

# **Akustika sakrálních staveb**

Zuzana Švancarová

---

Bakalářská práce  
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta multimediálních komunikací

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta multimediálních komunikací

Ateliér Audiovize

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Zuzana Švancarová**

Osobní číslo: **K15278**

Studijní program: **B8209 Teorie a praxe audiovizuální tvorby**

Studijní obor: **Audiovizuální tvorba – Zvuková skladba**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **1. Teoretická část:  
Akustika sakrálních staveb**

**2. Praktická část:  
Audiovizuální dílo nebo tematický soubor audiovizuálních děl,  
délka minimálně 10 min., zvuková skladba.**

Zásady pro vypracování:

### 1. Teoretická část:

Rozsah práce: minimálně 15 normostran textu bez započítání obsahu, rejstříku a obrazových příloh.

Formální podoba: 1 ks v pevné vazbě s popisem na hřbetu i horní desce spolu s CD-R. Dále 2 ks práce, které mohou být v kroužkové vazbě. Práci je třeba rovněž odeslat do knihovny UTB Zlín v elektronické podobě ve formátu pdf. a nahrát do příslušné složky na NAS-FMK.

Pokyny k vypracování: prostudujte a analyzujte dostupné materiály z profesního hlediska a formulujte závěry a získané vědomosti.

### 2. Praktická část: Výstupní dílo:

a) 2 ks DVD ve formátu DVD-video (PAL) s graficky upraveným bookletem.

b) Písemná explikace z pohledu dané specializace. Minimální rozsah: 2x normostrany.

c) V případě, že je dílo autorským počinem nebo není součástí praktické části SZZ studenta produkce, je nutné dodržet dále zásady: a – h (dle zadání praktické části práce na

oboru Produkce). Tyto data odevzdává za projekt vždy jeden člověk – nutná konzultace s vedením AAV.

Všechny odevzdávané materiály musí splňovat vnitřní technické normy AAV pro odevzdávání prací a musí být řádně popsány (jméno, název, logo fakulty, formát, rozlišení). Součástí závěrečné práce je vytištěný a podepsaný formulář "Údaje o bakalářské práci studenta".

V samotné složce na AAV-NAS, označené "Podklady pro katalog FMK UTB ve Zlíně" odevzdejte v minimálním počtu 10 kusů obrazovou dokumentaci praktické části závěrečné práce pro využití v publikacích FMK. Formát pro bitmapové podklady: JPEG, barevný prostor RGB, rozlišení 300 dpi, 250mm delší strana. Formáty pro vektory: AI, EPS, PDF. Loga a texty v křivkách. V samostatném textovém souboru uveďte jméno a příjmení, login do portálu UTB, obor (ateliér), typ práce, přesný název práce v češtině i v angličtině, rok obhajoby, osobní e-mail, osobní web, telefon. Přiložte svou osobní fotografii v tiskovém rozlišení.

Rozsah bakalářské práce: viz. Zásady pro vypracování  
Rozsah příloh: viz. Zásady pro vypracování  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/umělecké dílo

Seznam odborné literatury:

- 1) Rossing T.D. ed. : Springer Handbook of Acoustic, Springer 2007
- 2) EN ISO 3382-2, Acoustics Measurement of room acoustic parameters Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, European Committee for Standardization, Brusel, 2009
- 3) Prato, A., Casassa, F., Schiavi, A.: Reverberation time measurements in non-diffuse acoustic field by the modal reverberation time, Applied Acoustics, pp. 160-169, 2016
- 4) Baumann, D., Niederstätter C.: Acoustics in Sacred Buildings, In Sacred Buildings, ISSN 978-3-7643-6683-4, Springer, pp. 54-59, 2013

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
Ústav elektroniky a měření  
Datum zadání bakalářské práce: 4. prosince 2017  
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. května 2018

Ve Zlíně dne 4. prosince 2017

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ / DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou/diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské/diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že:

- jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně dne: .....

Jméno a příjmení studenta: .....

podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá akustikou sakrálních staveb a zároveň vzájemným působením a vývojem akustiky a hudby v průběhu věků. Ze začátku jsou rozpracována jednotlivá kritéria akustické kvality a základní akustické charakteristiky. Poté jsou představeny typické znaky architektury a hudby pro jednotlivé umělecké slohy a nakonec se přechází k samotnému akustickému měření tří zlínských kostelů.

### **Klíčová slova:**

akustika, sakrální stavby, doba dozvuku, akustická kvalita, akustická charakteristika

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the acoustics of sacral buildings and at the same time interacting and developing acoustics and music over the ages. From the beginning, individual criteria of acoustic quality and basic acoustic characteristics are developed. After that, the typical features of architecture and music for the individual artistic styles are introduced, and finally the three acoustic measurements of the three Zlin churches are presented.

### **Keywords:**

acoustics, sacral buildings, reverberation time, acoustic quality, acoustic characteristics

Prostřednictvím této práce bych chtěla poděkovat vedoucímu mé práce doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc za jeho prvotní podnět a následující trpělivost a podporu. Ing. Pavlu Drábkovi za jeho pomoc s měřením. Dále bych chtěla poděkovat Kristíně Lence Ružičkové za pomoc s řešením oficalit a Mgr. Vladimíru Jeřábkoví za pomoc s korekcemi. V neposlední řadě pak děkuji své rodině a přátelům, kteří mě během psaní této práce podporovali.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné

# OBSAH

<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
1. DEFINICE POJMŮ.....	11
2. KRITÉRIA AKUSTICKÉ KVALITY .....	12
3. PŘEHLED VYBRANÝCH SLOHŮ .....	15
3.1 Románské období (10. - 13. století) .....	15
3.2 Gotika (2. polovina 12. století - počátek 16. století).....	15
3.3 Renesance (14. - 16. století).....	16
3.4 Baroko (17. - 18. století) .....	17
3.5 Klasicismus (polovina 17. století - konec 18. století).....	18
3.6 Romantismus (konec 18. století - začátek 19. století) .....	18
3.7 Secese (přelom 19. a 20. století) .....	19
3.8 Moderna (od konce 19. století do 30. let 20. století).....	20
4. ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY ARCHITEKTONICKÝCH PROSTORŮ .....	21
4.1 EDT .....	21
4.2 $T_{20}$ .....	21
4.3 $T_{30}$ .....	21
4.4 $t_s$ .....	22
4.5 $C_{80}$ .....	22
4.6 $G$ .....	22
4.7 $IACC$ .....	23
4.8 $ITDG$ .....	23
4.9 $BR$ .....	23
4.10 $SDI$ .....	23
<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>25</b>
5. KOSTEL SV. FILIPA A JAKUBA – FARNOST SV. FILIPA A JAKUBA VE ZLÍNĚ.....	26
6. KOSTEL PANNY MARIE POMOCNICE KŘESŤANŮ .....	27
7. EVANGELICKÝ KOSTEL .....	28
8. PRŮBĚH MĚŘENÍ .....	29
ZÁVĚR.....	36
POUŽITÉ ZDROJE.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ .....	40
SEZNAM TABULEK .....	41



## ÚVOD

Před začátkem svého studia jsem se zajímala převážně o zvukovou dramaturgii, kterou jsme také během hodin převážně rozebírali. Během studia mě však také velmi zaujala akustika a práce s různými prostory a materiály, které dané prostory tvoří. Když jsem k tomu přidala také svůj nemalý zájem o architekturu, o tématu mé práce bylo rozhodnuto.

Akustika je relativně mladý obor. Dávni stavitelé pravděpodobně neznali veškeré výpočty tak, jak je známe my dnes, jejich stavby však vznikaly v souladu s akustickými potřebami. Nejvíce se akustika vyvíjela až v období funkcionalismu, který se dá obecně zařadit do moderní architektury. V tomto období probíhaly celospolečenské změny a pozornost se přesunula převážně na využití prostorů.

Má práce proto bude zaměřená na průzkum vzájemného působení hudby a architektury ve vybraných uměleckých slozích.

V první části se budu zabývat kritérii akustické kvality a základními akustickými charakteristikami, které mi později napomohou k prozkoumání a pochopení jednotlivých akustických prostorů.

Ve druhé části bych ráda vystihla podstatu staveb vybraných uměleckých slohů. K tomu samozřejmě bude patřit i stručný popis hudebního stylu daného období včetně uvedení jeho nejznámějších představitelů.

Nakonec přijde samotné měření doby dozvuku tří vybraných zlínských kostelů. Vybrala jsem si Kostel sv. Filipa a Jakuba, Kostel Panny Marie Pomocnice křesťanů a evangelický kostel. Tyto kostely byly postavené v různých obdobích a za různých podmínek, tudíž výsledky by se měly lišit. Kostely se však vždy používaly pro podobné účely, tudíž potřebovaly podobné akustické podmínky.

Po konzultacích s Ing. Pavlem Drábkem a doc. RNDr. Vojtěchem Křesálkem, CSc. jsme se dohodli tato měření použít také jako podklad pro článek do časopisu Akustika.

## TEORETICKÁ ČÁST

## 1. DEFINICE POJMŮ

**Desonanční místa** - místa, v nichž první zvuk po svém vystoupení do výše je pevnými, výše položenými tělesy rušen a srážen nazpět. Proto zůstává ležet dole a ztěžuje vzlet zvuku následujícího po něm.

**Cirkumsonanční místa** - místa, v nichž je zvuk nucen bloudit kolem dokola. Zní bez koncovek, ztrácí se v neurčitých náznacích slov a zaniká uprostřed.

**Resonanční místa** - místa, na nichž se zvuk vrací zpět a naráží při dopadu na nějaký pevný předmět. Poté budí ozvěnu a poslední slabiky zdvojuje.

**Konsonanční místa** - místa, na nichž se hlasu odspodu napomáhá, ten při stoupání do výše sílí a k uším dochází s jasnou zřetelností [1].

**Nazální tón** - ostrý tón s ostrým nasazením.

**Interaurální rozdíl** – rozdíly intenzity a času s jakými je zvuk vnímán každým uchem [28].

## 2. KRITÉRIA AKUSTICKÉ KVALITY

Kritéria akustické kvality poslechového místa můžeme rozdělit podle povahy hodnocených parametrů na časová, prostorová, dynamická a spektrální.

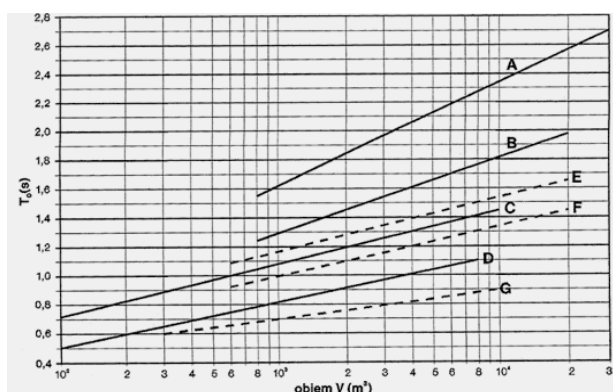
### 2.1 Časová kritéria

*Při poslechu zaujímá přímý zvuk max. 10 % z celkové akustické energie v celém prostoru poslechu. I přesto ale stačí ke správnému odhadu směru, ze kterého zvuk přichází. Přímé odrazy a přímý zvuk jsou vnímány dohromady a posilují vnímání hlasitosti zvuku. Pokud jsou první odrazy zpožděnější (nad 30-50 msec), může se zvuk charakteristicky zabarvit nebo může zvuk začít působit drsně [1].*

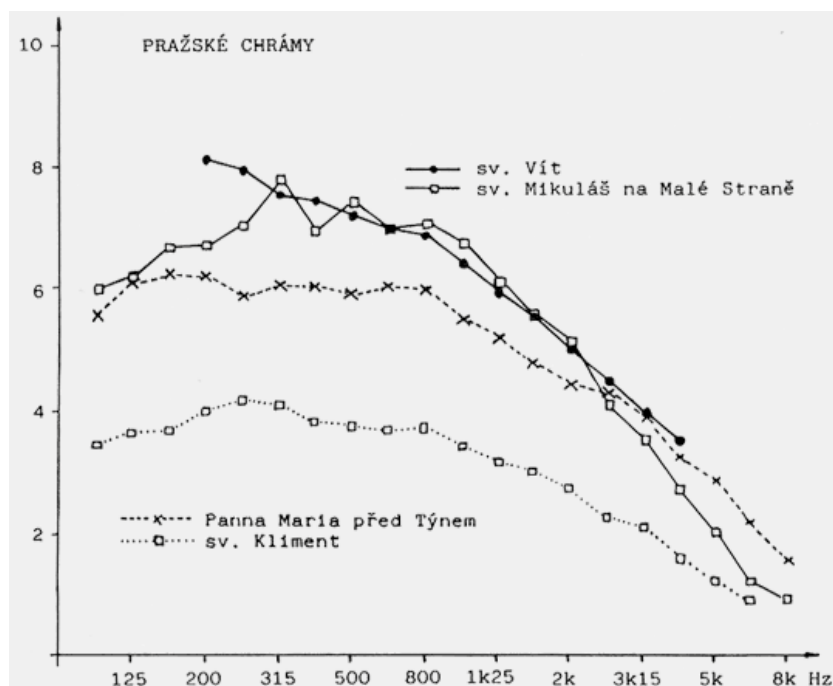
Vnímání prvních odrazů souvisí především s rozdílem jejich hladin vůči přímému zvuku. Záleží na délce jejich zpoždění vůči přímému zvuku a také na směru, ze kterého odrazy přicházejí. Člověk je citlivější na odrazy od bočních stěn, které způsobují velký interaurální rozdíl.

Musíme si dávat velký pozor na srozumitelnost a jasnost zvuku. Nejdůležitějším kritériem pro posuzování akustiky v sakrálních stavbách je však doba dozvuku. Ta závisí hlavně na velikosti a tvaru prostoru a na materiálu jeho stěn. Doba dozvuku však není závislá jen na prostoru, ale také na hlasitosti a barvě zvuku v okamžiku vypnutí jeho vlastního zdroje a na počáteční době dozvuku.

*U řeči by se měl dozvuk pohybovat v rozmezí 0,5 - 1,2 s. Čím větší bude doba dozvuku, tím bude srozumitelnost řeči menší. Pro hudbu je vhodná doba dozvuku od 1,6 do 2,1 s. Co se týče varhanů, typických pro sakrální stavby, doba dozvuku by neměla klesnout pod 2 s [1].*



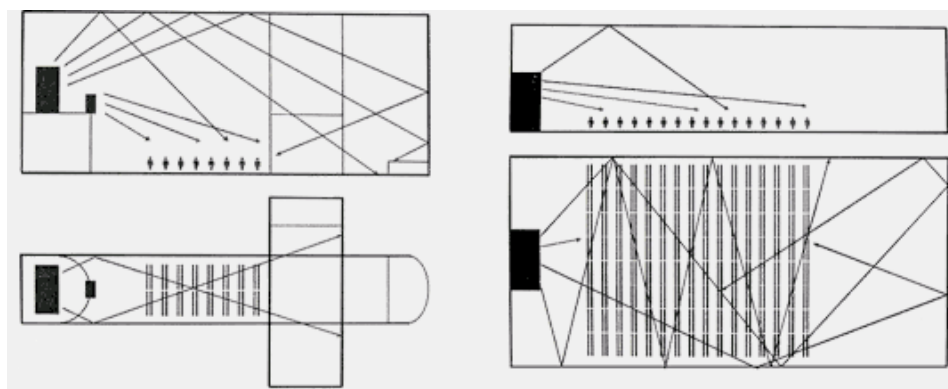
Obr. 1 Závislost optimální doby dozvuku na objemu (platí pro frekvenci 1 kHz); A - varhanní hudba, B - orchestrální hudba, C - komorní hudba, D - řeč, E - opera, F - víceúčelový sál, G - kino [1]



Obr. 2 Dozvuk vybraných pražských chrámů [1]

## 2.2 Prostorová kritéria

Prostorová kritéria jsou velmi subjektivní. Patří mezi ně nejen prostorovost, ale i celkový vjem prostoru. Objektivně můžeme hodnotit pouze velikost prostoru. Čím bude prostor větší, tím delší by měla být doba dozvuku.



