na prostorový průměr parametrů pro 3 měřicí polohy.

11.3.1 Doba dozvuku

Následující obrázek znázorňuje vliv zvolené zvukové pohltivosti publika na výpočet doby dozvuku:



Obrázek 70: Vliv pohltivosti publika na výpočet T_{30}

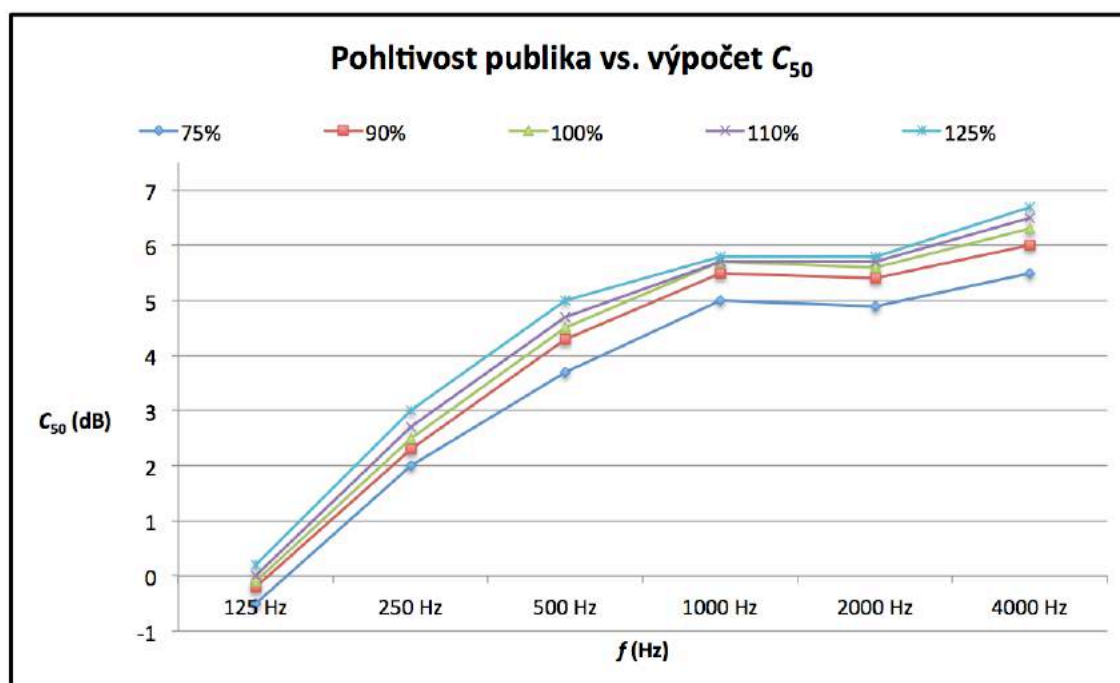
Z jednotlivých průběhů doby dozvuku je zřejmé, že v rámci konkrétního posuzovaného sálu způsobí i 25% chyba v zadání pohltivosti publika odchylku maximálně 0,05 s, což je běžným posluchačem nepostřehnutelný rozdíl. Lze tak usuzovat, že pro výpočet doby dozvuku konkrétní hodnoty činitele zvukové pohltivosti publika nejsou nijak kritické.

11.3.2 Počáteční doba dozvuku *EDT*

Vliv zvukové pohltivosti publika na počáteční dobu dozvuku *EDT* je o něco výraznější, než v případě klasické doby dozvuku. Avšak ani hodnoty maximální odchylky do 0,08 s nejsou v tomto případě posluchačem postřehnutelné.

11.3.3 Vyváženost počáteční a pozdní energie

Následující obrázek znázorňuje vliv zvolené zvukové pohltivosti publika na výpočet míry zřetelnosti C_{50} :



Obrázek 71: Vliv pohltivosti publika na výpočet C_{50}

Ačkoliv u doby dozvuku změna zvukové pohltivosti publika způsobovala nepostřehnutelné odchylky, u parametrů vyváženosti počáteční a pozdní energie je již vliv znatelnější. V případě odchylky pohltivosti o 25% může dojít k rozdílům až 1 dB, což v případě navrhování precizní akustiky koncertního sálu může způsobit rozdíl „vyhovuje/nevhovuje“. Pro potřeby víceúčelových sálů ovšem není rozdíl 1 dB nijak zásadní a dá se bez obtíží tolerovat.

11.3.4 Míra počáteční boční energie *LF*

U počáteční boční energie nebyla zjištěna žádná zásadní závislost jejich výsledných hodnot na konkrétní zvolené zvukové pohltivosti publika. Dá se tedy usuzovat, že pro parametr *LF* nejsou přesné hodnoty pohltivosti kritické.

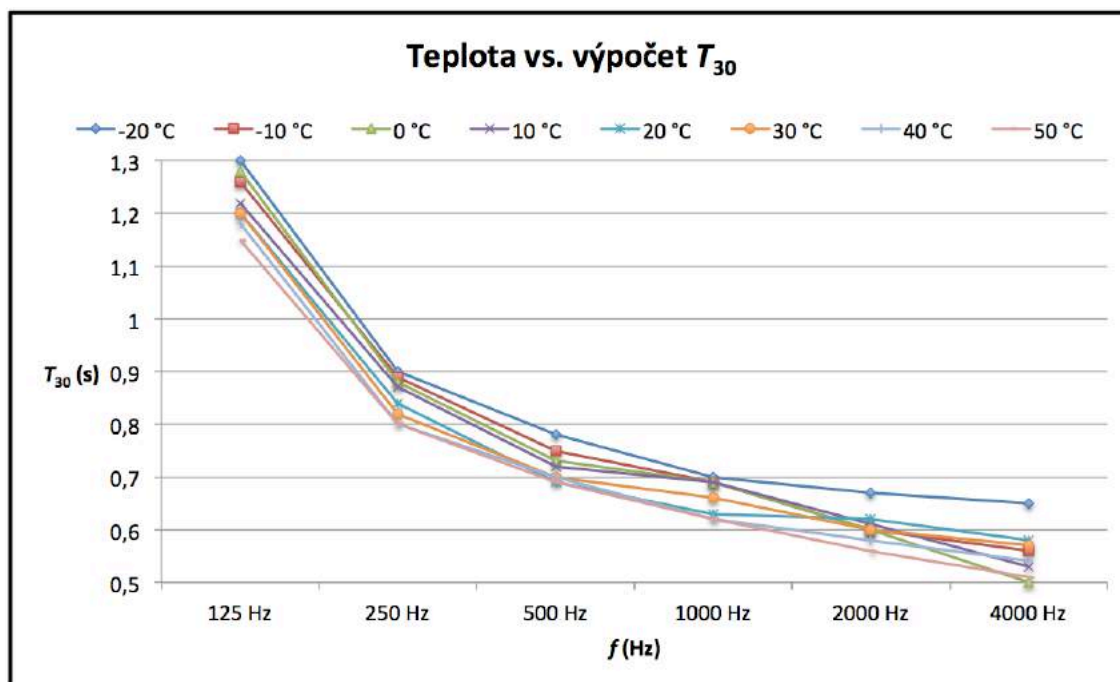
11.4 Teplota vzduchu

Během navrhování prostorové akustiky musíme uvažovat mimo jiné i meteorologické podmínky. Teplota přítomného vzduchu je jedním z parametrů, který při velkých změnách způsobuje výrazné odchylky doby dozvuku. Typickou chybou, která může takto vzniknout, je proces optimalizace, v rámci kterého je v zimním období proměřen nevytopený sál s teplotou vzduchu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě, že tento stav není v rámci následujících výpočtů korigován na standardní podmínky, v rámci kterých se počítá s teplotou $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, může toto opomenutí způsobit kritické nepřesnosti výpočtů i efektivitu následně navržené optimalizace.

V rámci této citlivostní analýzy se uvažovaly teploty od -20 do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a byl sledován jejich vliv na výsledky jednotlivých parametrů. Relativní vlhkost vzduchu byla pro všechny teploty konstantní – 50%. Její vliv na výsledky byl posuzován samostatně a bude popsán v rámci následující podkapitoly.

11.4.1 Doba dozvuku

Následující obrázek znázorňuje vliv uvažované teploty vzduchu na výpočet doby dozvuku:



Obrázek 72: Vliv teploty vzduchu na výpočet T_{30}

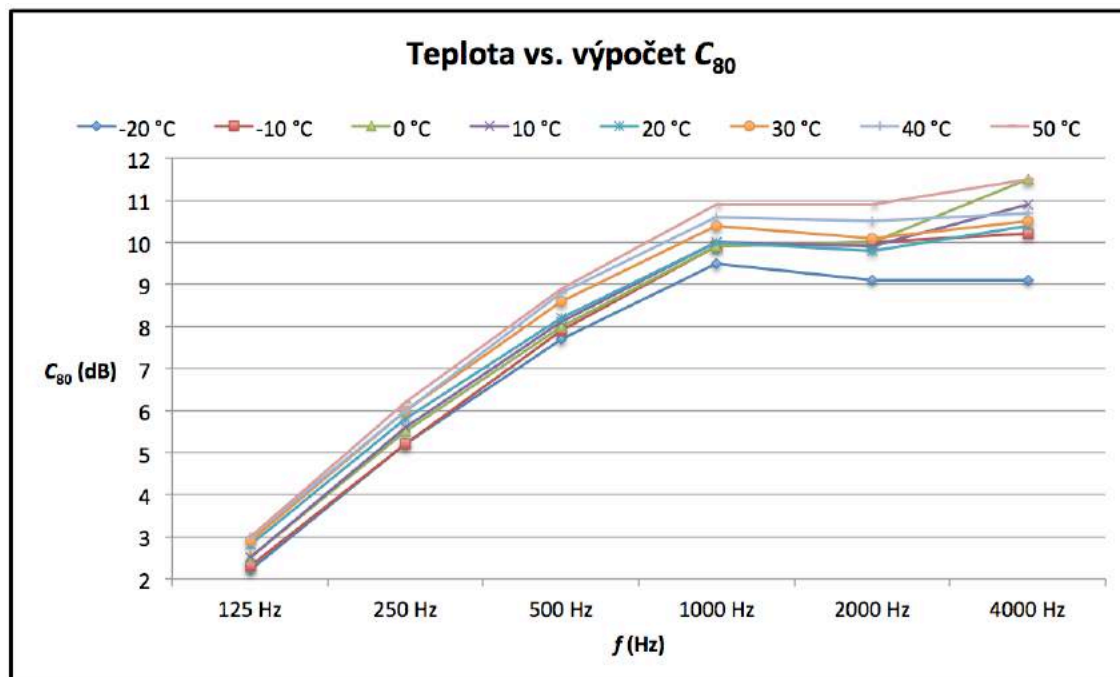
Z průběhů výše je jasně zřetelný trend, kdy s rostoucí teplotou doba dozvuku klesá. Důvod je skrytý v samotném fyzikálním principu pohlcování zvuku ve vzduchu. Při vyšší teplotě mají částice vzduchu větší vnitřní energii a kmitají rychleji a dál od své rovnovážné polohy. Od intenzity těchto kmitů se pak odvíjí tření, které vzniká mezi jednotlivými vrstvami vzduchu při šíření zvukové vlny. Zvuková energie se částečně mění na třecí teplo a tím dochází k pohlcování zvuku. Míra tohoto pohlcování je tedy přímo úměrná teplotě vzduchu, ve kterém se zvuk šíří. Tento vliv je zřetelný logicky zejména na vyšších frekvencích, neboť zde jsou částice vzduchu zvukem stlačovány nejrychleji. V případě rozdílu teplot o 40 K, tedy případu měření v $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následného vyhodnocování pro $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tak může dojít k odchylkám až 0,1 s.

11.4.2 Počáteční doba dozvuku *EDT*

Počáteční doba dozvuku ze své podstaty vykazuje stejný trend jako klasická doba dozvuku, neboť se jedná o totožný fenomén. Rozdíly ovšem zde nejsou tak znatelné a v rozmezí -20 až +50 °C je lze bezpečně zanedbat.

11.4.3 Vyuváženost počáteční a pozdní energie

Následující obrázek znázorňuje vliv uvažované teploty vzduchu na výpočet míry jasnosti C_{80} :

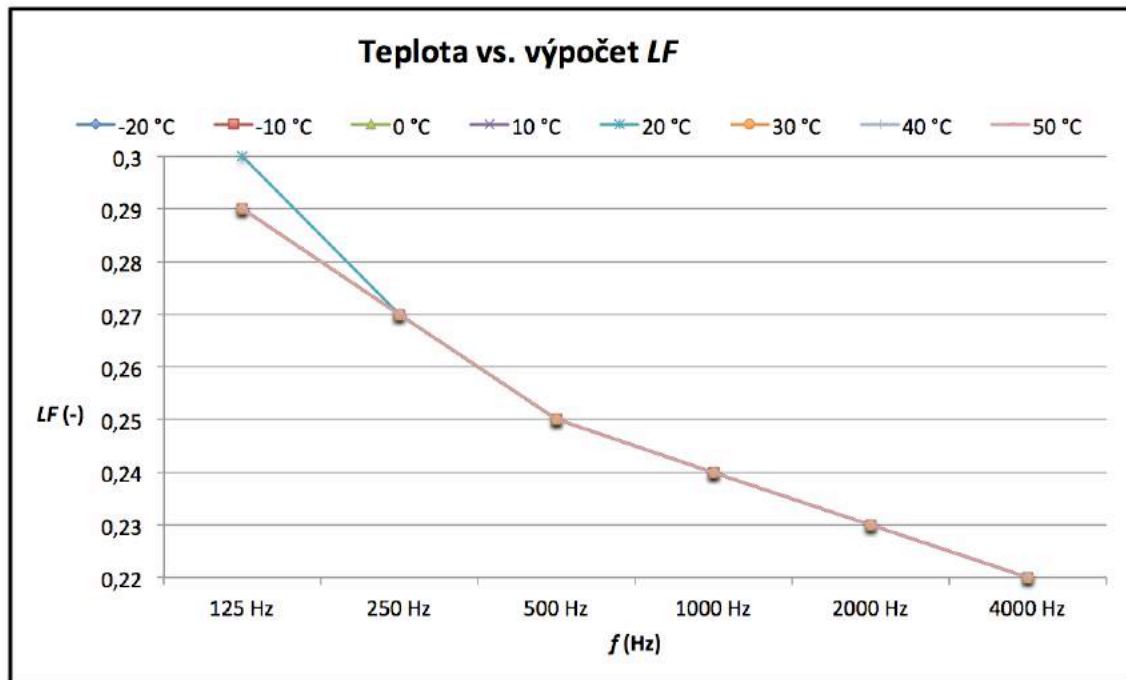


Obrázek 73: Vliv teploty vzduchu na výpočet C_{80}

Na obrázku výše je zřetelný výrazný pokles míry jasnosti mezi teplotami -10 a -20 °C. Hodnoty pro ostatní teploty vzduchu se pak neliší o více jak 1 dB. Výraznější je závislost na vyšších frekvencích, stejně jako je tomu u doby dozvuku. Opět se potvrzuje závěr, že parametry zřetelnosti a jasnosti mluvené, resp. hudební produkce jsou přímo svázány s průběhem doby dozvuku.