Obr. 3 Odrazy v budovách různých půdorysů [1]

## **2.3      Dynamická kritéria**

Co se týče dynamických kritérií, opět se dostáváme do subjektivního hodnocení. Každý vnímá hlasitost a vyváženost zvuku trochu jinak. Vždy se však dá najít hodnota, která bude vyhovovat většině lidí.

## **2.4      Spektrální kritéria**

Barva zvuku je opět hodnocena subjektivně. Objektivně se však dá hodnotit frekvenční průběh doby dozvuku. Ten určuje tvar prostoru a také jeho interiérové vybavení, které dokáže pohlcovat některé frekvenční oblasti.

Vysoké frekvence jsou pohlceny drobně členěným vybavením nebo povrchem. Pro pohlcení středních frekvencí stačí přítomnost posluchačů v prostoru nebo třeba drobné obrazy nebo nábytek. Nízké frekvence jsou pohlcovány velkými plochami obrazů nebo třeba oken.

### 3. PŘEHLED VYBRANÝCH SLOHŮ

Většina historických kostelů má podélný půdorys, který je v dnešní době z hlediska polyfunkčnosti prostorů dost nevhodný. Proto jsou si v dnešní době rozměry stran podobnější. Výhody takového uspořádání jsou převážně účelového charakteru - lidé jsou blíže k oltáři, lépe rozumí bohoslužbě a jsou si navzájem blíže, což navozuje větší pocit spolutnosti.

#### 3.1 Románské období (10. - 13. století)

V románském období vznikaly převážně tribunové kostely a rotundy. Stěny byly silné, stavěné z kamene a dřevěné stropy byly postupně nahrazovány klenbou. Klenba s kůrem napomáhala vertikálnímu vyzařování zvuku nástroje.

Během tohoto období vznikaly nejrůznější formy jednohlasného liturgického zpěvu. Pozdějším vrcholem tohoto zpěvu byl gregoriánský chorál, který se projevoval nepravidelnou rytmičnou strukturou.



Obr. 4 Rotunda v Ducové (Moravany) [21]

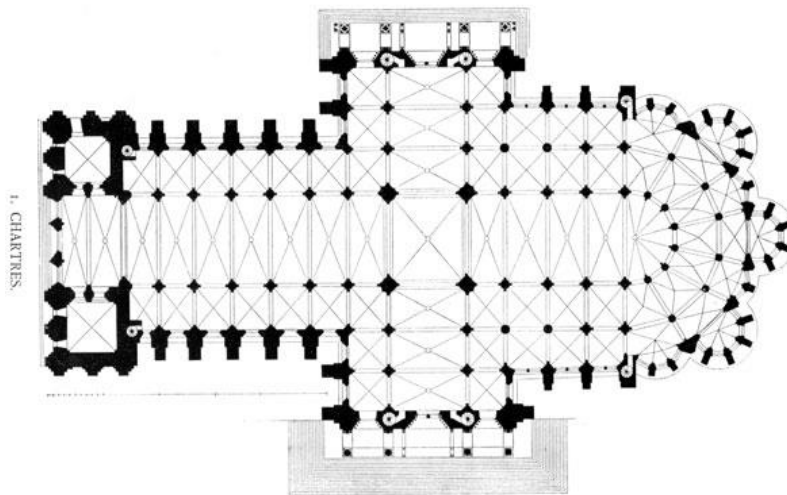
#### 3.2 Gotika (2. polovina 12. století - počátek 16. století)

Gotické budovy byly štíhlé a vysoké. Stěny byly zaplněny velkými okny s vitrážemi, jejichž lomené oblouky byly téměř vždy zdobeny kamennými kružbami. Byly zde dobře pohlcovány nižší frekvence. V bohatých městech vznikaly velké gotické chrámy, takže doba dozvuku mohla dosáhnout až 8 sekund. V chrámech také převládaly převážně odrazy od stropů.

Gregoriánský chorál se dále rozvíjel a hudebníci ho začali přepisovat do vícehlasů, čímž vznikla polyfonie. Postupně tak vznikaly hudební formy jako organum či moteto.

V gotice vznikaly také první kánony. Mezi nejznámější z nich patří “Můj konec je mým začátkem” od Guillaume de Machauta. Ten byl také prvním skladatelem, který zhudebnil celý text mešního ordinária, ve kterém pracoval s nazálním tónem.

. K hlasům se přidával také nástrojový doprovod a projevovaly se výrazné vlivy lidové hudby. Navíc se v gotické hudbě začal projevovat kontakt s orientem, a to převážně v instrumentální složce.



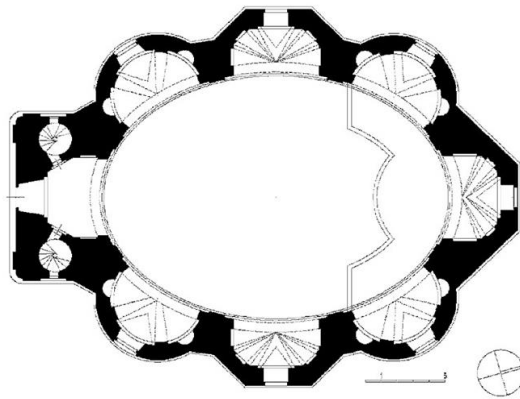
Obr. 5 Katedrála v Kolíně nad Rýnem [22]

### 3.3 Renesance (14. - 16. století)

V tomto období se stavěly převážně chrámy. Okna už však byla menší, což znamenalo menší pohlcování nižších frekvencí. Výzdoba byla stále jednoduchá, často se objevovaly menší výklenky.

Renesanční hudba kladla velký důraz na libozvučnost, kontrast, soulad a řád. Stále se přibývaly nové hudební nástroje. Hudebníci se snažili jednou zvukovou barvou pokrýt celý tonální rozsah a začala vznikat označení jako bas, tenor, alt a soprán (tzv. princip vertikální jednoty). Vrcholným představitelem této doby byl Giovanni Pierluigi da Palestrina, který se snažil spojit římskou hudbu s nizozemskou hudební školou a nakonec vytvořil vlastní hudební palestrinovský styl, známý také jako a capella. Jeho hudba se dlouhodobě stala vzorem katolické chrámové hudby.





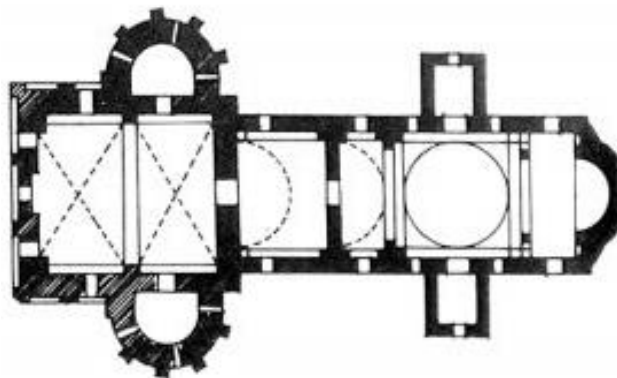
Obr. 6 Půdorys kostela svaté Barbory [23]

### 3.4 Baroko (17. - 18. století)

V baroku se objevilo množství architektonických ozdobných prvků, což naopak pohlcovalo vyšší tóny. Šlechta se v tomto období začala více obklopovat hudbou, takže se stavebníci snažili dosáhnout kratší doby dozvuku a tím poskytl skladatelům prostor pro psaní rychlejší hudby. Dozvuk v barokních katedrálách však byl stále velký - až 5 sekund.

V barokní hudbě se nejvíce začal rozvíjet kontrapunkt. Skladatelé si mohli s hudbou více hrát, protože se díky drobným zdobným předmětům zvuk difúzně rozptyloval.

Barokní hudba byla zpočátku považována za melodicky velmi kostrbatou, později se však barokní styl změnil a objevily se také nové hudební žánry jako například opera. Mezi nejznámější představitele baroka patřili například Antonio Vivaldi nebo Johann Sebastian Bach.

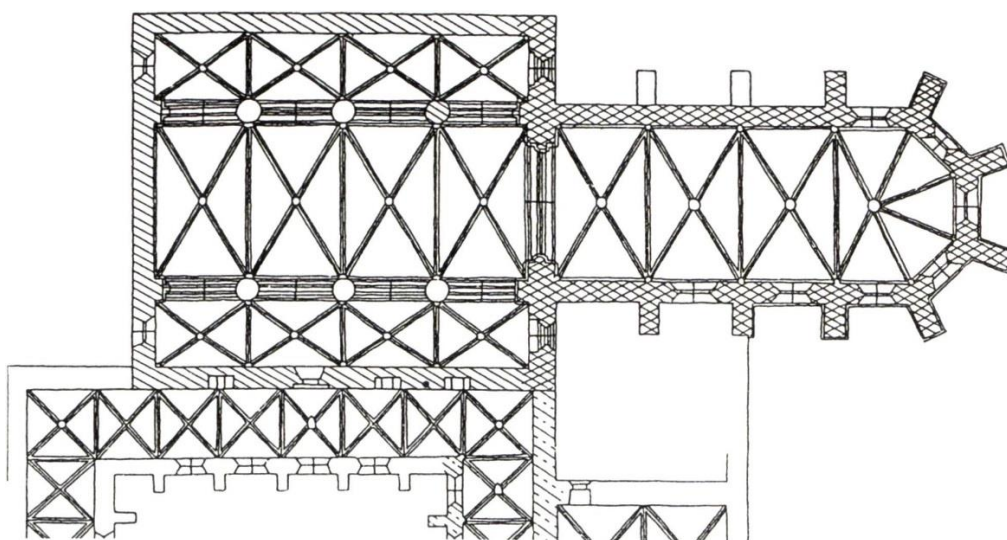


Obr. 7 Kostel Matky Boží ve Studenici [24]

### 3.5 Klasicismus (polovina 17. století - konec 18. století)

Klasicistní kostely měly nižší stropy, než předchozí stavby, a zdobení se stalo o dost spořehším. Okna byla většinou menší půlkruhová, což znamenalo, že nižší tóny nebyly v těchto prostorech příliš pohlcovány.

Klasicistní hudba se navrátila zpátky k nevyumělkovanosti, přehlednosti a ucelenosti. Snažila se dosáhnout harmoničnosti, řádu a pravidelné formy. V klasicistní době začaly vznikat i složitější hudební formy, jako například sonáty, symfonie či smyčcová kvarteta. V této době skládali například Wolfgang Amadeus Mozart nebo Ludwig van Beethoven.



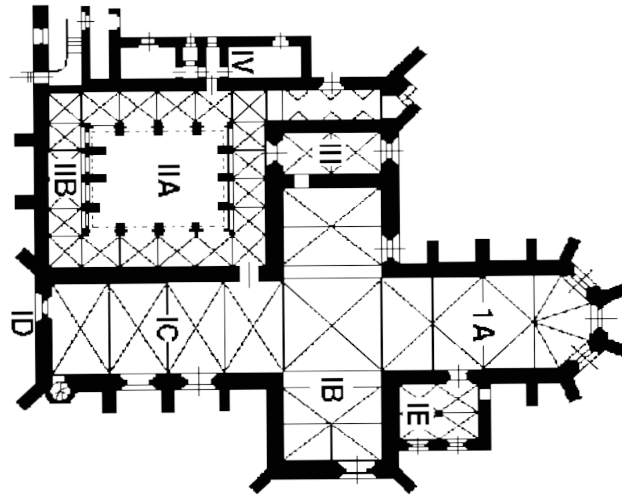
Obr. 8 Kostel Nanebevzetí Panny Marie [30]

### 3.6 Romantismus (konec 18. století - začátek 19. století)

Stavby romantického období byly drobnější a tím se v nich také zmenšovala doba dozvuku. Nižší a širší prostory navíc subjektivně výrazněji zdůrazňovaly odrazy od stěn, což mělo negativní vliv na akustickou kvalitu prostoru.

Romantická hudba byla charakteristická zdůrazněnou emocionalitou a rozšířením a postupně i překročením tradiční harmonie. Romantická hudba také hodně přebírala impulsy z evropské lidové hudby a také se hodně spojovala s mimohudebními myšlenkami. Orchester se neustále rozšiřoval, aby vyvolal mohutný dojem při nasazení všech nástrojů, a aby vyjádřil stále jemnější citové odstíny. Mezi nejznámější skladatele romantismu patřili například Johann Strauss nebo Fryderyk Chopin.

Za zmínku stojí určitě také jeden z nejznámějších českých skladatelů Bedřich Smetana a jeho cyklus symfonických básní *Má vlast*, inspirovaný českou historií a krajinou.

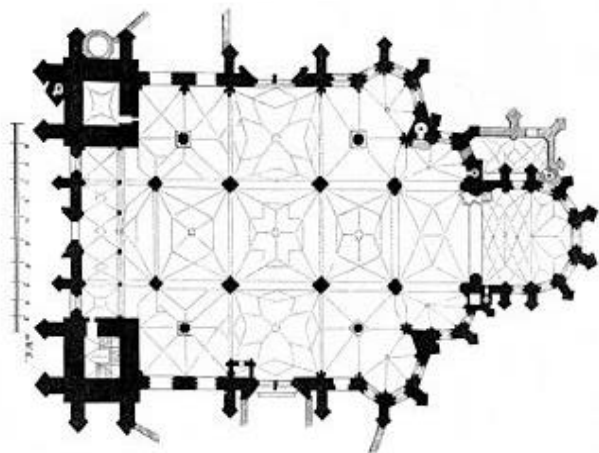


Obr. 9 Klášterní areál Rosa Coeli [25]

### 3.7 Secese (přelom 19. a 20. století)

Secesní stavby byly menší s nízkými stropy a velmi zdobnými prvky. Proto se také snižovala doba dozvuku a navíc byly pohlcovány vyšší frekvence.

Secesní hudba se snažila prosadit lyričnost a symboličnost a také odrazit obecné pocity doby. Pravidelně se v této době střídala stoupající a klesající náladová linie. Do hudby pronikaly také ozvláštňující prvky, jako třeba zpěv ptáků. Pozitivněji se přijímaly spíše lidové laické projevy, než hra profesionálních hudebníků. Skladatelem této doby byl například A. F. W. Schönberg.

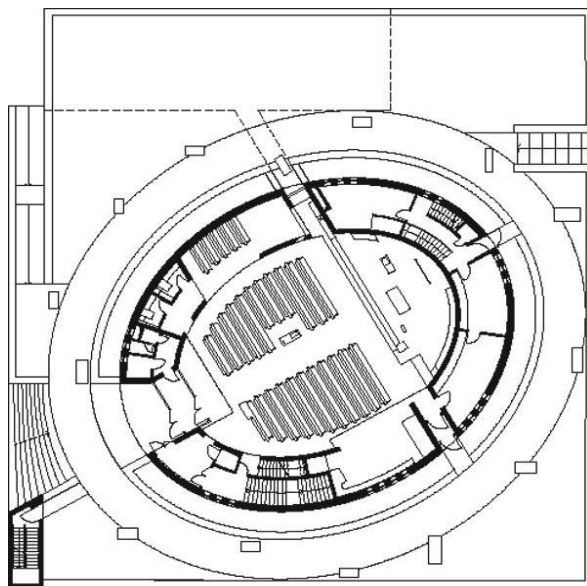


Obr. 10 Katedrála sv. Alžběty [26]

### 3.8 Moderna (od konce 19. století do 30. let 20. století)

Moderní prostory byly menší a převážně zaměřené na funkčnost. Proto byla doba dozvuku opět kratší.

V této době se ve světě začal prosazovat jazz, swing a rock. Moderní době se začaly přizpůsobovat také světské písně a to především se zaměřením na mládež. Do moderny již můžeme zařadit většinu dnešní zpěváků a kapel. Patřila sem například slavná kapela The Beatles.



Obr. 11 Kostel svatého Ducha [27]

## 4. ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY ARCHITEKTONICKÝCH PROSTORŮ

### 4.1 EDT

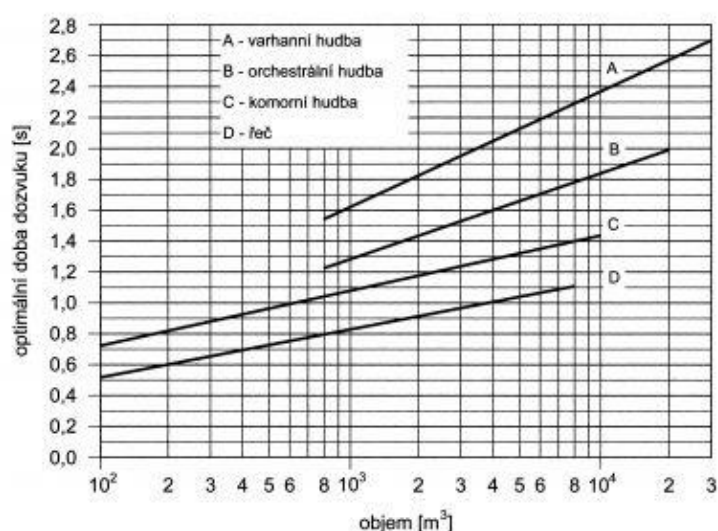
EDT neboli počáteční doba dozvuku je kmitočtově závislá. Díky ní zjistíme subjektivní vnímání doby dozvuku prostoru.  $EDT_{mid}$  je průměr hodnot počáteční doby dozvuku EDT v oktařových pásmech 500 Hz a 1 kHz [5].

### 4.2 $T_{20}$

$T_{20}$  je kmitočtově závislá doba dozvuku, získaná z poklesu o 20 dB (od 5 do 25 dB). Jednočíslově se dá vyjádřit jako průměr hodnot doby dozvuku  $T_{20}$  v oktařových pásmech 500 Hz a 1 kHz (značeno  $T_{20 mid}$ ) [5].

### 4.3 $T_{30}$

$T_{30}$  je nejčastěji používaným způsobem měření. Je to doba dozvuku získaná z poklesu o 30 dB (od 5 do 35 dB).  $T_{30}$  je samozřejmě také kmitočtově závislá a jedním číslem se dá vyjádřit jako  $T_{30 mid}$  průměrem doby dozvuku  $T_{30}$  v oktařových pásmech 500 Hz a 1 kHz [5].



Obr. 12 Optimální doba dozvuku podle české normy ČSN 73 0525 [28]

#### 4.4 $t_s$

Čas těžiště impulsové odezvy se jedním číslem vyjadřuje jako průměr hodnot těžiště impulsové odezvy v oktavových pásmech 500 Hz až 4 kHz.  $t_s$  se dá vyjádřit vzorcem.

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{\int_0^\infty t p^2(t) dt}{E_\infty} \text{ [s]} \quad (1)$$

#### 4.5 $C_{80}$

Míra jasnosti je kmitočtově závislá. Jedním číslem se dá vyjádřit jako průměr hodnot míry jasnosti v oktavových pásmech 500 Hz až 4 kHz. Čím je hodnota vyšší, tím jasněji pak dokážeme rozeznat jednotlivé tóny i při rychlejším tempu.  $C_{80}$  vypočítáme pomocí vzorce:

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

Optimální hodnoty  $C_{80}$  závisí na převládajícím typu hudebního nástroje a tempu hudby.

- varhanní hudba, pomalejší hra na dechové nástroje
- hra na smyčcové nástroje, sborový zpěv
- hra na drnkací a trsací nástroje
- hra na nástroje s perkusním průběhem

#### 4.6 $G$

Síla zvuku je kmitočtově závislá a určuje subjektivní vjem hlasitosti. Jedním číslem se  $G_{\text{mid}}$  uvádí jako průměr hodnot síly zvuku v oktavových pásmech 500 Hz a 1 kHz. Vzorec pro sílu zvuku je:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt} = 10 \log \frac{E_\infty}{\int_0^\infty p_A^2(t) dt} \text{ [dB]} \quad (3)$$

Optimální hodnota pro sílu zvuku se moc neuvádí. Podle Leo Beranka se však  $G_{\text{mid}}$  pohybuje od 4 do 5,5 dB.

## 4.7 IACC

Činitel interaurální vzájemné korelace je kmitočtově závislý. Čím menší má prostor hodnotu IACC, tím je větší vnímaná prostorovost zvuku. Nikdy se však nedá dosáhnout nuly. Průměr hodnot činitele interaurální vzájemné korelace se vyjadřuje v oktávových pásmech 500 Hz, 1 kHz a 2 kHz. IACC získáme pomocí vzorce:

$$IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) p_r(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}, [-] \quad (4)$$

$$IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)|, -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}. \quad (5)$$

Nejvhodnější prostory z hlediska IACC by se měly pohybovat kolem 0,3.

## 4.8 ITDG

ITDG neboli počáteční prodleva je zpoždění prvního odrazu od bočních sten nebo stropu za zvukem s odrazy od nejbližších předmětů a ploch. Díky této charakteristice můžeme určit subjektivní vnímání intimity. ITDG by neměla být příliš dlouhá. Nejvhodnější je ITDG do 20 ms.

## 4.9 BR

Basový poměr se vyhodnocuje z kmitočtového průběhu doby dozvuku. Pomáhá nám určit vnímání spektrálního průběhu dozívání. K tomu potřebujeme vzorec:

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}} [-] \quad (6)$$

Hodnoty BR by měly být o něco větší, než 1.

## 4.10 SDI

Koeficient difuzity povrchů vyjadřuje vnímání difuzity zvukového pole. K vyhodnocení SDI nemůžeme použít žádné akustické měření, jedná se o odhad vlastností povrchu. Určuje se podle tvaru a materiálu stěn a stropu prostoru.

Vysoce rozptylným povrchům (např. kazetované, šachovnicové nebo trámové povrchy a výklenky s hloubkou větší, než 10 cm) je přiřazena hodnota 1. Středně rozptylným povrchům (např. pilovité povrchy, dekorativní ornamenty s hloubkou do 5 cm nebo žaluzie) je přiřazena hodnota 0,5. Nízko rozptylným povrchům (např. oddělené panely, hladké plochy, pleto a vysoce pohltivé materiály) je přiřazena hodnota 0.

*Má-li např. strop celkovou plochu 3200 m<sup>2</sup>, z toho je 1000 m<sup>2</sup> hladké plochy a zbytek je hluboce kazetován, potom je jeho bodový příspěvek dán součinem plochy a její váhy:  $1000 \times 0 + 2200 \times 1 = 2200$  bodů. Takto se ohodnotí též příspěvky dalších stěn a všechny body se sečtou. Celková rozptylnost povrchu SDI je podíl celkové bodové hodnoty a celkové plochy stropu a bočních stěn bez (zadní stěny) [21].*



## **PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5. KOSTEL SV. FILIPA A JAKUBA – FARNOST SV. FILIPA A JAKUBA VE ZLÍNĚ

Tento kostel je farním kostelem místní římskokatolické farnosti. Původní kostel byl postaven koncem 14. století. Od té doby byl však mnohokrát přestavován. K největší změně došlo na začátku 19. století, kdy byl kostel přeorientován z východního směru na jižní. Během oprav se kostel proměnil, i přes ponechání původního zdiva a klenby, na barokní stavbu.



Obr. 13 Interiér kostela sv. Filipa a Jakuba



Obr. 14 Impuls k měření pomocí akustické pistole

Kostel má křížový půdorys, stěny jsou tvořeny kombinací kamenného a cihelného zdiva, podlaha i oltář jsou z mramoru. Vše je velmi symetrické a v prostoru se nenachází téměř žádné prvky s vysokou hodnotou zvukové pohltivosti. Když k tomu uvažíme ještě velikost prostoru, můžeme očekávat poměrně vysokou dobu dozvuku.

## 6. KOSTEL PANNY MARIE POMOCNICE KŘEŠŤANŮ

Kostel Panny Marie je nejnovějším kostelem ve Zlíně, jehož stavba byla započata v roce 2000. Díky tomu také kostel nebyl nijak výrazně upravován.



Obr. 15 Interiér kostela Panny Marie Pomocnice křesťanů



Obr. 16 Absorbéry na stropě kostela Panny Marie Pomocnice křesťanů

Kostel svým stylem zapadá do nového zlínského funkcionalismu. Podstava je téměř čtvercová s useknutými rohy, podlaha je tvořená kachly a strop je zde opatřen absorbéry.

## 7. EVANGELICKÝ KOSTEL

Evangelický kostel byl postaven v meziválečném období ve funkcionalistickém stylu. Kostel od svého vzniku neprošel žádnými zásadními přestavbami.



Obr. 17 Interiér evangelického kostela



Obr. 18 Strop evangelického kostela

Půdorys je obdélníkového tvaru, strop a podlaha však nejsou rovnoběžné. Zdi jsou cihlové nebo kamenné a celý prostor je ještě doplněn dřevěnými prvky (lavice, obklady, kazatelna) a vysokým kobercem. Strop je také doplněn akusticky pohltivým materiálem. Z těchto tří zkoumaných kostelů má evangelický kostel nejmenší vnitřní objem.

## 8. PRŮBĚH MĚŘENÍ

Jedním ze základních parametrů, určujících vlastnosti zvukového pole daných prostorů, je doba dozvuku, která byla během měření vyhodnocena. Byl také analyzován tvar a struktura poklesové křivky impulzové odezvy šíření zvuku v prostorech kostelů.

Pro měření byla vybrána doba minimálního provozu kostelů, tudíž bylo třeba brát v úvahu menší akustickou pohltivost. Měření bylo provedeno na měřicím rozsahu třetinooktávových pásem 50 - 10000 Hz za těchto meteorologických podmínek:

	Teplota vzduchu	Relativní vlhkost
<b>Kostel sv. Filipa a Jakuba</b>	16,9 °C	48,4 %
<b>Evangelický kostel</b>	11,7 °C	58,7 %
<b>Kostel Panny sv. Marie</b>	13,4 °C	64,3 %

Tab. 1 Meteorologické podmínky při měření

*Základní částí celého měřicího řetězce je ucelená jednotka všesměrového mikrofonu Norsonic GRAS GS-40AF a předzesilovače Norsonic Nor1209. Výstupní napětí je přes mikrofonní kabel přiváděno do měřicí stanice Norsonic Nor850, která spolu se stejnojmenným softwarem slouží jako hladinový zapisovač akustického tlaku podle funkce času. Tato stanice umožňuje připojení několika vstupně/výstupních měřicích modulů. Komunikace mezi měřicí ústřednou a zařízením pro záznam a analýzu naměřených dat (PC) je možná bezdrátově přes WLAN nebo Bluetooth popř. nabízí drátovou alternativu LAN a USB.*

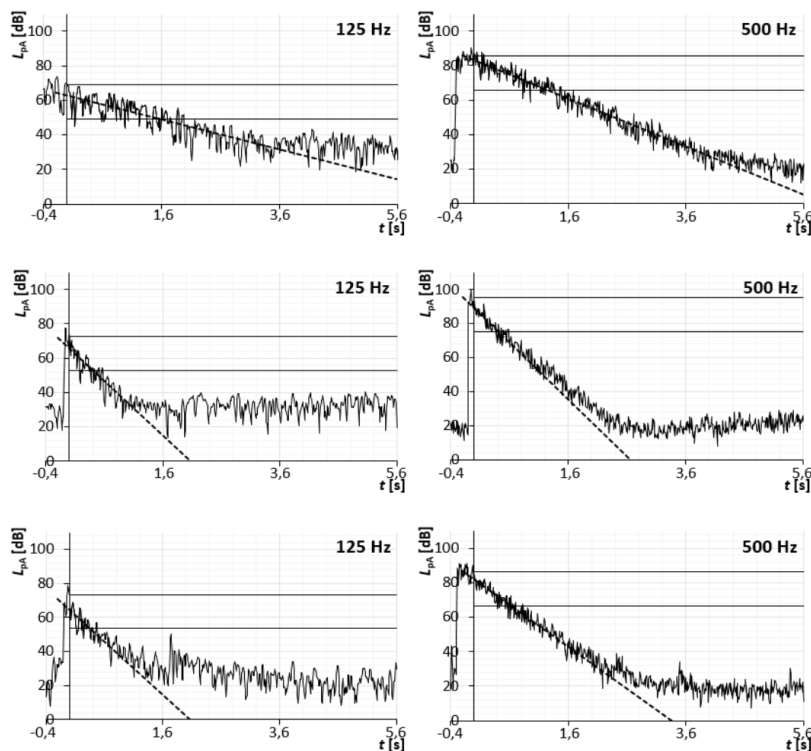
*Pro měřicí proces bylo velmi důležité vhodně nastavit hodnotu vzorkovací frekvence, která pro analýzu poklesové křivky musí být co nejmenší. V tomto případě byla zvolena hodnota 5 ms [20].*

V každém sledovaném frekvenčním rozsahu bylo nejprve nutné změřit hladinu časově průměrovaného hluku pozadí. Pokud je impulzní odezva ovlivněna hlukem pozadí, dojde ke zkreslení charakteru poklesové křivky v pozdní fázi a naměřená data budou tudíž nepřesná.

Hodnoty dob dozvuku byly získány pomocí metody integrované impulsové odezvy pro vyhodnocovací rozsah 5 až 25 dB pod ustálenou hladinou akustického tlaku. Vzhledem k velikosti prostorů bylo předpokládáno, že akustické prostředí není kompletně difúzní na sledovaném frekvenčním rozsahu, a proto bylo provedeno několik sérií měření pro každé třetinooktávové pásmo

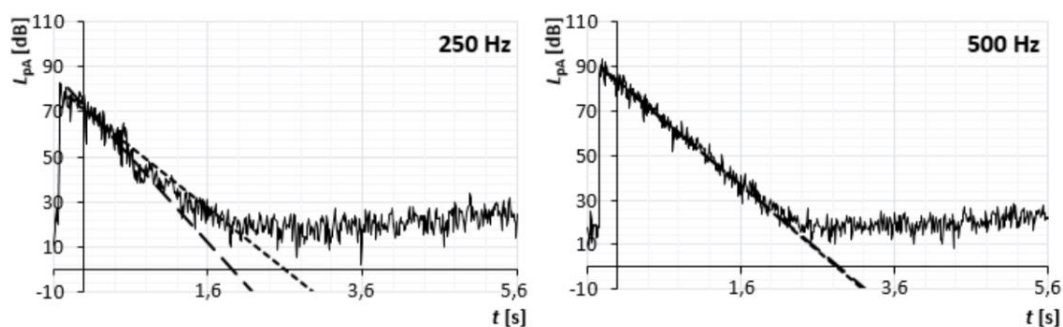
ve sledovaném frekvenčním rozsahu. Bylo použito 6 pozic mikrofónů a měření bylo opakováno na šesti různých pozicích zdroje zvuku. Doba dozvuku pak byla vyhodnocena pomocí lineární regresní analýzy a prokládáním metodou nejmenších čtverců.

*Naměřená data byla analyzována z několika pohledů. Nejprve byl sledován sklon poklesových křivek na celém rozsahu středních frekvencí všech třetinooktávových pásem. Každou takovou křivku je možné posuzovat z hlediska brzké a pozdní části, a to v několika místech příjmu. Ze zobrazených průběhů (viz. Obr. 19) lze pozorovat, že výsledný tvar křivky je závislý na sledované frekvenci a poloze příjmu. Poklesové křivky obsahují značné fluktuace a místní poklesy především v brzké části poklesu. Naměřené poklesové křivky v kostele sv. Filipa a Jakuba byly fluktuacemi zatíženy nejvíce. Při konstrukci pomocných křivek pro nižší frekvence (pod 315 Hz), které popisují průměrné dlouhodobé změny akustického tlaku, bylo pozorováno, že poklesové křivky v hodnoceném rozsahu nejsou zcela lineární, což je následek nerovnoměrného rozložení vlastních kmitů v prostoru na tomto rozsahu frekvencí [19].*



Obr. 19 Poklesové křivky pro vybraná třetinooktávová pásma (a. kostel sv. Filipa a Jakuba, b. Evangelický kostel, c. Kostel sv. Panny Marie).