11.4.4 Míra počáteční boční energie LF

Následující obrázek znázorňuje vliv uvažované teploty vzduchu na výpočet míry počáteční boční energie LF:



Obrázek 74: Vliv teploty vzduchu na výpočet LF

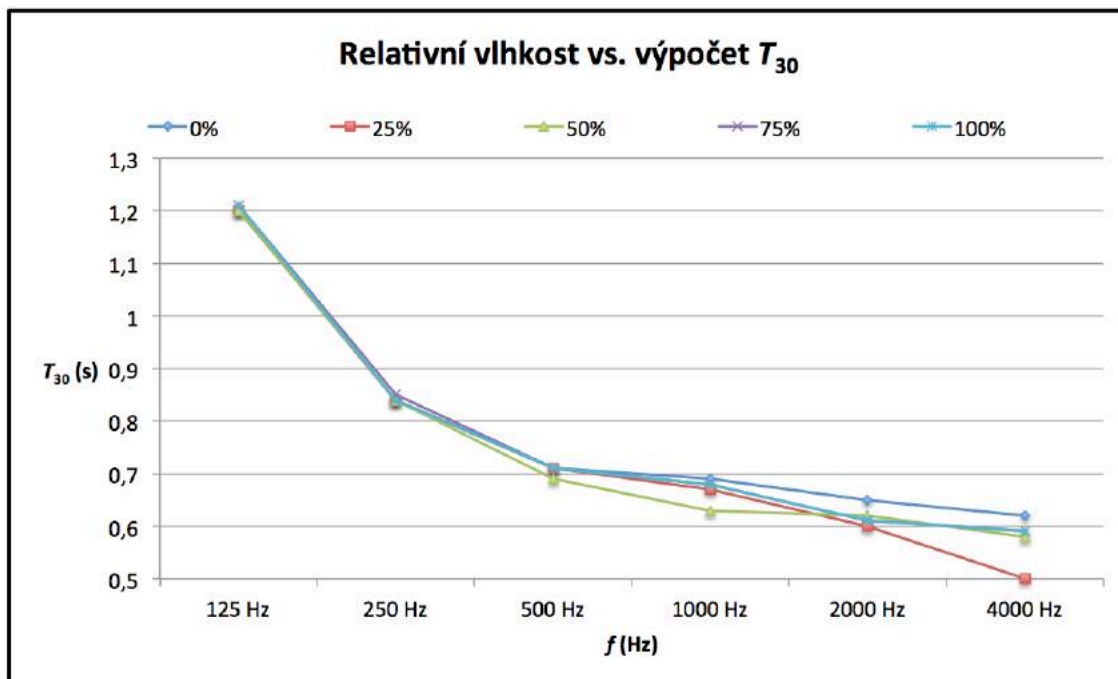
Z průběhů výše je zřejmý unikátní jev – míra počáteční boční energie LF není kromě jediné konkrétní teploty a jediného oktávového frekvenčního pásma vůbec závislá na teplotě vzduchu. Tento závěr by stálo zato ověřit dalšími měřeními a simulacemi jiných prostorů, aby mohl být prohlášen jako obecně platný či vyvrácen.

11.5 Vlhkost vzduchu

Stejně tak jako teplota, i vlhkost přítomného vzduchu ovlivňuje míru pohlcování zvuku v něm. A stejně tak jako v případě teploty, i špatné uvažování vlhkosti vzduchu během měření a simulací může způsobit nepřesnosti výsledků. Typické jsou pro tvorbu takových chyb například klimatizované prostory. Klimatizace dokáže efektivně a rychle schladit prostor i velkého objemu, ovšem velmi často za cenu současného vysušení vzduchu, klidně i pod hodnoty 20% relativní vlhkosti. Po vypnutí klimatizačního systému (například aby soustavné hučení nerušilo právě probíhající produkci) se relativní vlhkost vlivem přítomnosti návštěvníků opět zvýší, v letních dnech klidně i na hodnoty kolem 75%. Tato podkapitola má za cíl zjistit, zda jsou tyto změny zásadní pro přesnost simulovaných výsledků či nikoliv.

11.5.1 Doba dozvuku

Následující obrázek znázorňuje vliv uvažované relativní vlhkosti vzduchu na výpočet doby dozvuku:



Obrázek 75: Vliv relativní vlhkosti vzduchu na výpočet T_{30}

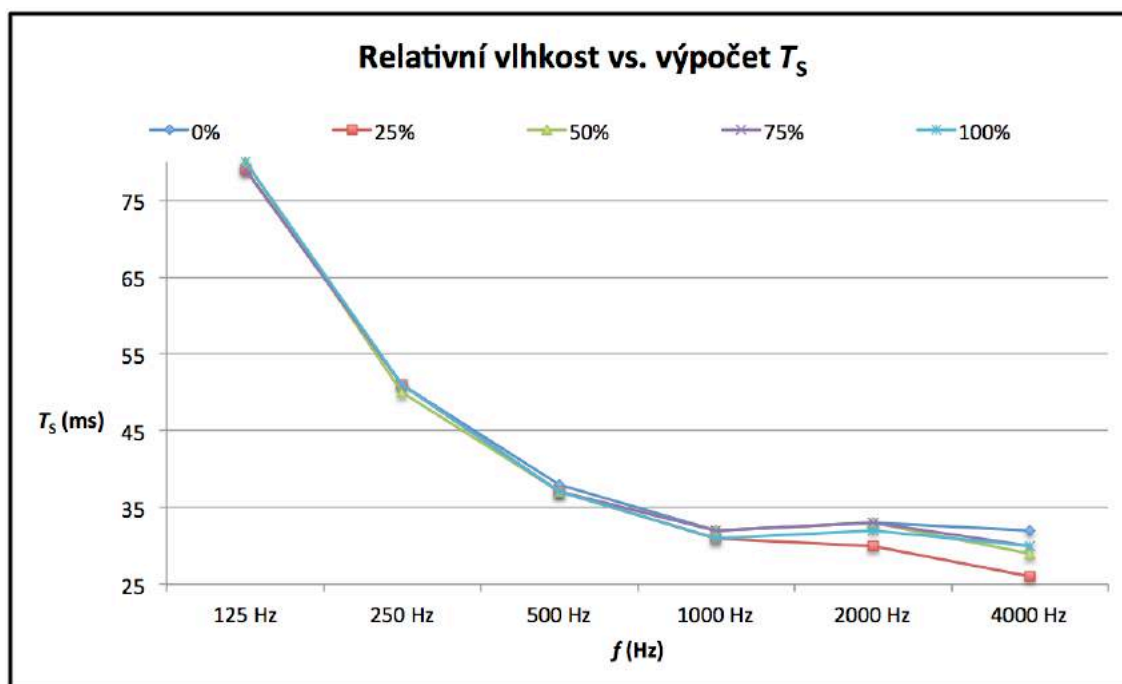
Z průběhů je zřejmé, že vlhkost vzduchu má na dobu dozvuku podstatně menší vliv, než uvažovaná teplota. Zajímavým úkazem je zde ovšem odchylka v oktávovém pásmu 4 kHz pro relativní vlhkost vzduchu 25%. Tento jev se opakuje u většiny zkoumaných parametrů a jedná se pravděpodobně o specifickou anomálii vzniklou kombinací konkrétního objemu uzavřeného prostoru a poloh měřicích bodů. Přínosné by bylo tento závěr potvrdit či vyvrátit simulací jiného podobného sálu.