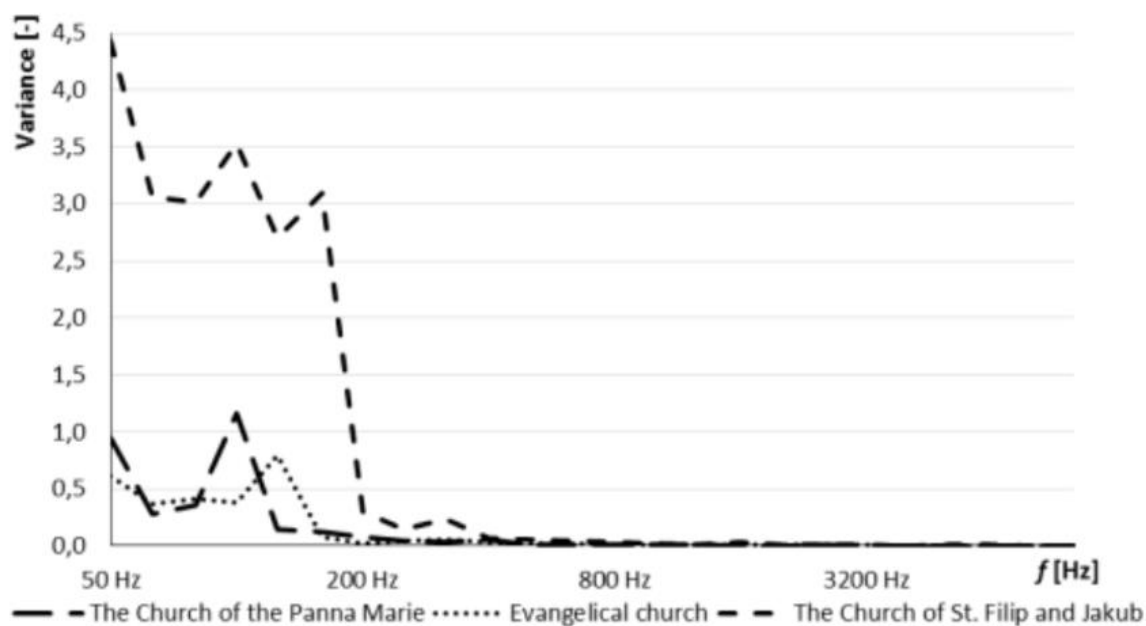
Dále byly porovnávány výsledky dob dozvuku  $T_{60}$  získaných pro vyhodnocovací rozsah 5 až 25dB ( $T_{20}$ ) a 5 až 35dB ( $T_{30}$ ) pod ustálenou hladinou akustického tlaku. Toto porovnání bylo možné provádět až pro třetinooktávová pásma se střední frekvencí vyšší než 125Hz, neboť použitý impulsní zdroj zvuku nebyl schopen vybudit na nižších frekvencích takovou špičkovou hladinu akustického tlaku, aby bylo možné vyhodnocení provést. Pro nižší frekvence jsou výsledky v souladu s tvrzením v předchozím odstavci, kdy se fluktuace a nelinearita podepsaly na různém sklonu přímky udávající rychlost poklesu akustického tlak [10].



Obr. 20 Porovnání sklonu vybraných poklesových křivek pro rozsah  $T_{20}$  a  $T_{30}$

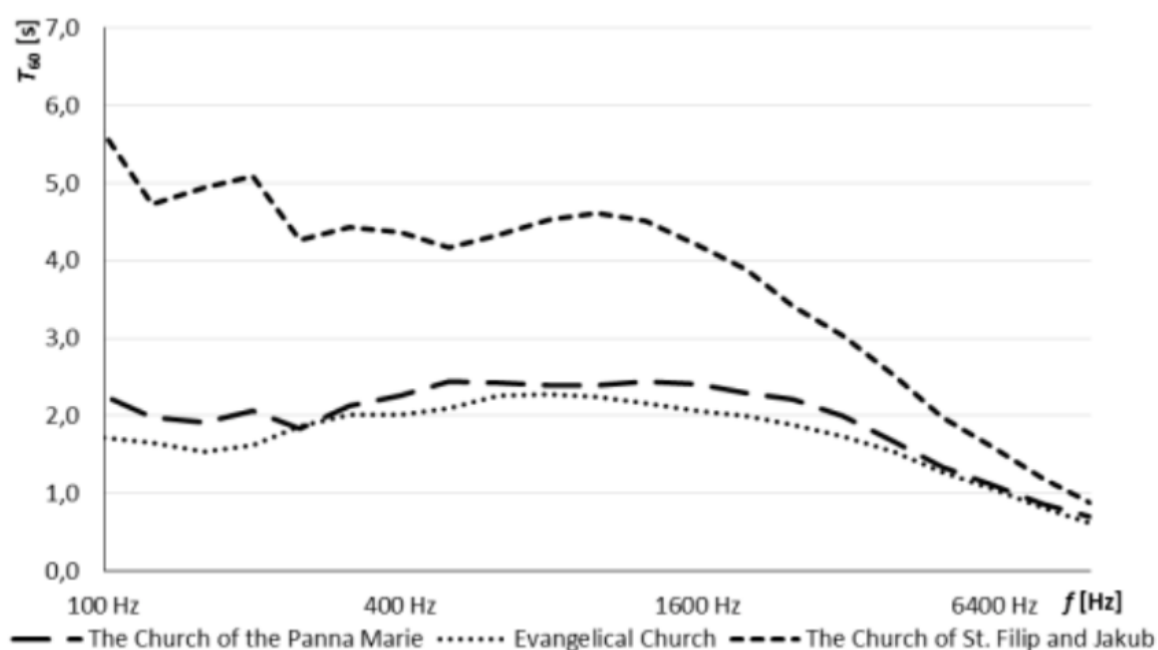
Žádoucí bylo také zaměřit se na rozptyl, resp. variabilitu rozdělení souboru naměřených hodnot dob dozvuku pro více poslechových míst a zdrojů zvuku. Tato hodnota byla vypočtena jako střední hodnota kvadrátu odchylek od střední hodnoty. Rozptyl hodnot naměřených dob dozvuku poté vyjadřuje v závislosti na frekvenci šíření zvukových vln a rozloženosti zvukové energie v prostoru [15]. Obr. 21 uvádí, že šíření zvuku prostorem je na nižších frekvencích nestálé a odvíjí se od místa zdroje a místa příjmu. Nejmarkantněji je tato situace znatelná v prostorech kostela sv. Filipa a Jakuba, což je především kvůli tvarovému řešení a vyduťtým plochám, které zvuk soustřeďují do určitých míst. Klenbové a kopulové tvary byly v dobovém architektonickém slohu využívány za účelem soustředění zvuku do oblasti hlediště a subjektivního pocitu prostorovosti [16]. Nicméně při nevhodném umístění, rozměrech a zakřivení mohly tyto prvky zhoršit akustiku daného prostoru [17]. Novější stavební slohy zaměřené spíše na funkčnost již tyto prvky neobsahují [18] [10].





Obr. 21 Rozptyl hodnot dob dozvuků v závislosti na frekvenci

Zvlášť důležitým pro diagnostiku akustiky prostorů je průběh dozívání tzv. dozvuk [14]. Průměrované průběhy dob dozvuků pro každou sakrální stavbu graficky znázorňuje [10].



Obr. 22 Průběh doby dozvuku v závislosti na frekvenci



*Z grafu je patrné, že doba dozvuku v kostele sv. Filipa a Jakuba je přibližně dvojnásobná ( $T_{60} \sim 4s$ ) při porovnání s ostatními kostely a to na širokém rozsahu frekvencí. Dominantní je zejména na nižších frekvencích, což si vyžadují především hudební představení. Úbytek zvukové energie v oblasti vyšších frekvencí je především způsoben vlivem pohlcování zvuku ve vzduchu [13]. Průběh doby dozvuku v evangelickém kostele a kostele sv. Panny Marie vykazuje velmi podobné charaktery i hodnoty, vyrovnané na širokém rozsahu frekvencí. Střední hodnota doby dozvuku se pohybuje kolem 2s. U těchto kostelů lze vidět, že výsledná doba dozvuku byla uměle upravena, především k zajištění vhodných difúzních vlastností již od nízkých frekvencí [10].*

<b>Nor850</b>	<b>50 Hz</b>	<b>63 Hz</b>	<b>80 Hz</b>	<b>100 Hz</b>	<b>125 Hz</b>	<b>160 Hz</b>
Kostel sv. Marie	3,31	1,67	1,89	2,26	1,98	1,92
Evangelický kostel	2,52	2,16	2,24	1,69	1,59	1,51
Kostel sv. Jakuba	3,29	6,21	6,45	5,65	4,72	4,94
<b>Vlastní zpracování</b>						
Kostel sv. Marie	45,52	68,98	2644,55	4,34	6,33	3,06
Evangelický kostel	15,54	29,50	20,59	18,31	43,96	1,56
Kostel sv. Jakuba	-20,22	44,80	23,39	11,06	6,20	6,01
<b>Nor850</b>	<b>200 Hz</b>	<b>250 Hz</b>	<b>315 Hz</b>	<b>400 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>630 Hz</b>
Kostel sv. Marie	2,07	1,83	2,12	2,27	2,44	2,43
Evangelický kostel	1,58	1,80	2,01	2,02	2,10	2,25
Kostel sv. Jakuba	5,09	4,26	4,43	4,37	4,17	4,33
<b>Vlastní zpracování</b>						
Kostel sv. Marie	2,13	1,89	2,46	2,23	2,47	2,46
Evangelický kostel	1,66	1,90	2,21	2,05	2,07	2,27
Kostel sv. Jakuba	5,24	4,55	4,45	4,31	4,18	4,33

Nor850		800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz
Kostel sv. Marie		2,40	2,40	2,44	2,41	2,30	2,22
Evangelický kostel		2,28	2,24	2,16	2,07	2,00	1,89
Kostel sv. Jakuba		4,53	4,62	4,52	4,21	3,89	3,41
Vlastní zpracování							
Kostel sv. Marie		2,43	2,11	2,43	2,40	2,29	2,20
Evangelický kostel		2,31	2,26	2,13	2,05	1,98	1,87
Kostel sv. Jakuba		4,57	4,66	4,53	4,24	3,86	3,35
Nor850		3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
Kostel sv. Marie		2,00	1,67	1,34	1,10	0,87	0,70
Evangelický kostel		1,73	1,54	1,28	1,05	0,81	0,62
Kostel sv. Jakuba		3,04	2,52	1,98	1,61	1,19	0,88
Vlastní zpracování							
Kostel sv. Marie		1,99	1,64	1,29	1,06	0,83	2,19
Evangelický kostel		1,71	1,51	1,26	1,04	0,78	0,60
Kostel sv. Jakuba		3,05	2,48	1,96	1,59	1,16	0,85

Tab. 2 Doby dozvuku pro jednotlivé spektrální oblasti (v sekundách)

## ZÁVĚR

Vzhledem k tomu, že jsme se rozhodli výsledky mé praktické části publikovat v časopise Akustika (Volume 30), jsem nucena velkou část svého závěru citovat.

*Vlnová teorie aplikovaná na uzavřené prostory neumožňuje plně formulovat závěry, potřebné jak z hlediska návrhů, tak i oceňování akustické kvality uzavřených prostorů. Časově proměnné zvukové pole, které posluchač vnímá jako komplexní podnět, je výslednicí vzájemného působení hudebního tělesa, dirigenta, hudebního díla a prostoru, ve kterém je dílo interpretováno. Na akustické podněty jsou vázány i podněty mimoakustické, mající vztah k danému prostoru, k hudebnímu dílu, apod. V kostelích určených především pro liturgické funkce, dosahují hodnoty dob dozvuku velmi vysokých hodnot [10].*

*Tato skutečnost se vtiskla do vědomí lidí natolik, že kostely sloužící mimo jiné i ke kulturnímu využití, vyznačující se nižší dobou dozvuku kolem 1 až 2s, jsou shledávány jako neuspokojivé i přesto, že tyto hodnoty jsou z hlediska srozumitelnosti mluveného slova, sborového zpěvu, popř. varhanní hudby vhodnější [11].*

*Tento příspěvek se zabývá hodnocením akustických vlastností tří kostelů ve Zlíně, které byly postaveny v odlišném architektonickém slohu. Při pohledu na hodnoty vnitřních objemů kostelů ve vztahu k výsledným hodnotám dob dozvuku je zřejmé, že se vývoj architektury v posledních desetiletích ubíral spíše směrem zaměřeným na celkovou funkčnost. Kostel sv. Filipa a Jakuba obsahuje především prvky barokního slohu, který se vyznačuje velkým vnitřním objemem, vyduťtými tvary a akusticky odrazivými povrchy. V těchto prostorech muselo být interpretované dílo vhodně upraveno podle jistých energetických kritérií, aby nedošlo k porušení zřetelnosti produkovaných akustických signálů. Odlišná situace je u Evangelického kostela a kostela sv. Panny Marie, kde byly na vnitřní prostory kladeny různorodé akustické požadavky. Tyto prostory jsou vhodné jak pro liturgické funkce, tak i pro jiná kulturní představení [12].*

Dávni stavitelé tedy na zvuk nahlíželi jako na velmi důležitý parametr. Proto se průběžně proměňovaly umělecké slohy, které měly vytvořit lepší podmínky pro zvuk.

Každá stavba měla jinou funkci, pro kterou byla určena a podle toho se také individuálně odvíjejí akustická kritéria stavby. Například varhany rozhodně budou znít lépe s větším dozvukem a ve větším kostele. Naopak v malé kapličky nejsou akustické požadavky tak vysoké, jelikož slouží především k tichému modlení.

Architektura a hudba si šly (a stále jdou) ruku v ruce. Každý sloh přináší změny staveb, čímž se mění také akustika prostoru a podmínky pro hudbu v něm. Skladatelé tak získávají pořád další a další možnosti pro svou tvorbu

Když porovnáme naměřené výsledky s výsledky světoznámých koncertních sálů, můžeme odvodit, že Kostel sv. Marie a Evangelický kostel mohou být využity také k reprodukci moderní hudby. Doba dozvuku těchto kostelů se totiž pohybuje kolem 2s, což je optimální doba dozvuku v koncertních sálech. Naopak Kostel sv. Jakuba má mnohem delší dobu dozvuku, tudíž se k reprodukci moderní hudby nehodí. V prostorách tohoto barokního kostela však mnohem lépe vyzní skladby typické pro danou dobu.

## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Akustika sakrálních prostorů. *Archiweb.cz* [online]. Brno: Archiweb, 2007 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/salon.php?type=10&action=show&id=47>
- [2] [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD\\_strana](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavn%C3%AD_strana)
- [3] Akustika staveb. *Tzb-info.cz* [online]. Praha: Topinfo, 2018 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-stavebhttp://zs-zelatovska.cz/upload/2824238796vy-32-inovace-338-prehled-dejin-hudby.pdf>
- [4] [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=130330](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=130330)
- [5] Vliv řešení operní scény a orchestřiště na akustiku sálu [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=130330](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=130330). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D. EN ISO 3382-2, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, European Committee for Standardization, Brusel, 2009
- [6] Prato, A., Casassa, F., Schiavi, A.: Reverberation time measurements in non-diffuse acoustic field by the modal reverberation time, *Applied Acoustics*, pp. 160-169, 2016
- [7] Baumann, D., Niederstätter C.: Acoustics in Sacred Buildings, In *Sacred Buildings*, ISSN 978-3-7643-6683-4, Springer, pp. 54-59, 2013
- [8] Cirillo, E., Martellotta, F.: An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches, *Applied Acoustics*, č. 64, pp. 1-23, 2002
- [9] Gade A. C.: Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three Decades of Experimental Research, *Building Acoustics*, No. 18, pp. 181-206, 2011
- [10] DRÁBEK, Pavel, Vojtěch KŘESÁLEK a Zuzana ŠVANCAROVÁ. Akustické hodnocení tří architektonických typů sakrálních staveb ve Zlíně. *Akustika*. 2018, 1(30), 13.
- [11] Kolmer, F., Kyncl, J.: *Prostorová akustika*, SNTL/ALFA, Praha, p. 244, 1980
- [12] Meissner, M.: Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape, *Applied Acoustics*, pp. 583-590, 2008
- [13] Drábek P., Zálešák M.: Acoustic verification of rectangular reverberation chamber using, *WSEAS Transaction on Environment and Development*, č. 12, pp. 377-385, 2016
- [14] Vaverka, J.: *Stavební fyzika 1*, ISSN 80-214-1283-6, VUT v Brně, Brno, 1998
- [15] Kuttruff, H.: *Room Acoustics - Fifth Edition*, ISSN 978-0-415-48021-5, Spon Press, Oxon, 2009
- [16] Podroužková, P.: *Moderní sakrální architektura*, Master Thesis, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, p. 186, 2013
- [17] Šefců, O.: *Lexikon architektonických prvků a stavebního řemesla*, ISSN 978-80-247-3120-9, Grada Publishing, Praha, p. 256, 2013

- [18] Baumann, D., Niederstätter C.: Acoustics in Sacred Buildings, In Sacred Buildings, ISSN 978-3-7643-6683-4, Springer, pp. 54-59, 2013
- [19] <http://zvuk.hamu.cz/vyzkum/dokumenty/TL72%2015.pdf>
- [20] <http://www.fce.vutbr.cz/fyz/ficker.t/navod.pdf>
- [21] <http://www.znojemskarotunda.cz/rotund09.htm>
- [22] <http://www.archiweb.cz/news.php?action=show&id=9246&type=2>
- [23] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kostel\\_svat%C3%A9\\_Barbory\\_\(Otovice\),\\_p%C5%AFdorys.GIF](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kostel_svat%C3%A9_Barbory_(Otovice),_p%C5%AFdorys.GIF)
- [24] <http://go.galegroup.com/ps/anonymouse?id=GALE%7CA251858367&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=fulltext&issn=07423330&p=AONE&sw=w&authCount=1&isAnonymousEntry=true>
- [25] <https://www.dolnikounice.cz/historie-klastera-rosa-coeli/d-78778>
- [26] [http://www.wikiwand.com/cs/Katedr%C3%A1la\\_svat%C3%A9\\_Al%C5%BEb%C4%9Bty](http://www.wikiwand.com/cs/Katedr%C3%A1la_svat%C3%A9_Al%C5%BEb%C4%9Bty)
- [27] <http://www.atelier-stepan.cz/cache/imgc/asv3/1200x1200/data/marek-stepan/kancelare-v-budove/original/groundplan.jpg?hash=68ae509e8b7e9d1c9c6fba4033aa778df3b74f4e>
- [28] <http://www.audified.com/projekt/ft-ta3010/page5/page10/page10.html>
- [29] [http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Odhlcneni-a-zatlumeni-zkusebny-aneb-jak-umravnit-decibely~23~duben~2012/?&mprint\[4392\]=1](http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Odhlcneni-a-zatlumeni-zkusebny-aneb-jak-umravnit-decibely~23~duben~2012/?&mprint[4392]=1)
- [30] <http://kralovskedilo.ktf.cuni.cz/lokality/Plzen-%E2%80%93-Kostel-Nanebevzeti-Panny-Marie>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Závislost optimální doby dozvuku na objemu (platí pro frekvenci 1 kHz); A - varhanní hudba, B - orchestrální hudba, c - komorní hudba, D - řeč, E - opera, F - víceúčelový sál, G – kino [1].....	12
Obr. 2 Dozvuk vybraných pražských chrámů [1] .....	13
Obr. 3 Odrazy v budovách různých půdorysů [1].....	13
Obr. 4 Rotunda v Ducové (Moravany) [21].....	15
Obr. 5 Katedrála v Kolíně nad Rýnem [22] .....	16
Obr. 6 Půdorys kostela svatě Barbory [23] .....	17
Obr. 7 Kostel Matky Boží ve Studenici [24] .....	17
Obr. 8 Kostel Nanebevzetí Panny Marie [30].....	18
Obr. 9 Klášterní areál Rosa Coeli [25].....	19
Obr. 10 Katedrála sv. Alžběty [26] .....	19
Obr. 11 Kostel svatého Ducha [27].....	20
Obr. 12 Optimální doba dozvuku podle české normy ČSN 73 0525 [28] .....	21
Obr. 13 Interiér kostela sv. Filipa a Jakuba.....	26
Obr. 14 Impuls k měření pomocí akustické pistole .....	26
Obr. 15 Interiér kostela Panny Marie Pomocnice křesťanů.....	27
Obr. 16 Absorbéry na stropě kostela Panny Marie Pomocnice křesťanů .....	27
Obr. 17 Interiér evangelického kostela .....	28
Obr. 18 Strop evangelického kostela .....	28
Obr. 19 Poklesové křivky pro vybraná třetinooktávová pásma (a. kostel sv. Filipa a Jakuba, b. Evangelický kostel, c. Kostel sv. Panny Marie). .....	30
Obr. 20 Porovnání sklonu vybraných poklesových křivek pro rozsah T20 a T30.....	31
Obr. 21 Rozptyl hodnot dob dozvuků v závislosti na frekvenci .....	32
Obr. 22 Průběh doby dozvuku v závislosti na frekvenci .....	32



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Meteorologické podmínky při měření .....	29
Tab. 2 Doby dozvuku pro jednotlivé spektrální oblasti (v sekundách) .....	35

## ACOUSTIC EVALUATION OF THREE ARCHITECTURAL TYPES OF RELIGIOUS BUILDINGS IN ZLÍN

### AKUSTICKÉ HODNOCENÍ TŘÍ ARCHITEKTONICKÝCH TYPŮ SAKRÁLNÍCH STAVEB VE ZLÍNĚ

<sup>a</sup>Pavel Drábek, <sup>b</sup>Zuzana Svancarová, <sup>a</sup>Vojtěch Křesálek

<sup>a</sup>Tomas Bata University in Zlín, Faculty of Applied Informatics, Czech Republic, pdrabek@fai.utb.cz, kresalek@fai.utb.cz

<sup>b</sup>Tomas Bata University in Zlín, Faculty of Multimedia Communications, Zlín, Czech Republic, ZuzkaSvancarova@seznam.cz

**Abstract:** The acoustics of religious buildings represents one of the most complex cases of architectural acoustics. This is especially due to the fact that the different liturgical functions require other listening requirements. More specifically, in churches, there is often acoustical design conflict between the intelligibility of the spoken word and conditions for enjoyment of music. These spaces can be evaluated by objective or subjective parameters of the acoustic quality of listening positions. This article focuses on the evaluation the reverberation time, as well as the spatial and directional distribution of the acoustic energy of three churches in Zlín, which are distinguished by the time of construction, the architectural style and the building structure.

**Keywords:** religious buildings, acoustics evaluation, reverberation time, decay curve

#### 1. INTRODUCTION

Buildings serving for rituals and worships have become social spaces of a symbolic significance which have been highly sought after since ancient times [1]. For this reason, these "social places" have been given a great deal of attention from the earliest times. Churches and other places of worship have been the highlights of construction work for centuries and their architecture has always dominated in the proper style of art [2]. Over years each religious community had its characteristics requirements for dealing with spatial shapes, dispositions and structural elements that have signed on the space not only visually but also by their listening qualities. One of the main priorities was that the acoustic response of the sacred space had to correspond with a certain tradition and offered a real experience to the visitor [3]. In the old days, all architectural solutions have been based on the intuition and personal experience of interested professionals [4]. Developments in architecture have forced the newly formulated requirements for the construction of buildings and at the same time with the increasing global attention to the issue of acoustic energy transmission, the objective methods have begun to arise alongside those subjective. Subsequently, these objective methods help us in terms of acoustics design, evaluate and adjust large types of spaces. In recent decades, a lot of attention has been paid to objective quantities that are based on the ratios of certain parts of sound energy for defined periods of time. Currently, the most important acoustics quantities considered for the evaluation the listening qualities of the space are reverberation, spatiality, distinctness, clarity and many others. However, despite the knowledge of these criteria, a reliable prediction of the acoustic quality of large spaces cannot be a hundred per cent guaranteed [5]. At present, almost all acoustic analyses are performed using virtual models and simulations.

#### 1. ÚVOD

Stavby sloužící k rituálním a bohoslužebným účelům se již v dávné minulosti staly společenskými prostory se symbolickým významem, které jsou již od pradávna vysoce vyhledávanými místy [1]. Z toho důvodu byla od nejstarších dob těmto „společenským místům“ věnována zásadní pozornost. Sakrální stavby představují po staletí vrcholy stavební činnosti a jejich architektura vždy dominovala v příslušném dobovém slohu [2]. Každé náboženské společenství se v průběhu let vyznačovalo vlastními specifickými požadavky na řešení prostorových tvarů, dispozic a konstrukčních prvků, které se na daný prostor podepsali nejen vizuálně, ale také svými poslechovými vlastnostmi. Mezi hlavními prioritami bylo, aby akustická odezva posvátného prostoru odpovídala jisté tradici a nabídla návštěvníkovi opravdový zážitek [3]. V případě dob dávných bylo veškeré architektonické řešení založeno na intuici a osobních zkušenostech zainteresovaných odborníků [4]. S rozvojem architektury, které si vynutily nově formulované požadavky na výstavbu budov, a současně se zvýšením celosvětové pozornosti o problematice přenosu akustické energie, začaly vznikat vedle subjektivních hodnotících metod také objektivní metody, které nám v současné době pomáhají navrhovat, hodnotit a upravovat rozsáhlé typy prostorů. Problematice objektivních kritérií, založených na poměrech určitých částí zvukové energie v daném prostoru pro definované časové úseky, se v posledních desetiletích věnovala v celosvětovém měřítku velká pozornost. V současné době se mezi nejvýznamnější poměrová kritéria, charakterizující místní poslechové podmínky, řadí míra doznívání, prostorovosti, zřetelnosti, jasnosti a mnohé další. Nicméně spolehlivá predikce akustické kvality poslechových míst v rozsáhlých prostorech není zaručena i při znalosti těchto kritérií. [5] V současné době se téměř veškeré akustické analýzy provádí za pomoci virtuálních modelů a simulací daného prostoru.



## AKUSTIKA, VOLUME 30 / September 2018

www.akustikad.com

This contribution deals with the description of sacral buildings from the point of view of spatial acoustics. From this perspective, the article also mentions the complexity of such a building. Part of the contribution is also evaluation of acoustic properties of three churches in Zlín, which are distinguished by the time of construction, the architectural style, the building structure and the internal arrangement of the other elements. It should be emphasized that this is not a complex acoustic evaluation with all acoustics quantities. Meanwhile, the measured data has been evaluated in terms of reverberation and character of decay curves. Furthermore, the calculated parameters also indicate the spatial distribution of acoustic energy.

## 2. ACOUSTIC REQUIREMENTS

The history of sacred architecture describes a wide variety of functional requirements and how they have been adapted over time: spatial shapes, process layout and structural elements. Traditional worship spaces consist of multiple zones serving different liturgical functions, characterised by different acoustic needs [6]. Considering these zones may be interconnected to some extent, it is clear that there may be a discrepancy between the different listening requirements. Especially, the sound source location (priest, organ, choir) and dimensional disposition of zones are key factors that determine the interaction between interconnected zones [6].

The complexity of the solution of particular spaces depends primarily on their primary purpose [7]. If space is primarily used for speech, several factors influence the quality of its transmission. For preaching, it is the intelligibility of the spoken word, whilst for prayers, it is the noise protection [7]. However, in the case of musical productions, the situation is much more complicated. The point is that subjective perceptions at the listening position are influenced by many factors already, and some of them are related to the physical nature of matter and another of them with an emotionally aesthetic content of accepted musical signals [8]. And because of this considerable variation of individual requirements is acoustics of sacral structures one of the most complex cases of architectural acoustics [3], which is also the main reason for the necessary cooperation between architects and acoustics throughout the project.

In solving such a project, it is necessary to consider the mutual relations between the objective (and measurable) acoustic quantities and subjective parameters of the acoustic quality at selected locations in the space. From the point of view of listeners own enjoyment, those subjective parameters have a higher priority than the objective ones, the reason is the fact that although the objective quantities, such as reverberation time, spatial and directional distribution of acoustic energy, reach optimal values, the audience's assessment may not be positive [7]. An example may be the occurrence of echoes that are very common in large spaces. Long propagation paths and different distances from the sound source can very easily cause these problems [9]. The next chapter develops these issues.

Tento příspěvek se zabývá popisem sakrálních staveb z pohledu prostorové akustiky a bere si za cíl z tohoto pohledu uvést, jak složité stavební dílo taková stavba představuje. Součástí příspěvku je i hodnocení akustických vlastností tří kostelů ve Zlíně, které se odlišují dobou výstavby, architektonickým slohem, stavební konstrukcí a vnitřním uspořádáním ostatních prvků. Je nutné poznamenat, že se nejedná se o komplexní akustické hodnocení se všemi poměrovými kritérii. Pořízené náměry byly prozatím hodnoceny pouze z hlediska dozvívání a charakteru poklesových křivek. Vypočtené parametry také poukazují na rozložení akustické energie v prostoru.

## 2. AKUSTICKÉ POŽADAVKY

Při sledování historie lze pozorovat rozvoj a způsob řešení jednotlivých funkčních prvků tak, aby bylo docíleno požadovaných poslechových vlastností [6]. Tento rozvoj je charakterizován především řešením prostorových tvarů a konstrukčních prvků. Tradiční bohoslužebné prostory se sestávají z většího počtu zón sloužící k různým liturgickým funkcím vyznačující se odlišnými akustickými potřebami [6]. Vzhledem k tomu, že tyto zóny mohou být do jisté míry vzájemně propojeny je zřejmé, že může docházet k rozporu mezi různými poslechovými požadavky. Především umístění zdroje zvuku (kněz, varhany, sbor) a rozměrové dispozice zón jsou klíčovými faktory, které určují vzájemnou interakci propojených zón [6].

Složitost řešení jednotlivých prostorů se odvíjí od jejich primárního účelu [7]. Jde-li v těchto prostorech o řeč, rozhoduje o jejich kvalitě několik faktorů. Pro kázání je to srozumitelnost mluveného slova, v případě modliteben je to především ochrana proti nežádoucímu hluku [7]. Na druhou stranu v případě hudebních představení je situace výrazně komplikovanější, neboť na subjektivní vjemy v místech poslechu má vliv již celá řada faktorů, z nichž některé souvisí s fyzikální stránkou, jiné např. s emocionálně estetickým obsahem přijímaných hudebních signálů [8]. Právě na základě této značné rozdílnosti jednotlivých požadavků, představuje akustika sakrálních staveb jeden z nejsložitějších případů architektonické akustiky [3], což je také hlavním důvodem nezbytné kooperace architekta a akustika po celou dobu projektu.

Při řešení takového projektu je nutné uvážit vzájemné vztahy mezi objektivními a zároveň měřitelnými veličinami akustického pole a subjektivními parametry akustické kvality poslechových míst prostoru. Z hlediska vlastního požitku mají ty subjektivní vyšší prioritu než ty objektivní, a to především proto, že i když některé objektivní veličiny (doba dozvuku, prostorové a směrové rozložení akustické energie) dosahují optimálních hodnot, není zaručeno, že hodnocení posluchačů bude kladné [7]. Příkladem mohou být například tzv. diskretní ozvěny, kterými jsou poměrně často postiženy velké prostory. Dlouhé cesty přenosu a rozdílné vzdálenosti poslechových míst od zdroje zvuku mohou velmi snadno způsobit tyto problémy [9]. Tato problematika je více popsána v následující kapitole.



### 3. SOUND PROPAGATION IN AN ENCLOSED SPACE

Many waves of varying shape characteristics can propagate in the space simultaneously. Eigenfrequencies have a significant influence on the acoustic properties of the space, as the excitation of the sound source occurs when the excitation and the eigenfrequency match the resonance [9]. This fact indicates that the acoustic properties of the enclosed space in terms of the sound propagation from the source to the receiving position are highly dependent on the frequency. Therefore, to ensure a good sound propagation, it is important that appropriate frequency band contains as many eigenfrequencies as possible [9]. This implies that the lowest eigenfrequency should occur at a much lower frequency band than the one on which the sound is propagated [7]. However, in the case of large spaces, this has already been accomplished from low frequencies [10].

Besides the sound propagation, the eigenfrequencies have an effect to temporarily occurring phenomena, i.e. at the beginning the sound source excitation and its end because the sound energy growth due to reflections from the boundaries or expires due to absorption on the walls and in the air [11]. These phenomena most often appear in the form of echoes and the nature of the sound that does not exponentially expire. When two or more eigenfrequency fade out at the same time, the so-called heterodyne effect appears, which is reflected by the decay curve distortion. The actual distribution of sound energy in space is directly dependent on how the eigenfrequencies of space correspond with the frequency band on which the sound energy is propagated [9]. In order to achieve preferably the monotonous dependence of increasing and decreasing of sound energy at a given frequency, it is necessary to ensure that even the lowest frequencies contain as many eigenfrequencies as possible, even for small spaces [7]. This could only be achieved by a suitable design of the dimensions of the subject space [12]. For this reason, in the construction of sacral buildings in a certain period style, a specific proportion of individual dimensions was applied in order to optimize sound propagation over a wide range of frequencies.