11.5.2 Počáteční doba dozvuku EDT

Průběhy počáteční doby dozvuku v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu jsou velmi podobné těm u klasické doby dozvuku, proto je zde nebudeme graficky představovat. Kromě oktávového pásma 4 kHz jsou odchylky pro jednotlivé úrovně relativní vlhkosti prakticky nulové.

11.5.3 Vyváženost počáteční a pozdní energie

Obrázek na následující straně znázorňuje vliv uvažované relativní vlhkosti vzduchu na výpočet času těžiště T_5 . Opět se ukazuje úzká vazba mezi dobou dozvuku a všemi parametry této kategorie. Pro ostatní parametry – C_{50} a C_{80} – platí stejný závěr, tedy že vyjma oktávového pásma 4 kHz nejsou prakticky vůbec závislé na relativní vlhkosti vzduchu.

Obrázek 76: Vliv relativní vlhkosti vzduchu na výpočet T_s

11.5.4 Míra počáteční boční energie LF

Stejně jako ve většině ostatních případů v rámci této citlivostní analýzy se ukazuje, že míra počáteční boční energie LF není nijak výrazně závislá ani na relativní vlhkosti vzduchu.

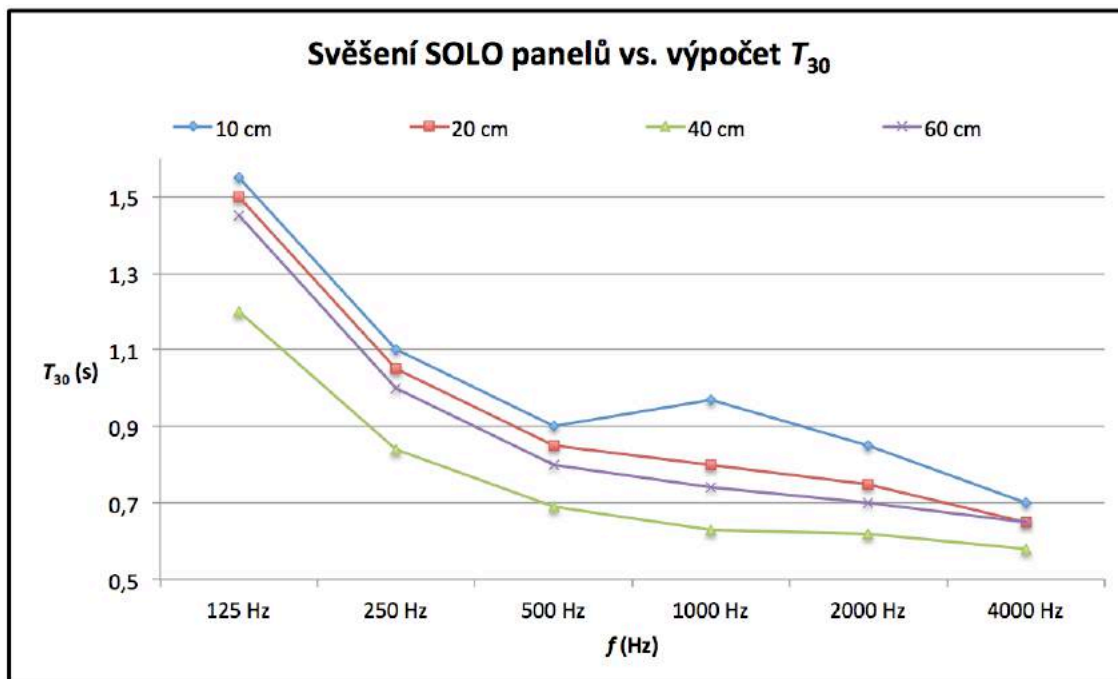
11.6 Výška svěšení solitérních stropních panelů

Posledním faktorem, který byl v rámci analýzy zkoumán, byla výška svěšení solitérních stropních panelů u varianty optimalizace číslo 3. Kromě citlivostního charakteru, kde sledujeme přesnost obsluhy programu při tvorbě 3D modelu a přímý vliv této přesnosti na simulované výsledky, je svěšení solitérních panelů i částečně součástí samotného návrhu prostorové akustiky. Změnou výšky zavěšení se výrazně mění poměr zvukové energie, který je panely pohlcován i z rubové strany, a panel jako celek tak mění svou celkovou pohltivost A . Spolu se změnou vzdálenosti těchto aktivních ploch od měřících bodů dochází k výraznému ovlivňování simulovaných výsledků.

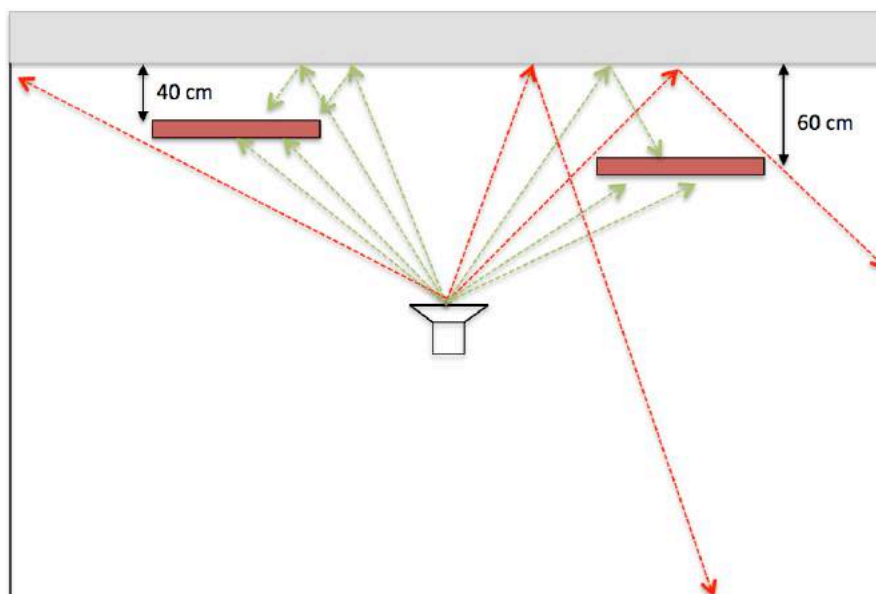
11.6.1 Doba dozvuku

Obrázek 77 na následující straně znázorňuje vliv uvažovaného svěšení solitérních stropních panelů na výpočet doby dozvuku. Až do výšky svěšení 40 cm od stropu celková pohltivost systému se zvětšující se vzduchovou mezerou mezi panely a stropem zřetelně stoupá a účinně snižuje dobu dozvuku. Zajímavý zlom nastane mezi 40 a 50 cm svěšení, kdy se doba dozvuku začne opět zvyšovat. To může být vysvětleno tím, že při mezeře mezi stropem a panely větší než 0,5 m se vlivem rozšířeného úhlu odrazu zvukové vlny pohltí méně zvukové energie a větší část vlny projde nerušeně kolem plochy panelu. Tento princip je naznačen na obrázku 78.

Jako závěr tedy lze uvést, že výškou zavěšení můžeme efektivně korigovat účinnost pohlcování solitérních panelů. Mezera mezi stropem a panely by však neměla být větší, než 50 cm, kdy už dochází ke snížení funkce. V tomto případě bude ekonomičtější využít méně panelů zavěšených blíže ke stropu.