### 4. DESCRIPTION OF CHURCHES

This chapter is devoted to the basic description of three churches that have been the subject of evaluation of acoustic parameters in relation to building architecture. The chapter is compiled in a chronological way and includes mainly the constructional and shape description of the interior space.

#### The Church of St. Filip and Jakub

It is a parish church of the local Roman Catholic parish, which forms one of the dominant of the centre of the city of Zlín and is dedicated to St. Filip and Jakub. Since its construction, dating from 1390 to 1420, the church has undergone a lot of repairs, rebuilding and expansion. The most important adaptation of the church was requested at the beginning of the 19<sup>th</sup> century due to the lack of capacity and the impossibility to extend the construction in the original direction, the orientation of the church was changed by turning the church from the east to the south and extending the nave [9].

### 3. ŠÍŘENÍ ZVUKU V UZAVŘENÉM PROSTORU

V prostoru se může ve stejném časovém okamžiku šířit mnoho vln s různou tvarovou charakteristikou. Vlastní kmitů mají podstatný vliv na akustické vlastnosti prostoru, neboť při buzení zvukovým zdrojem dochází při shodě budícího a vlastního kmitočtu k rezonanci [9]. Tento fakt udává, že akustické vlastnosti uzavřeného prostoru z hlediska přenosu zvuku od zdroje k sledované pozici v prostoru jsou značně závislé na frekvenci. Má-li být zajištěn dobrý přenos zvuku, je důležité, aby sledované frekvenční pásmo obsahovalo co největší počet vlastních kmitů [9]. Z toho vyplývá, že nejnižší vlastní kmitočet by se měl vyskytovat na mnohem nižším frekvenčním pásmu než je sledované frekvenční pásmo [7]. Nicméně v případě velkoobjemových prostor je tato skutečnost splněna již od nízkých frekvencí [10].

Rozložení vlastních kmitů má, krom přenosu zvuku, i zásadní vliv na přechodně se vyskytující jevy, tj. při počátku a ukončení působení zvukového zdroje, neboť zvuková energie následkem několikanásobných odrazů od ohraničujících ploch narůstá, popř. vlivem pohlcování zvukové energie okolními stěnami a také ve vzduchu, zaniká [11]. Zmíněné jevy se projevují v podobě ozvěn a charakteru dozívání zvuku, který neprobíhá exponenciálně. Dozívají-li současně dva popř. více vlastních kmitů najednou, dochází k tzv. záznejům, což se projevuje zvlněním průběhu poklesu. Skutečné rozložení zvukové energie v prostoru se přímo odvíjí od toho, jak vlastní kmitů prostoru korespondují s frekvenčním pásmem, na kterém je zvuková energie přenášena [9]. Aby se dosáhlo pokud možno monotónní závislosti narůstání a zanikání zvukové energie na konkrétním kmitočtu, je zapotřebí dbát na to, aby i pro nejnižší kmitočty a malé prostory připadal na určitý kmitočtový interval co největší počet vlastních kmitů [7]. To ovšem může být dosaženo pouze vhodným návrhem rozměrů předmětného prostoru [12]. Z toho důvodu se při výstavbě sakrálních staveb v určitém dobovém slohu uplatňoval určitý poměr jednotlivých rozměrů, aby došlo k optimálnímu šíření zvuku na širokém rozsahu frekvencí.

### 4. POPIS KOSTELŮ

Tato kapitola je věnována základnímu popisu tří kostelů, které se staly předmětem hodnocení akustických parametrů ve vztahu se stavební architekturou. Kapitola je sestavena chronologicky a zahrnuje především konstrukční a tvarový popis vnitřního prostoru.

#### Kostel sv. Filipa a Jakuba

Jedná se o farní kostel místní římskokatolické farnosti, který tvoří jednu z dominant centra města Zlína a je zasvěcen sv. Filipovi a Jakubovi. Kostel od svého vybudování, které se datuje na období 1390 až 1420, prodělal velké množství oprav, přestaveb a rozšíření. Nejzásadnější úpravu si kostel vyžádal na počátku 19. století, kdy z důvodu nedostatečné kapacity a nemožnosti rozšířit stavbu do původního směru, došlo ke změně orientace otočením kostela z východní na jižní a také k rozšíření chrámové lodi [9]. Další rozsáhlou opravu si



## AKUSTIKA, VOLUME 30 / September 2018

www.akustikad.com

Another extensive repair was requested by the church due to the great fire that Zlín suffered in 1819 and then also in 1849.

In the framework of repairing the damaged church, the original building almost disappeared under the Baroque reconstruction, even though the original perimeter walls and vaults were used [9]. The architecture of the interior space is mostly composed of elements typical for the Baroque style, where the influence of Renaissance morphology was still largely influenced. Perfectly there is a Baroque sense of composition and symmetry. When entering the church, the entrance portal passes into the inner spiritual space of the cross-ground plan with the dome up to the main altar. The altar and the floor are made of marble, walls are made up of a combination of stone and brickwork. The walls are further painted in the spirit of the liturgical regulations of the church.

From an acoustic point of view, this is a space whose significant area consists of concave walls and materials with very low sound absorption coefficient. The internal volume is estimated at 5600 m<sup>3</sup>. Together with the great value of the internal volume, it is obvious that this space will be characterized by a relatively high reverberation time in comparison with the following churches.

kostel vyžádal kvůli velkému požáru, který Zlín postihl v roce 1819 a poté také v roce 1849.

V rámci oprav poničeného kostela téměř původní stavba zmizela pod barokní přestavbou, i když bylo využito původní obvodové zdivo a klenby [9]. Architektura vnitřního prostoru je nejvíce tvořena prvky typickými pro barokní sloh, kde se ještě ve značné míře uplatňoval vliv renesančního tvarosloví. Dokonale je zde uplatněn barokní smysl pro kompozici a symetrii. Při vstupu do kostela přechází vstupní portál do vnitřního duchovního prostoru křížového půdorysu s kopulí až k hlavnímu oltáři. Oltář i podlaha je tvořena mramorem, stěny tvořeny kombinací kamenného a cihelného zdiva. Stěny jsou dále opatřeny malbami v duchu liturgických předpisů daného kostela.

Z akustického hlediska se jedná o prostor, jehož významnou plochu tvoří vyduť stěny a materiály s velmi nízkou hodnotou součinitele zvukové pohltivosti. Společně s velkou hodnotou vnitřního objemu, jehož odhadovaná hodnota se pohybuje kolem 5600 m<sup>3</sup>, je zřejmé, že tento prostor se bude vyznačovat poměrně vyšší dobou dozvuku než u následujících kostelů.



Fig. 1: The Church of St. Filip and Jakub (exterior and interior)

Obr. 1: Kostel sv. Filipa a Jakuba (exteriér a interiér)

### Evangelical Church

The Evangelical Church, built in 1936-1937, is one of the most successful sacral buildings of Czechoslovak interwar architecture. Balanced proportions and functionalist simplicity perfectly correspond to the Bata architecture of Zlín. Just as in the past, the church now uses a large number of non-Catholic churches.

During its existence, the interior of the church changed its appearance several times. However, there were no major structural modifications. In most cases, this arrangement only concerned changes in colour and the addition of liturgical symbols [9]. The interior space consists of a vestibule and individual halls. The basic building material is brick, or stone masonry, along with wooden elements (benches, tables, pulpit, wooden panelling on the walls). The floor is largely covered with a higher-pitched carpet, as well as seat cushions on the benches. The ceiling structure is also equipped with an acoustically absorbent material.

### Evangelický kostel

Evangelický kostel, vystavený v letech 1936-1937, patří mezi nejzdařilejší sakrální stavby československé meziválečné architektury. Vyváženými proporcemi a funkcionalistickou jednoduchostí dokonale koresponduje s batovskou architekturou Zlína. Stejně jako v minulosti i nyní kostel využívá větší množství nekatolických církví.

V průběhu své existence změnil interiér kostela vícekrát svůj vzhled. Nicméně nejednalo se o žádné zásadní stavební úpravy. Většinou se daná úprava týkala pouze změny barev a doplnění liturgických symbolů [9]. Vnitřní prostor se skládá z vestibulu a jednotlivých sálů. Základním konstrukčním materiálem je cihelné, příp. kamenné zdivo spolu s dřevěnými prvky (lavice, stoly, kazatelna, dřevěný obklad na stěnách). Podlaha je z velké části pokryta kobercem s vyšším chlupem, stejně tak i sedáky na lavicích. Stropní konstrukce je ještě opatřena akusticky pohltivým materiálem.

From an acoustic point of view, this space can be described as a partially rectangular hexahedron where the ceiling and the floor are not parallel. The internal volume is approximately 2400 m<sup>3</sup> according to the measured dimensions. The mean sound absorption coefficient of the whole space due to the wide variety of materials is noticeably higher than in the previous case.

Z akustického pohledu lze prostor označit jako částečně pravoúhlý šestistěn, kde strop a podlaha nejsou rovnoběžné. Vnitřní objem se dle naměřených rozměrů pohybuje kolem 2400 m<sup>3</sup>. Střední čísel zvukové pohltivosti celého prostoru vzhledem k velké různorodosti materiálů je znatelně vyšší jako u předchozího případu.



Fig. 2: Evangelical Church (exterior and interior)

Obr. 2: Evangelický kostel (exteriér a interiér)

#### The Church of the Panna Marie the Helpers of Christians

This is the newest church in Zlín, whose construction started at the beginning of 2000. Architecturally, the church is a unique example of the new Zlín Functionalism, designed to avoid any visual disturbance of the existing character of the settlement on which it is located [9]. Since it is a recently constructed building, there have been no major changes over the years, as in previous cases.

The church skeleton is made up of a reinforced concrete structure, while the ceiling design is in a cassette form. The base of the church is almost square in shape with cut corners, the floor is tiled. The interior also contains elements that effectively adjust the overall acoustic performance of the space. There are mainly acoustic absorbers which are located on the ceiling and the front of the balcony. Based on the approximate measurement of the interior dimensions, the internal volume is about 4100 m<sup>3</sup>.

Since the church is relatively new, the design and implementation have been done to meet most listening requirements (speech intelligibility and transparency for music performances).

#### Kostel Panny Marie Pomocnice křesťanů

Jedná se o nejnovější kostel ve Zlíně, jehož výstavba byla započata začátkem roku 2000. Architektonicky je kostel jedinečným příkladem nového zlínského funkcionalismu, který byl navržen tak, aby nedošlo k vizuálnímu narušení dosavadního charakteru sídliště, na kterém se nachází [9]. Vzhledem k tomu, že se jedná o nedávně vybudovanou stavbu, nedošlo v průběhu let k žádným zásadním úpravám jako v předchozích případech.

Kostra kostela je tvořena železobetonovou konstrukcí, přičemž řešení stropní konstrukce je v kazetové podobě. Podstava kostela je téměř čtvercového tvaru s useknutými rohy, přičemž podlaha je opatřena kachlovým obkladem. Interiér také obsahuje prvky účelně upravující celkovou akustiku prostoru. Především se jedná o absorbéry umístěny na stropní konstrukci a čele balkonu. Na základě orientačního měření rozměrů vnitřního prostoru je vnitřní objem cca 4100 m<sup>3</sup>.

Vzhledem k tomu, že kostel je poměrně nový, návrh i realizace byla provedena tak, aby došlo k vyhovění požadavků na srozumitelnost mluveného slova a prezentaci hudby.



## AKUSTIKA, VOLUME 30 / September 2018

www.akustikad.com



Fig. 3: The Church of the Panna Marie (exterior and interior)

Obr. 3: Kostel Panny Marie Pomocnice křesťanů (exteriér a interiér)

## 5. METHODOLOGY

Reverberation time is one of the main parameters determining the indoor reverberation characteristics, thus, it is primarily used to assess the acoustic quality of enclosures [9]. For this reason, measuring reverberation was an integral part of the evaluation itself. More specifically, the shape and structure of the decay curve of the impulse response of sound propagation throughout the interior of the churches were analyzed.

## Measuring Equipment

The core of the entire measuring chain is the GRAS GS-40AF omni-directional microphone unit and the Nor1209 preamplifier, both from Norsonic company. The output voltage of the microphones and preamplifiers is fed to a multichannel Nor850 and then to a sound power module software which running the state-of-the-art Windows platform. This station allows the connection of multiple input/output measurement modules. Communication between the data logger and the device for recording and analyzing measured data (PC) is possible wirelessly via WLAN or Bluetooth, or alternatively offers a LAN and USB wired alternative.

For the measurement process, it is very important to set a sampling rate value that must be as small as possible for the decay curve analysis. In this case, the value of 5 ms was selected.

## Description of Measurement

The measurements were made when there were no people in the churches or a minimum. The acoustic evaluation was based on the impulse response of the inner space of the churches. The measurement itself was carried out under the different meteorological conditions shown in Tab. 1 and the range of mid frequencies, for which all measurements, was taken, extends from about 50 to 10 000 Hz.

## 5. METODOLOGIE

Doba dozvuku je jedním ze základních parametrů deklarující vlastnosti zvukového pole uzavřených prostor [9]. Z toho důvodu bylo právě měření doby dozvuku nedílnou součástí samotného hodnocení. Konkrétněji byl analyzován tvar a struktura poklesové křivky impulzní odezvy šíření zvuku celým vnitřním prostorem kostelů.

## Měřicí aparatura

Základní částí celého měřicího řetězce je ucelená jednotka všesměrového mikrofónu Norsonic GRAS GS-40AF a předzesilovače Norsonic Nor1209. Výstupní napětí je přes mikrofónní kabel přiváděno do měřicí stanice Norsonic Nor850, která spolu se stejnojmenným softwarem slouží jako hladinový zapisovač akustického tlaku podle funkce času. Tato stanice umožňuje připojení několika vstupně/výstupních měřicích modulů. Komunikace mezi měřicí ústřednou a zařízením pro záznam a analýzu naměřených dat (PC) je možná bezdrátově přes WLAN nebo Bluetooth popř. nabízí drátovou alternativu LAN a USB.

Pro měřicí proces bylo velmi důležité vhodně nastavit hodnotu vzorkovací frekvence, která pro analýzu poklesové křivky musí být co nejmenší. V tomto případě byla zvolena hodnota 5 ms.

## Popis měření

Měřicí proces byl proveden v hodinách, kdy ve výše zmíněných kostelích nebývá žádný provoz, popř. minimální. Akustické hodnocení bylo provedeno na základě impulzní odezvy vnitřního prostoru kostelů na generované akustické vlnění. Samotné měření bylo provedeno při meteorologických podmínkách, které jsou uvedeny v Tab. 1 a to na měřicím rozsahu třetinoktávových pásem 50 – 10 000 Hz.

The Church of St. Filip and Jakub	
Air temperature	16,9 °C
Relative humidity	48,4 %
Evangelical Church	
Air temperature	11,7 °C
Relative humidity	58,7 %
The Church of the St. Panna Marie	
Air temperature	13,4 °C
Relative humidity	64,3 %

Tab. 1: Microclimatic condition during measurement

First, the time background noise was measured in each band of the monitored frequency range, measured and averaged at the measuring microphone locations. In the case of reverberation time measurement in publicly accessible, the room impulse response may be contaminated with high-level background noise the resulting accuracy is substantially reduced because of a distortion of decay curve slope during the late decay [16].

Kostel sv. Filipa a Jakuba	
Teplota vzduchu	16,9 °C
Relativní vlhkost	48,4 %
Evangelický kostel	
Teplota vzduchu	11,7 °C
Relativní vlhkost	58,7 %
Kostel Panny sv. Marie	
Teplota vzduchu	13,4 °C
Relativní vlhkost	64,3 %

Tab. 1: Mikroklimatické podmínky při měření

Nejprve došlo k měření hladin časově průměrovaného hluku pozadí v každém pásmu sledovaného frekvenčního rozsahu, měřená a průměrovaná v místech měřících mikrofónů. V případě měření za provozu na veřejně přístupných místech může být impulzní odezva měřeného prostoru značně kontaminována hlukem pozadí, přičemž dochází ke snížení výsledné přesnosti naměřených dat, neboť nastává zkrácení charakteru poklesové křivky v pozdní fázi [16].