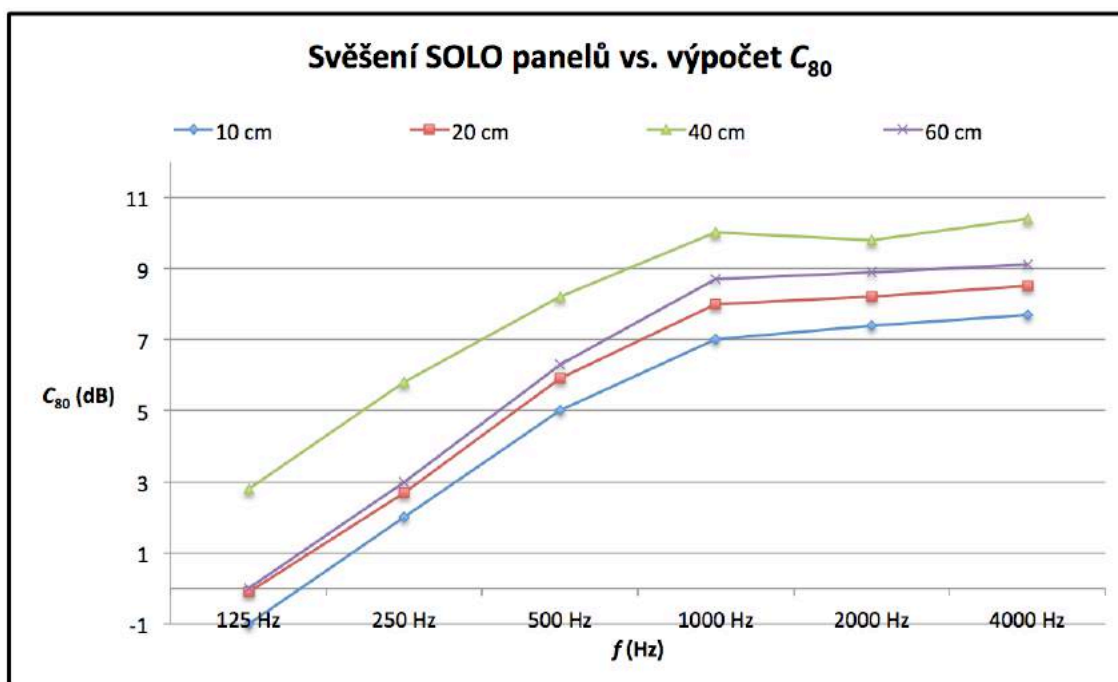
Obrázek 77: Vliv svěšení solitérních stropních panelů na výpočet T_{30}



Obrázek 78: Snížení pohltivé funkce závěsných panelů

11.6.2 Vyvážení počáteční a pozdní energie

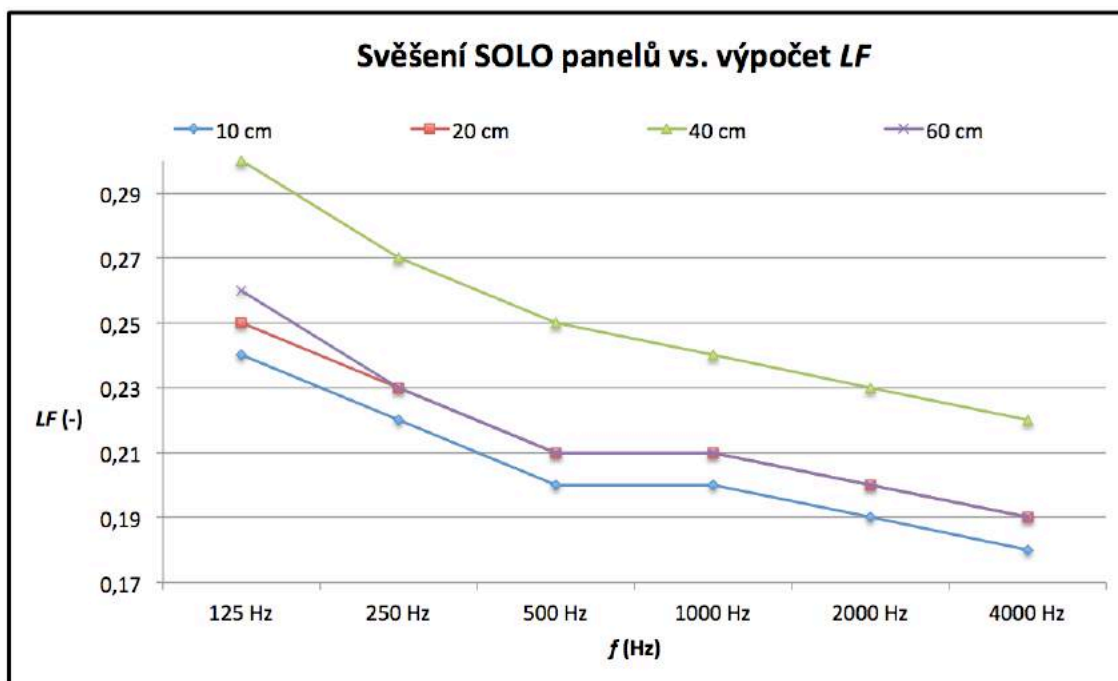
Obrázek 79 na následující straně znázorňuje vliv uvažovaného svěšení solitérních stropních panelů na výpočet míry jasnosti C_{80} . Pro všechny parametry této skupiny se jako optimální jeví zavěšení 40 cm od stropu, které zaručuje nejlepší hodnoty u všech parametřů. Nutno dodat, že tento závěr platí jen pro konkrétní námi posuzovaný prostor. V případě jiného sálu, především s jinou výškou stropu, bude nutné zjištění ověřit.



Obrázek 79: Vliv svěšení solitérních stropních panelů na výpočet C_{80}

11.6.3 Míra počáteční boční energie LF

Následující obrázek znázorňuje vliv uvažovaného svěšení solitérních stropních panelů na výpočet míry počáteční boční energie LF :



Obrázek 80: Vliv svěšení solitérních stropních panelů na výpočet LF

V průběžích výše je vidět poměrně výrazný vliv výšky zavěšení stropních panelů na parametr LF . Je to tak jeden z mála faktorů, u kterého by měl být vliv na míru počáteční boční energie ověřován.

11.7 Shrnutí

Následující tabulka představuje shrnutí závěrů získaných v rámci proběhlé citlivostní analýzy.

		Vliv faktoru na parametr			Anomálie	Doporučení
		T_{30} , EDT	C_{50} , C_{80} , T_S	LF		
Faktor	Počet paprsků	Mírný	Mírný	Mírný	LF vyžaduje k přesnosti více paprsků, než ostatní parametry	Použití min. 1000 paprsků pro kombinaci jednoho zdroje a posluchače
	Konkrétní materiál	Výrazný	Mírný	Žádný	---	Důkladné prověření vstupních údajů
	Aproximace publika	Žádný	Mírný	Žádný	---	Při posuzování jasnosti a zřetelnosti dbát na správné nastavení pohltivosti publika
	Teplota	Mírný	Mírný	Žádný	Výrazné zhoršení jasnosti a zřetelnosti na vysokých frekvencích při -20 °C	Při posuzování jasnosti a zřetelnosti uvažovat rozdíl teploty při měření a používání prostoru, pro T_{30} nepodstatné.
	Vlhkost	Mírný	Žádný	Žádný	Anomálie na 4 kHz pro rel. vlhkost 25%	Kontrolovat vyšší frekvence, jinak nepodstatné.
	Svěšení SOLO panelů	Výrazný	Výrazný	Výrazný	Do výšky svěšení 50 cm zlepšení pohltivé funkce, poté rapidní pokles	Výškou svěšení lze vhodně korigovat účinnost pohlcování. Při mezeře 50 cm a výše výhodnější volit méně panelů a menší svěšení od stropu.