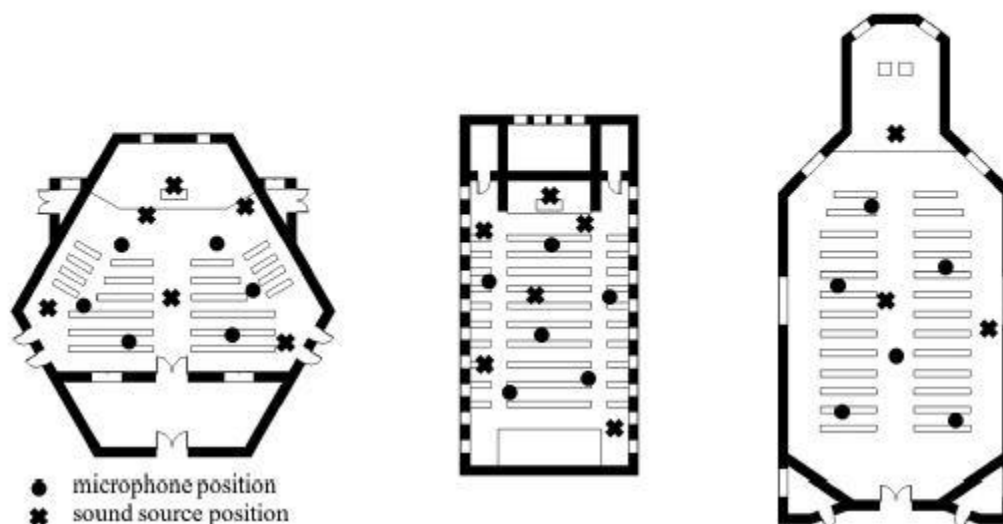


Fig. 4: The layout of the churches and the deployment of measuring equipment (a. The Church of St. Panna Marie, b. Evangelical Church, c. The Church of St. Filip a Jakub)

Obr. 4: Půdorysy kostelů s rozmístěním měřící aparatury (a. kostel sv. Panny Marie, b. Evangelický kostel, c. kostel sv. Filipa a Jakuba)

To measure the reverberation time, the criteria for the exact measurement method according to [9] were met. The reverberation values were obtained using the integrated impulse response method from a level 5 dB below the initial level to 25 dB below. Due to the relatively large volume of interior spaces of sacral structures and the assumption that the indoor acoustic environment is not completely diffused in the observed frequency range, several series of measurements for each third-octave band have to be performed in several different microphone positions. The results of the analysis of the decay curves may vary depending on which part of the slope of the curve is evaluated. If it is an initial slope of the decay curve, it is very important to perform more measurements

Pro měření doby dozvuku byla dodržena kritéria přesné metody měření dle [9]. Hodnoty dob dozvuku byly získány pomocí metody integrované impulsové odezvy pro vyhodnocovací rozsah 5 až 25 dB pod ustálenou hladinou akustického tlaku. Vzhledem k poměrně velkému objemu vnitřních prostorů sakrálních staveb a předpokladu, že vnitřní akustické prostředí není na sledovaném frekvenčním rozsahu kompletně difúzní, bylo zapotřebí provést několik sérií měření pro každé třetí-octávové pásmo ve sledovaném frekvenčním rozsahu a to v několika různých pozicích mikrofónů. Sledovaná místa přijmu byla rovnoměrně rozmístěna v prostoru pro posluchače. Analýza poklesových křivek zaznamenaná ve více pozicích je o to více důležitá, pokud dochází k hodnocení pouze brzké



## AKUSTIKA, VOLUME 30 / September 2018

www.akustikad.com

because the slope in this section may vary considerably [18]. For this reason, the measurement process was performed in six microphone positions and repeated for six different sound source positions (three positions in the church of St. Jakub and Filip)(see Fig. 4). Subsequently, the reverberation time was evaluated using linear regression analysis and least squares interleaving.

## 6. RESULTS

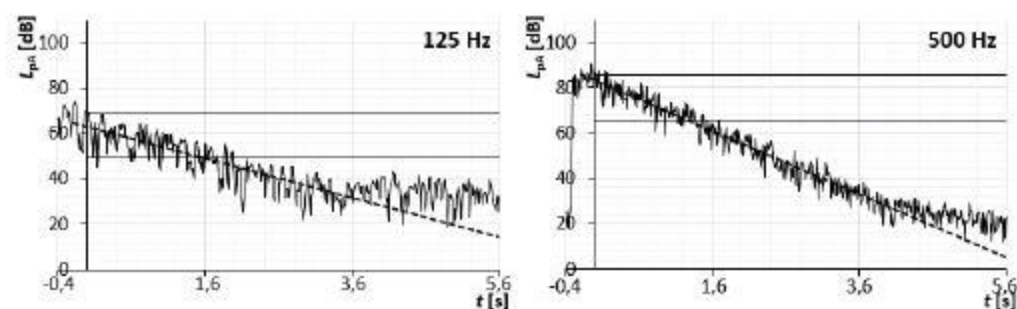
The measured data were analyzed from several views. At first, the slope of all decay curves across a wide frequency range was observed. These curves were obtained for multiple reception positions and their initial and late state were evaluated. As can be seen from the Fig. 5, the resulting curve shape is dependent on both the frequency and the receiver position. It is also possible to see, that curves contain random fluctuations. Changing the position of receiver or source also occurred in other fundamental change of the response consisting in a rapid decrease in a pressure in the initial stage of a sound decay. Fig. 5 also shows the evaluation range for  $T_{20}$ . Most of the fluctuations were burdened with data obtained in the Church of St. Filip and Jakub. For the purpose of determining, the shape of the decay curves was generated the auxiliary lines which describe average long-term changes in sound pressure. From these auxiliary lines, it was observed that the drop in sound pressure in a given frequency range (under 315 Hz) is not entirely linear, as a result of the uneven distribution of eigenfrequencies in the space within this range of frequencies.

fáze poklesové křivky, které se od sebe mohou značně lišit [18]. Z tohoto důvodu byl měřicí proces proveden v 6ti pozicích mikrofónů a opakován pro 6 různých pozic zdroje zvuku (3 pozice v případě kostela sv. Filipa a Jakuba)(viz Obr. 4). Následně byla doba dozvuku vyhodnocena pomocí lineární regresní analýzy a prokládáním metodou nejmenších čtverců.

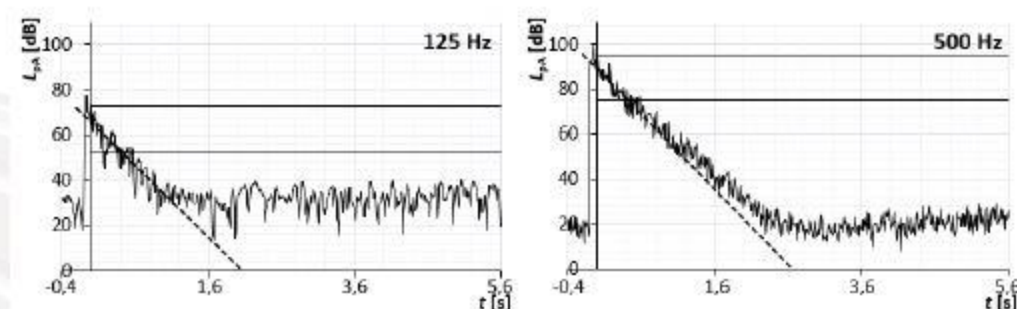
## 6. VÝSLEDKY

Naměřená data byla analyzována z několika pohledů. Nejprve byl sledován sklon poklesových křivek na celém rozsahu středních frekvencí všech třetinooktávových pásem. Každou takovou křivku je možné posuzovat z hlediska brzké a pozdní části, a to v několika místech příjmu. Ze zobrazených průběhů (viz Obr. 5) lze pozorovat, že výsledný tvar křivky je závislý na sledované frekvenci a poloze příjmu. Dále je možné vidět, že poklesové křivky obsahují značné fluktuace a místní poklesy především v brzké části poklesové křivky. Obr. 5 dále zobrazuje i vyhodnocovací rozsah 5 až 25 dB ( $T_{20}$ ) pod ustálenou hladinou akustického tlaku. Naměřené poklesové křivky v kostelu sv. Filipa a Jakuba byly fluktuacemi zatíženy nejvíce. Při konstrukci pomocných přímk pro nižší frekvence (pod 315 Hz), které popisují průměrné dlouhodobé změny akustického tlaku, bylo pozorováno, že poklesové křivky v hodnoceném rozsahu nejsou zcela lineární, což je následek nerovnoměrného rozložení vlastních kmitů v prostoru na tomto rozsahu frekvencí.

a)



b)



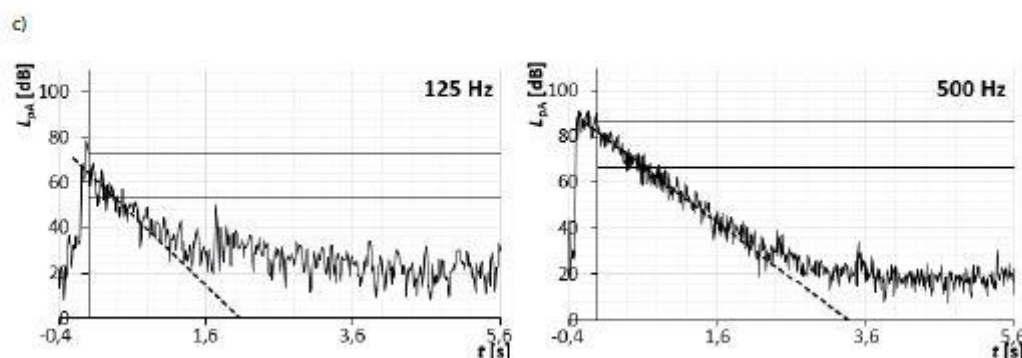


Fig. 5: Decay curves for selected third-octave bands (a. The Church of St. Filip a Jakub, b. Evangelical Church, c. The Church of St. Panna Maria)

Obr. 5: Poklesové křivky pro vybrané třetinoctávové pásma (a. kostel sv. Filipa a Jakuba, b. Evangelický kostel, c. Kostel sv. Panny Marie)

Subsequently, the results of the reverberation time  $T_{60}$  obtained for the evaluation range of 5 to 25 dB ( $T_{20}$ ) and 5 to 35 dB ( $T_{30}$ ) under the steady sound pressure level were compared. This comparison could be performed only for third-octave frequency bands higher than 125 Hz since the used pulse sound source was unable to produce sufficient peak sound pressure over the entire frequency range. For lower frequencies, the results are consistent with the statement in the previous paragraph, where fluctuations and nonlinearity have been signed on a different slope of the line indicating the rate of decrease of the sound pressure (see Fig. 6).

Dále byl porovnáván sklon poklesových přímek získaných z hodnocení poklesových křivek pro vyhodnocovací rozsah 5 až 25 dB ( $T_{20}$ ) a 5 až 35 dB ( $T_{30}$ ) pod ustálenou hladinou akustického tlaku. Toto porovnání bylo možné provádět až pro třetinoctávová pásma se střední frekvencí vyšší než 125 Hz, neboť použitý impulsní zdroj zvuku nebyl schopen vybudit na nižších frekvencích takovou špičkovou hladinu akustického tlaku, aby bylo možné vyhodnocení provést. Pro nižší frekvence jsou výsledky v souladu s tvrzením v předchozím odstavci, kdy se fluktuace a nelinearita podepsaly na různém sklonu přímky udávající rychlost poklesu akustického tlaku. Následující Obr. 6 zobrazuje vliv uvažovaného vyhodnocovacího rozsahu na výslednou hodnotu doby dozvuku, zejména na nižších frekvencích.

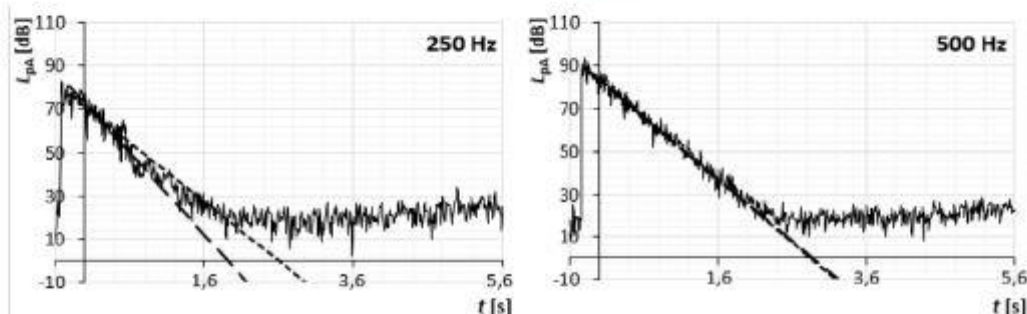


Fig. 6: Comparison of the slope of the selected decay curve for  $T_{20}$  (short dashed line) and  $T_{30}$  (long dashed line) for  $f_m$  250 and 500 Hz

Obr. 6: Porovnání sklonu vybraných poklesových křivek pro rozsah  $T_{20}$  (krátká čárkovaná) a  $T_{30}$  (dlouhá čárkovaná) pro  $f_m$  250 a 500 Hz

Furthermore, it was also advisable to focus on the variance of measured values of reverberation times for multiple observing positions and sound sources because the variance of the measured reverberation times affects the propagation of sound waves and the spatial distribution of sound energy. This value was calculated as the mean value of the quadrant deviations from the mean value [12]. Fig. 7, 8 and 9 demonstrate the sound propagation through space and its instability at lower frequencies. This phenomenon occurs primarily because of

Žádoucí bylo také zaměřit se na rozptyl, resp. variabilitu rozdělení souboru naměřených hodnot dob dozvuku pro více poslechových míst a zdrojů zvuku. Hodnota rozptylu byla vypočtena jako střední hodnota kvadrátu odchylek od střední hodnoty. Rozptyl hodnot naměřených dob dozvuku poté vyjadřuje v závislosti na frekvenci šíření zvukových vln a rozložení zvukové energie v prostoru [12]. Obr. 7, 8 a 9 uvádí, že šíření zvuku prostorem je na nižších frekvencích nestálé z důvodu malého počtu na rozdílnou úroveň vybuděných



## AKUSTIKA, VOLUME 30 / September 2018

www.akustikad.com

a small number of excited eigenfrequencies at different levels and with different constants of attenuation. This is also related to the number of fluctuations in the sound field when the excited tone fades. This is due to the waveform of the sound field and the associated with the existence of its eigenfrequencies causing the irregularity of the frequency characteristic of the space [9]. It is necessary to take into account the results of measurements in this frequency range may be affected by the sound source used, its intensity, directionality and location. Due to these limitations, it is very complicated to accurately determine the reverberation time in this frequency range. It can be seen from Fig. 7, 8 and 9 that the length of the propagation paths and the different distances between the receiving points also affect the resulting values. The most striking is the situation in St. Philip and Jacob, which is primarily due to the shape design and the flat surfaces that focus the sound in certain places. In a contemporary architectural style were these vault and dome shapes used to concentrate sound in the auditorium area and the subjective feeling of spatiality [19]. However, in the case of the inappropriate choice of placement, dimensions and curvature can these elements negatively affect the acoustic performance of the space [4]. Newer architectural styles focusing on functionality are these elements no longer featured [6].

vlastních kmitů s odlišnými konstantami útlumu. Popsaný jev stejně jako množství fluktuací zvukového pole při dozívání je projevem jeho vlnového charakteru a s tím spojené existence vlastních kmitů způsobujících nepravidelnost frekvenční charakteristiky prostoru [9]. Při hodnocení výsledků měření na tomto frekvenčním rozsahu je také nutné brát v úvahu použitý zdroj zvuku a jeho intenzitu v této frekvenční oblasti, jeho směrovost a samotné polohy mikrofonů a zdroje zvuku. Vzhledem k zmíněným omezením je na těchto frekvencích velmi komplikované správně určit dobu dozívku. Z Obr. 7, 8 a 9 lze pozorovat, že na výsledné hodnoty se dále podepisuje délka cest přenosu zvuku a rozdílné vzdálenosti mezi poslechovémi místy. Nejmarkantnější je tato situace ztelná v prostorech kostelu sv. Filipa a Jakuba, což je především kvůli objemu, tvarovému řešení a vyduťtým plochám, které zvuk soustřeďují do určitých míst. Klenbové a kopulové tvary byly v dobovém architektonickém slohu využívány za účelem soustředění zvuku do oblasti hlediště a subjektivního pocitu prostorovosti [19]. Nicméně při nevhodném umístění, rozměrech a zakřivení mohli tyto prvky zhoršit akustiku daného prostoru [4]. Novější stavební slohy zaměřeny spíše na funkčnost již tyto prvky neobsahují [6].