12. Závěr

Předkládaná diplomová práce poskytuje široký průřez prostorovou akustikou nejen víceúčelových sálů. V dohledné budoucnosti se dá očekávat pokračování současného trendu a rozšiřování aplikace akustických materiálů v rámci interiérových návrhů kulturních a setkávacích prostor pro zajištění lepších akustických podmínek. Postup optimalizace zde představený může sloužit jako vzor pro další prostory.

V první, teoretické části práce byly popsány jednotlivé metody měření impulsové odezvy v akustice. Byly definovány jednotlivé typy měřicích signálů spolu s jejich výhodami a nevýhodami. Pro víceúčelové sály a podobné prostory lze jako závěr uvést, že v případě zkoumání pouze doby dozvuku bohatě postačí základní impulsní metody. Je ovšem třeba dbát na dostatečné vybudování prostoru o min. 20 dB nad úroveň šumu pozadí a tomuto omezení přizpůsobit volený zdroj impulsního zvuku. U sofistikovanějších analýz ostatních parametrů se doporučuje použít signály *MLS* nebo *TSP*, které už ovšem vyžadují kompletní měřicí řetězec se všesměrovým reproduktorem a signálovým generátorem.

V další části byly postupně představeny jednotlivé objektivní akustické parametry, které lze ze správně naměřené impulsové odezvy uzavřeného prostoru získat. U každého z nich je kromě matematické definice uveden i jejich popis subjektivního vjemu posluchačem tak, aby ze získaných zpětných vazeb uživatelů prostoru bylo možné odvodit, jakých konkrétních parametrů se bude následná optimalizace prostorové akustiky týkat. U každého parametru je také uvedeno doporučené rozmezí jeho hodnot a významnost při posuzování akustického komfortu víceúčelových sálů.

Kapitola 4 poté srovnává jednotlivé metody výpočtů užívané v prostorové akustice. Jsou představeny 2 základní přístupy – empirické výpočty podle Eyringovy rovnice a počítačová simulace na 3D modelu. U obou metod jsou vystiženy jejich úskalí, výhody i nevýhody, a jako závěr je pro víceúčelové sály doporučeno pro zaručení co nejpřesnějších výsledků obě metody kombinovat.

Následující část pojednává o zakotvení témat prostorové akustiky v legislativě České republiky. Jsou představeny nejdůležitější technické normy řešící dané téma, důraz je kladen na ty obsahující zmínky o víceúčelových sálech. Vzhledem k tomu, že v současnosti neexistuje žádná zákonná povinnost dodržovat akustické limity ve veřejných budovách (vyjma vzdělávacích prostor), je závěrem kapitoly řešerše obsahů norem, na jejímž základě bylo doporučeno optimální pásmo doby dozvuku pro víceúčelové sály a kulturní domy.

Další část práce se již věnuje konkrétnímu víceúčelovému sálu ve středočeské obci Bechlín, na kterém bude provedena variantní optimalizace prostorové akustiky. Zkoumaný prostor je detailně popsán včetně průběhu reálného měření doby dozvuku, které v něm proběhlo na jaře roku 2016. Výsledky měření stávajícího stavu jsou závěrem vyhodnoceny tak, aby posloužily jako vstupní data pro proces počítačové simulace. Tomu jsou věnovány kapitoly 8 a 9, které detailně popisují celý proces simulace prostorové akustiky od tvorby 3D modelu, přes import do simulačního programu, kalibraci, volbu měřicích bodů, až po získání všech dostupných objektivních akustických parametrů, které nemohly být vzhledem k použité metodě reálného měření získány přímo. V celém procesu jsou sledovány kritické body a závěrem je shrnuto, čemu je během tvorby modelu a simulace nezbytné věnovat dostatečnou pozornost pro zachování přesnosti simulovaných výsledků.

Na základě získaných informací o stávajícím stavu prostorové akustiky zkoumaného sálu jsou v kapitole 10 navrženy čtyři různé varianty jeho optimalizace. Záměrně jsou voleny rozdílné přístupy uvažující profesionální i neprofesionální řešení, vyžadující i nevyžadující výrazné stavební zásahy, spolu s možnou modularitou řešení a rozdílnými cenovými odhady realizace. Opět je detailně popsán celý proces včetně doporučení, jakým způsobem optimalizaci provádět, jaké hodnoty považovat za referenční a jak na jejich základě kalibrovat počítačový model pro zajištění co nejvyšší přesnosti.

U každé varianty je provedena detailní frekvenční i prostorová analýza předpokládaného vlivu na objektivní akustické parametry stěžejní pro víceúčelové sály. Spolu s vlivem na akustiku prostoru jsou sledovány i další aspekty, jako je otázka finanční náročnosti realizace, vizuálního vlivu úprav na architekturu interiéru nebo mechanické odolnosti a předpokládané údržby.

Závěrem kapitoly 10 byl vytvořen model multikriteriálního hodnocení jednotlivých variant optimalizace prostorové akustiky, který zohledňuje všechny výše popsané faktory. Ten v rámci konkrétního řešeného sálu doporučil jako optimální variantu optimalizace verzi na bázi perforovaného sádkartonu. Ačkoliv tento závěr lze považovat za platný pouze pro tento konkrétní prostor, vytvořený model hodnocení může posloužit jako návod, jakým způsobem hodnotit optimalizace prostorové akustiky téměř libovolného prostoru nejen z hlediska akustiky.

Poslední část práce se věnuje citlivostní analýze počítačového modelu víceúčelového sálu. Jsou sledovány vlivy různých faktorů, které lze během procesu simulace libovolně nastavit, na stálost simulovaných výsledků. U každého faktoru je doporučeno, jakým způsobem k jeho nastavení přistupovat a čemu je vhodné věnovat pozornost. Závěrem jsou všechny tyto poznatky přehledně shrnuty.

Jako vhodná budoucí perspektiva se jeví rozšíření aplikace počítačových simulací prostorové akustiky při návrhu dalších podobných prostorů. To by mohlo přinést další informace, které potvrdí či vyvrátí závěry zde představené. Výsledkem by tak mohl být již ucelený postup, při jehož dodržování bude zaručena vysoká vypovídací hodnota výsledků počítačové simulace. To se ovšem s největší pravděpodobností nestane, dokud nebudou akustické limity zakotveny v rámci legislativy ČR jako nedílná součást kolaudačního procesu většiny veřejných prostorů. Akustické simulace jsou časově a finančně velice nákladné a pro většinu objektů typu obecních kulturních domů a víceúčelových sálů jsou „zbytečným luxusem“. Na druhou stranu – unifikace postupu simulace a definování přesného procesu krok za krokem, který umožní částečnou automatizaci procesu, může přinést zlevnění těchto služeb a tím je otevřít veřejnosti k širšímu využití.