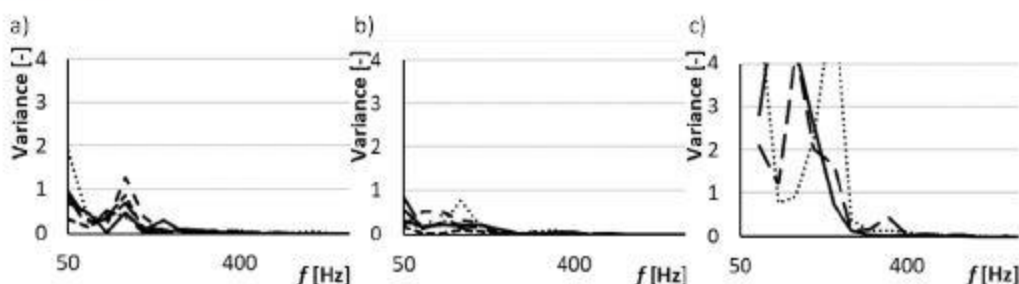


Fig. 7: The variance of reverberation time for each microphone position (a. The Church of St. Panna Maria, b. Evangelical Church, c. The Church of St. Filip a Jakub)

Obr. 7: Rozptyl hodnot dob dozívku pro jednotlivé pozice mikrofonů (a. kostel sv. Panny Marie, b. Evangelický kostel, c. kostel sv. Filipa a Jakuba)

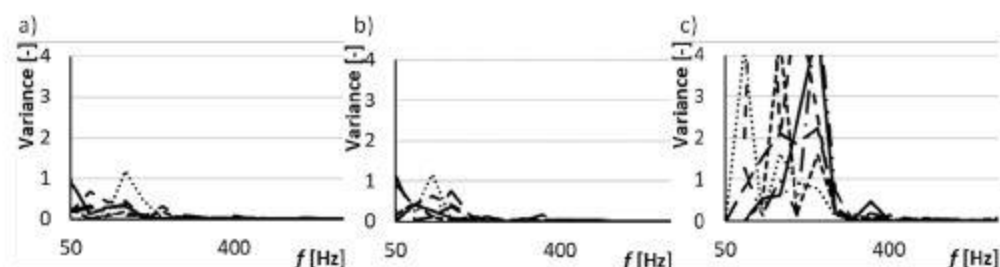


Fig. 8: The variance of reverberation time for each sound source position (a. The Church of St. Panna Maria, b. Evangelical Church, c. The Church of St. Filip a Jakub)

Obr. 8: Rozptyl hodnot dob dozívku pro různé polohy zdroje zvuku (a. kostel sv. Panny Marie, b. Evangelický kostel, c. kostel sv. Filipa a Jakuba)

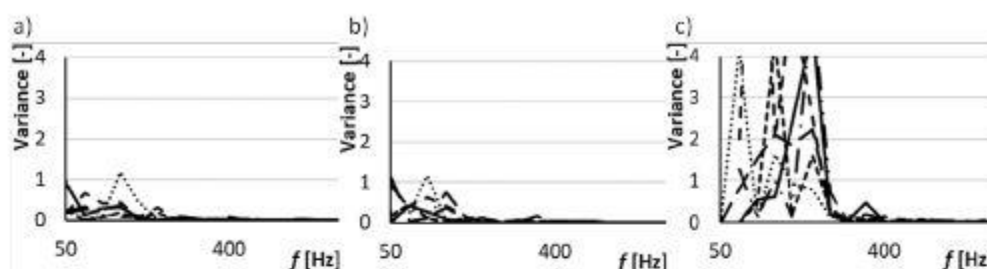


Fig. 9: The variance of all reverberation time values based on frequency

Obr. 9: Rozptyl všech hodnot dob dozvu v závislosti na frekvenci

Particularly important for the diagnosis of the acoustics of the spaces is the process of decaying so-called reverberation [9]. The averaged course of the reverberation times for each church is graphically depicted in Fig. 10.

Zvlášť důležitým pro diagnostiku akustiky prostorů je průběh dozívání tzv. dozvu [9]. Průměrované průběhy dob dozvuků pro každou sakrální stavbu graficky znázorňuje Obr. 10.

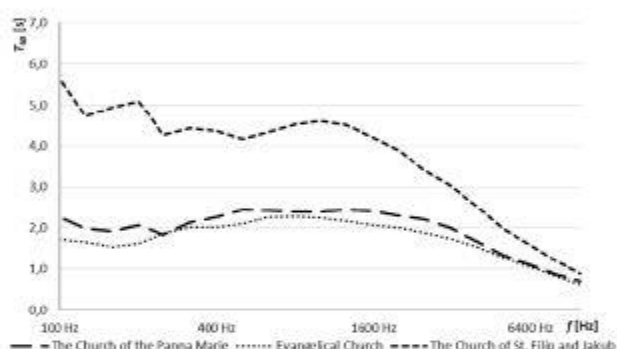


Fig. 10: The course of reverberation time based on frequency

Obr. 10: Průběh doby dozvu v závislosti na frekvenci

It can be seen from the graph that the reverberation time in the church of St. Filip and Jakub is approximately twice as high ( $T_{20} \sim 4s$ ) compared to other churches on a wide range of frequencies. It is predominantly at lower frequencies, as the sound absorption is very low in this range. The loss of sound energy in higher frequencies is primarily due to the influence of sound absorption in the air [9]. The resulting reverberation times for the Evangelical Church and St. The Virgin Mary is very similar in shape and also in values. The reverberation time is also very well flattened on a wide range of frequencies and the average value is about 2 seconds. In these churches, it can be seen that the resulting reverberation time has been artificially modified, in particular, to provide suitable diffusion properties from low frequencies.

Z grafu je patrné, že doba dozvu v kostele sv. Filipa a Jakuba je přibližně dvojnásobná ( $T_{20} \sim 4s$ ) při porovnání s ostatními kostely a to na širokém rozsahu frekvencí. Dominantní je zejména na nižších frekvencích, neboť absorpce zvuku je na tomto rozsahu velmi nízká. Úbytek zvukové energie v oblasti vyšších frekvencí je především způsoben vlivem pohlcování zvuku ve vzduchu [9]. Průběh doby dozvu Evangelického kostela a kostela sv. Panny Marie vykazuje velmi podobného charakteru i hodnot, vyrovnaných na širokém rozsahu frekvencí. Střední hodnota doby dozvu se pohybuje kolem 2s. U těchto kostelů lze vidět, že výsledná doba dozvu byla uměle upravena, především k zajištění vhodných difúzních vlastností již od nízkých frekvencí.

## 7. CONCLUSION

Wave theory applied in enclosed spaces does not allow to fully formulate the conclusions required both in terms of design and the assessment of the acoustic quality in enclosures. The time-varying sound field that the listener perceives as a complex stimulus is the resultant of the interaction between the orchestra, the conductor, the musical work and the space in

## 7. ZÁVĚR

Vlnová teorie aplikovaná na uzavřené prostory neumožňuje plně formulovat závěry, potřebné jak z hlediska návrhů, tak i oceňování akustické kvality uzavřených prostorů. Časově proměnné zvukové pole, které posluchač vnímá jako komplexní podnět, je výslednicí vzájemného působení hudebního tělesa, dirigenta, hudebního díla a prostoru, ve kterém je dilo



## AKUSTIKA, VOLUME 30 / September 2018

www.akustikad.com

which the work is interpreted. Furthermore, the acoustic stimuli are also bound by non-acoustic stimuli, related to the given space, to the musical part, etc. In buildings primarily serving liturgical purposes, the values of the reverberation time may reach their highest values, in some cases even more than 8s [21]. This fact has deep roots into people's heads so much that churches that have a reverberation time of about 1-2 seconds are found to be unsatisfactory, even though for cultural use, especially from the point of view of the comprehensibility of the spoken word or musical performances are these values more appropriate [9].

This contribution deals with the evaluation of acoustic properties of three churches in Zlín, which were built in a different architectural style. When comparing the internal dimensions, respectively the volume and the resulting values of reverberation times, it can be argued that the development of architecture has been moving in the direction of overall functionality. Church of St. Filip and Jakub contain mainly elements of Baroque style, characterized by large internal volume, concave shapes and acoustically reflective surfaces. In this spaces, the interpreted music work or speech had to be appropriately modified to avoid disturbing the clarity of the acoustic signals produced. In the case of the Evangelical Church and the Church of St. Panna Marie, the situation is different, as there were different acoustic demands. These spaces should be used for certain liturgical as well as for other cultural activities.

On the basis of the above conclusions, the authors plan to perform the calculation of other acoustics quantities such as spatiality, distinctness, clarity in the future. The aim is to comprehensively evaluate the acoustic quality of these spaces following extensive studies carried out by other experts in this field.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic within the National Sustainability Programme project No. LO1303 (MSMT-7778/2014) and by the European Regional Development Fund under the project CEBIA-Tech No. CZ.1.05/2.1.00/03.0089 and also by the Internal Grant Agency of Tomas Bata University in Zlín under the project No. IGA/CEBIA-Tech/2018/001.

## REFERENCES

- [1] Baumann, D., Niederstätter C.: Acoustics in Sacred Buildings, In Sacred Buildings, ISSN 978-3-7643-6683-4, Springer, pp. 54-59, 2013
- [2] Šefců, O.: Lexikon architektonických prvků a stavebního řemesla, ISSN 978-80-247-3120-9, Grada Publishing, Praha, p. 256, 2013
- [3] Art & Environment Subcommission: Acoustics for Churches and Chapels, DIOCESE OF COLUMBUS, Columbus, 2003
- [4] Kuttruff, H.: Room Acoustics - Fifth Edition, ISSN 978-0-415-48021-5, Spon Press, Oxon, 2009
- [5] Müller, G., Möser, M.: Handbook of Engineering Acoustics, ISSN 978-3-540-24052-5, Springer, New York, 2013
- [6] Podroužková, P.: Moderní sakrální architektura, Master Thesis, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, České Budějovice, p. 186, 2013
- [7] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/ALFA, Praha, p. 244, 1980
- [8] Everest, A., Pohlmann, K.: Master Handbook of Acoustics - Fifth Edition, ISSN 978-0071603324, McGraw-Hill, New York, p. 529, 2009
- [9] Beranek, L.: Acoustics, ISSN 0-88318-494-X, Acoustical Society of America, New York, 1993
- [10] Kaňka, J.: Akustika stavebních objektů, ISSN 978-80-7366-140-3, Era, Praha, p. 145, 2009

interpretováno. Na akustické podněty jsou vázány i podněty mimoakustické, mající vztah k danému prostoru, k hudebnímu dílu, apod. Ve stavbách sloužící především k liturgickým účelům dosahují hodnoty dob dozvuků svých nejvyšších hodnot, v některých případech i více než 8s [21]. Tato skutečnost se vtiskla do vědomí lidí natolik, že kostely sloužící mimo jiné i ke kulturnímu využití, vyznačující se nižší dobou dozvuku kolem 1 až 2s, jsou shledávány jako neuspokojivé i přesto, že tyto hodnoty jsou z hlediska srozumitelnosti mluveného slova, sborového zpěvu, popř. varhanní hudby vhodnější [9].

Tento příspěvek se zabývá hodnocením akustických vlastností tří kostelů ve Zlíně, které byly postaveny v odlišném architektonickém slohu. Při pohledu na hodnoty vnitřních objemů kostelů ve vztahu k výsledným hodnotám dob dozvuku je zřejmé, že se vývoj architektury v posledních desetiletích ubíral spíše směrem zaměřeným na celkovou funkčnost. Kostel sv. Filipa a Jakuba obsahuje především prvky barokního slohu, který se vyznačuje velkým vnitřním objemem, vyduťtými tvary a akusticky odrazivými povrchy. V těchto prostorech muselo být interpretované dílo vhodně upraveno podle jistých energetických kritérií, aby nedošlo k porušení zřetelnosti produkováných akustických signálů. Odlišná situace je u Evangelického kostela a kostela sv. Panny Marie, kde byly na vnitřní prostory kladeny různorodé akustické požadavky. Tyto prostory jsou vhodné jak pro liturgické funkce, tak i jiná kulturní představení.

Na základě výše uvedených závěrů autoři plánují do budoucna provést výpočet i ostatních poměrových kritérií jako je míra jasnosti, zřetelnosti a mnohé další. Cílem je komplexně zhodnotit akustickou kvalitu těchto prostor a dále tak navázat na rozsáhlé studie, které byly ostatními odborníky v tomto směru provedeny.

## PODEKOVANÍ

Tato práce byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci projektu Národního programu udržitelnosti č. LO1303 (MSMT-7778/2014) a Evropského fondu pro regionální rozvoj v rámci projektu CEBIA-Tech č. CZ.1.05/2.1.00/03.0089 a také interní grantové agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně č. IGA/CEBIA-Tech/2018/001.

- [11] Cox, T., D'Antonio, P.: Acoustic Absorbers and Diffusers - Second edition, ISSN 978-0415471749, Taylor & Francis, New York, p. 495, 2009
- [12] Drábek P., Zálešák M.: Acoustic verification of rectangular reverberation chamber using WSEAS Transaction on Environment and Development, č. 12, pp. 377-385, 2016
- [13] Římskokatolická farnost sv. Filipa a Jakuba ve Zlíně, [Online]. Available: [http://www.farnostzlin.cz/?ukaz=7\\_kostel\\_sv\\_filipa\\_a\\_jakuba&idMenu=7](http://www.farnostzlin.cz/?ukaz=7_kostel_sv_filipa_a_jakuba&idMenu=7). [Access 2017]
- [14] Českobratrská církev evangelická Zlín, [Online]. Available: <http://zlin.evangelnet.cz/historie-kostela>. [Přístup získán 2017]
- [15] Salesiáni Dona Boska, [Online]. Available: <http://zlin.sdb.cz/farnost/kostel-panny-marie/>. [Access 2017]
- [16] Meissner, M.: Evaluation of Decay Times from Noisy Room Responses with Pure-Tone Excitation, Archives Of Acoustics, č. 38, pp. 47-54, 2013
- [17] EN ISO 3382-2, Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, European Committee for Standardization, Brusel, 2009
- [18] Prato, A., Casassa, F., Schiavi, A.: Reverberation time measurements in non-diffuse acoustic field by the modal reverberation time, Applied Acoustics, pp. 160-169, 2016
- [19] Vaverka, J.: Stavební fyzika 1, ISSN 80-214-1283-6, VUT v Brně, Brno, 1998
- [20] Meissner, M.: Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape, Applied Acoustics, pp. 583-590, 2008
- [21] Girón, S., Álvarez-Morales, L., Zamarreno, T.: Church acoustics: A state-of-the-art review after several decades of research, Journal of Sound and Vibration, č. 411, pp. 387-408, 2017
- [22] Gade, A. C.: Acoustics for Symphony Orchestras; Status After Three Decades of Experimental Research, Building Acoustics, No. 18, pp. 181-206, 2011



**Pavel Drábek** was born in August 1990 in Zábřeh. He graduated in the field of Integrated Systems in Buildings at Tomas Bata University in Zlín. Since 2014, he has worked as a scientific researcher at the Regional Research Center CEBIA-Tech in Zlín. At the same time, he has also studied doctoral studies at Faculty of Applied Informatics, Tomas Bata University in Zlín. He specializes in the indoor environment of buildings and equipment of environmental engineering. He focuses primarily on the sound propagation in enclosed space and laboratory measuring the acoustic parameters of various devices.



**Zuzana Švancarová** was born in September 1995 in Bohumín. In 2015 she started to study at Tomas Bata University in Zlín at Faculty of Multimedia Communications. Her field of study is Sound Editing so she is primarily making films. But in her Bachelor's work she wants to focus on acoustic.



**Vojtěch Křesálek** was born in 1952. He received RNDr. (1979) and PhD. degree (1984) in physical optics. For a brief time, he was with Chalmers University, Göteborg, Sweden. Since his habilitation in 1993 at Technical University in Brno he has been involved with research of electrical properties of the polymer and composite materials. More recently, his interests spanned into terahertz spectroscopy and applied optics generally.