13. Použitá literatura

- [1] KUTTRUFF, Heinrich. *Room acoustics*. 5th ed. London: Spon Press/Taylor, 2009, s. 204-261. ISBN 0415480213.
- [2] WHEELER, Nicholas. *Simplified production of DIRAC DELTA FUNCTION IDENTITIES*. 1997. Dostupné z: <http://www.reed.edu/physics/faculty/wheeler/documents/Miscellaneous%20Math/Delta%20Functions/Simplified%20Dirac%20Delta.pdf>
- [3] STAN, Guy-Bart, Jean-Jacques EMBRECHTS a Dominique ARCHAMBEAU. Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*. 2002, 50(4).
- [4] BORISH, Jeffrey a James B. ANGELL. An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise. In: *Journal of the Audio Engineering Society*. New York: JAES, 1983, s. 478-488. 31: 7/8.
- [5] *Acoustic pulse reflectometry measurement with MLS excitation* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.kempacoustics.com/thesis/node86.html>
- [6] *Frequency Sweep* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416H-01/svtconcepts/lvac_frequency_sweep/
- [7] TUČEK, Jan. *Měření impulsové odezvy v akustice*. Praha, 2010. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [8] SIMON, Ondřej. *Hodnocení akustických parametrů víceúčelových sálů*. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [9] ČSN EN ISO 3382-1. *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky: Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [10] *Reverberation in a Small Room* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416H-01/svtconcepts/lvac_frequency_sweep/http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/RT60/RT60.html
- [11] EVEREST, F. Alton a Ken C. POHLMANN. *Master handbook of acoustics*. New York: McGraw-Hill, 2009, s. 151-178. ISBN 9780071603331
- [12] BARRON, Mike. *Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. Acoustical Science and Technology*. 2005. 26(2): 162-169. DOI: 10.1250/ast.26.162. ISSN 1346-3969. Dostupné také z: <http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/ast/26.162?from=CrossRef>

- [13] BRADLEY, J.S. Review of objective room acoustics measures and future needs. *Proceedings of the ISRA*. Melbourne, 2010.
- [14] VONDRÁŠEK, Martin a Michael ANTEK ML. Porovnání objektivních kritérií kvality koncertních sálů. In: *Akustické listy*. Praha: Česká akustická společnost, 2005, s. 9-18. ročník 11, číslo 3.
- [15] GADE, A.C. Acoustic properties of concert halls in the US and in Europe. In: *Proc Sabine Centennial Symposium*. New York: Acoustical society of America, Mass. Woodbury, 1994, s. 191.
- [16] STEENEKEN, Herman J.M. *The Measurement of Speech Intelligibility*. Dostupné také z: http://www.gold-line.com/pdf/articles/p_measure_TNO.pdf
- [17] *Speech transmission index* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Speech_transmission_index
- [18] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, s. 65. ISBN 80-01-02460-1.
- [19] *The reverb* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.espace-cubase.org/anglais/page.php?page=appplugvb1>
- [20] JOLLY, John a Asha Latha THAMPURAN. *Objective and subjective evaluation of acoustic comfort in classrooms: A comparative investigation of vernacular and modern school classroom in Kerala*. *Applied Acoustics*. 2016, 2016(104), 33-41.
- [21] ČSN 730525. *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady*. Praha: ČNI, 1998
- [22] ČSN 730527. *Akustika – projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely*. Praha: ČNI, 2005
- [23] Vyhláška č. 343/2009 Sb. *O hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*. Dostupná také z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=69389&nr=343~2F2009&rpp=15#local-content>
- [24] Počet obyvatel v obcích České republiky k 1. 1. 2017 [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/45964084/1300721703.pdf/c2733bca-a698-42cb-a6ec-19b8e95f5bc6?version=1.0>
- [25] BARRON, Mike a Sven KISSNER. *A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music*. *Applied Acoustics*. 2017, 2017(115), 42-49.
- [26] *Sound Absorption Coefficients* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z:

- https://www.acousticalsurfaces.com/acoustic_IOI/101_13.htm
- [27] *Ceník materiálů Ecophon* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.ecophon.com/cz/o-nas/kontakt/Cenik/>
- [28] *Ceník Rigips 2017* [online]. [cit. 2017-05-22] Dostupné z: <https://www.rigips.cz/technicka-podpora/cenik-rigips-2017/>
- [29] *Akustický paravan* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.alfacoustic.cz/cs/akusticke-materialy/akusticky-paravan>
- [30] ARETZ, Marc a Raf ORLOWSKI. *Sound strength and reverberation time in small concert halls. Applied Acoustics*. 2009, 2009(70), 1099-1110.
- [31] PÄÄKKÖNEN, Rauno a kol. *Acoustics and new learning environment – A case study. Applied Acoustics*. 2015, 2015(100), 74-78.
- [32] SIMON, Ondřej. *Řešení prostorové akustiky víceúčelových sálů*. Praha: 2016. Závěrečná zpráva samostatného projektu. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [33] SIMON, Ondřej. *Modelování a simulace měření prostorové akustiky víceúčelového sálu v prostředí Odeon*. Praha: 2016. Závěrečná zpráva samostatného projektu. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.

14. Dodatek 1

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 2: Příklad MLS signálu (převzato z [5])	11
Obrázek 3: Příklad swept sine signálu (převzato z [6])	12
Obrázek 4: Princip metody TSP (převzato z [7])	12
Obrázek 5: Časový průběh logaritmického TSP (převzato z [7])	13
Obrázek 6: Význam objektivních akustických parametrů	15
Obrázek 7: Způsoby určení doby dozvuku	16
Obrázek 8: Doporučené toleranční pásmo doby dozvuku pro koncertní síň (převzato z [11]) ..	17
Obrázek 9: Princip ray tracingu (převzato z [19])	26
Obrázek 10: Závislost optimální doby dozvuku T_0 (s) pro kmitočty 1 000 Hz na objemu V (m^3) uzavřeného prostoru v obsazeném stavu s výjimkou závislosti 5, která se týká neobsazeného stavu (převzato z [22])	29
Obrázek 11: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu <u>hudby</u> v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (převzato z [22]) ..	29
Obrázek 12: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu <u>hudby i řeči</u> v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (převzato z [22])	30
Obrázek 13: Přípustné rozmezí poměru dob dozvuku T/T_0 obsazeného prostoru určeného k přednesu <u>řeči</u> v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (převzato z [22])	30
Obrázek 14: Porovnání optimálních pásem T/T_0 dle ČSN 730527	32
Obrázek 15: Optimální doba dozvuku pro víceúčelový sál o objemu $1300 m^3$	33
Obrázek 16: Lokalita obce Bechlín (zdroj: maps.google.com)	35
Obrázek 19: Použitý měřicí řetězec	40
Obrázek 20: Rozložení měřicích bodů	41
Obrázek 21: Naměřená doba dozvuku v KD Bechlín	42
Obrázek 22: Základní zobrazení Trimble SketchUp	43
Obrázek 23: SketchUp - prázdný sál	44
Obrázek 24: SketchUp - sál se stoly	45
Obrázek 25: SketchUp - sál s hosty u stolů	45
Obrázek 26: SketchUp - 50% kapacity obsazeno	46
Obrázek 27: SketchUp - 100% kapacity obsazeno	46
Obrázek 28: SketchUp - aproximace plochou (50% kapacity)	47
Obrázek 29: SketchUp - aproximace plochou (100% kapacity)	47
Obrázek 30: Odeon, Global estimate - poklesové křivky	49
Obrázek 31: Odeon, Global estimate - doba dozvuku	49
Obrázek 32: Schema funkce prostředí Odeon	51
Obrázek 33: Odeon - rozložení měřicích bodů	52
Obrázek 34: Odeon - deformace poklesových křivek v bodech blízko plochy	53
Obrázek 35: Doba dozvuku T_{30} sálu v Bechlíně	58
Obrázek 36: Míra zřetelnosti C_{50} sálu v Bechlíně	59
Obrázek 37: Míra počáteční boční energie LF sálu v Bechlíně	60
Obrázek 38: Binaurální parametr $IACC_{late}$ sálu v Bechlíně	60
Obrázek 39: Prostorová závislost EDT sálu v Bechlíně	62
Obrázek 40: Prostorová závislost C_{50} sálu v Bechlíně	63

<i>Obrázek 41: Prostorová závislost SPL sálu v Bechlíně.....</i>	64
<i>Obrázek 42: Odchylna empirického výpočtu a simulace - referenční varianta sálu se stoly.....</i>	69
<i>Obrázek 43: Varianta 1 - rozmístění prvků v prostoru.....</i>	71
<i>Obrázek 44: Varianta 1 - výsledná doba dozvuku.....</i>	72
<i>Obrázek 45: Varianta 1 - prostorová závislost C_{50}.....</i>	73
<i>Obrázek 46: Varianta 1 - prostorová závislost BR.....</i>	74
<i>Obrázek 47: Varianta 1 - prostorová závislost C_{80}.....</i>	75
<i>Obrázek 48: Varianta 1 - eliminace třepotavých ozvěn.....</i>	76
<i>Obrázek 49: Varianta 2 - rozmístění prvků v prostoru.....</i>	78
<i>Obrázek 50: Varianta 2 - výsledná doba dozvuku.....</i>	79
<i>Obrázek 51: Varianta 2 - prostorová závislost C_{50}.....</i>	81
<i>Obrázek 52: Varianta 2 - prostorová závislost BR.....</i>	82
<i>Obrázek 53: Varianta 3 - rozmístění prvků v prostoru.....</i>	84
<i>Obrázek 54: Varianta 3 - výsledná doba dozvuku.....</i>	85
<i>Obrázek 55: Varianta 3 - prostorová závislost EDT.....</i>	87
<i>Obrázek 56: Varianta 4 - rozmístění prvků v prostoru.....</i>	90
<i>Obrázek 57: Varianta 4 - výsledná doba dozvuku.....</i>	90
<i>Obrázek 58: Varianta 4 - prostorová závislost C_{50}.....</i>	92
<i>Obrázek 59: Varianta 4 - prostorová závislost BR.....</i>	93
<i>Obrázek 60: Varianta 4 - vznik třepotavých ozvěn.....</i>	94
<i>Obrázek 61: Porovnání doby dozvuku - sedící hosté.....</i>	96
<i>Obrázek 62: Porovnání doby dozvuku - 100% obsazeno.....</i>	97
<i>Obrázek 63: Porovnání míry zřetelnosti C_{50} jednotlivých variant optimalizace.....</i>	98
<i>Obrázek 64: Vliv počtu paprsků na výpočet T_{30}.....</i>	101
<i>Obrázek 65: Vliv počtu paprsků na výpočet EDT.....</i>	101
<i>Obrázek 66: Vliv počtu paprsků na výpočet C_{80}.....</i>	102
<i>Obrázek 67: Vliv počtu paprsků na výpočet LF.....</i>	103
<i>Obrázek 68: Vliv konkrétně zvoleného materiálu na výpočet T_{30}.....</i>	104
<i>Obrázek 69: Vliv konkrétně zvoleného materiálu na výpočet C_{50}.....</i>	105
<i>Obrázek 70: Vliv pohltivosti publika na výpočet T_{30}.....</i>	106
<i>Obrázek 71: Vliv pohltivosti publika na výpočet C_{50}.....</i>	107
<i>Obrázek 72: Vliv teploty vzduchu na výpočet T_{30}.....</i>	108
<i>Obrázek 73: Vliv teploty vzduchu na výpočet C_{80}.....</i>	109
<i>Obrázek 74: Vliv teploty vzduchu na výpočet LF.....</i>	110
<i>Obrázek 75: Vliv relativní vlhkosti vzduchu na výpočet T_{30}.....</i>	111
<i>Obrázek 76: Vliv relativní vlhkosti vzduchu na výpočet T_s.....</i>	112
<i>Obrázek 77: Vliv svěšení solitérních stropních panelů na výpočet T_{30}.....</i>	113
<i>Obrázek 78: Snížení pohltivé funkce závěsných panelů.....</i>	113
<i>Obrázek 79: Vliv svěšení solitérních stropních panelů na výpočet C_{80}.....</i>	114
<i>Obrázek 80: Vliv svěšení solitérních stropních panelů na výpočet LF.....</i>	114
<i>Tabulka 1: Analogová konverze MLS signálu.....</i>	11
<i>Tabulka 2: Porovnání metod měření IR v akustice.....</i>	14
<i>Tabulka 3: Příklad hodnot srozumitelnosti STI a jejich subjektivní význam (podle [16, 17]).....</i>	21
<i>Tabulka 4: Objektivní akustické parametry a jejich doporučené hodnoty pro víceúčelové a koncertní sály.....</i>	24
<i>Tabulka 5: Porovnání empirických a softwarových metod výpočtů v prostorové akustice.....</i>	27
<i>Tabulka 6: Technické normy věnující se prostorové akustice.....</i>	31
<i>Tabulka 7: Prvotní porovnání variant optimalizace.....</i>	39

<i>Tabulka 8: Vypočtené doby dozvuku</i>	41
<i>Tabulka 9: Prostorově průměrované hodnoty doby dozvuku</i>	42
<i>Tabulka 10: Odeon - výchozí materiály</i>	54
<i>Tabulka 11: Odeon - kalibrace doby dozvuku</i>	55
<i>Tabulka 12: Odeon - činitel akustické pohltivosti povrchů</i>	55
<i>Tabulka 13: Objektivní akustické parametry KD Bechlín</i>	56
<i>Tabulka 14: Odchytky empirických výpočtů doby dozvuku</i>	68
<i>Tabulka 15: Varianta 1 - zvuková pohltivost použitých materiálů</i>	70
<i>Tabulka 16: Varianta 1 - výsledná doba dozvuku</i>	72
<i>Tabulka 17: Varianta 1 - projektantský odhad ceny optimalizace (ceny materiálu vypočteny na základě údajů v [27] se započtením všech potřebných prvků a přírážky za montáž)</i>	77
<i>Tabulka 18: Varianta 2 - zvuková pohltivost použitých materiálů</i>	78
<i>Tabulka 19: Varianta 2 - výsledná doba dozvuku</i>	80
<i>Tabulka 20: Varianta 2 - projektantský odhad ceny optimalizace (ceny materiálu vypočteny na základě údajů v [28] se započtením všech potřebných prvků a přírážky za montáž)</i>	82
<i>Tabulka 21: Varianta 3 - zvuková pohltivost použitých materiálů</i>	84
<i>Tabulka 22: Varianta 3 - výsledná doba dozvuku</i>	85
<i>Tabulka 23: Varianta 3 - projektantský odhad ceny optimalizace (ceny materiálu vypočteny na základě údajů v [27] se započtením všech potřebných prvků a přírážky za montáž)</i>	88
<i>Tabulka 24: Varianta 4 - zvuková pohltivost použitých materiálů</i>	89
<i>Tabulka 25: Varianta 4 - výsledná doba dozvuku</i>	91
<i>Tabulka 26: Varianta 4 - projektantský odhad ceny optimalizace ([29])</i>	95
<i>Tabulka 27: Porovnání doby dozvuku jednotlivých variant optimalizace</i>	96
<i>Tabulka 28: Porovnání míry zřetelnosti C_{50} jednotlivých variant optimalizace</i>	97
<i>Tabulka 29: Porovnání míry jasnosti C_{80} jednotlivých variant optimalizace</i>	98
<i>Tabulka 30: Multikriteriální porovnání jednotlivých variant optimalizace</i>	99
<i>Tabulka 31: Zvuková pohltivost materiálů z rozdílných zdrojů</i>	104

15. Dodatek 2

Obsah přiloženého média

DP-Simon-2017

-----*dp_simon.pdf*

Elektronická diplomová práce

-----*Foto KD Bechlín*

Fotodokumentace z měření

-----*Odeon data*

Zdrojová data Odeon a 3D modely

-----*Odeon výstupy*

Zdrojový adresář pro Matlab

-----*Výpočty Excel*

Výpočtové tabulky a grafy