

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA KONSTRUKCÍ POZEMNÍCH STAVEB

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akustika atrií

Acoustics of atriums

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Jiří Nováček, Ph.D.

PRAHA 2017

Bc. Anna Katrňáková



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Katrňáková Jméno: Anna Osobní číslo: 396093

Zadávací katedra: k124 - katedra konstrukcí pozemních staveb

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Akustika atrií

Název diplomové práce anglicky: Acoustics of atriums

Pokyny pro vypracování:

Obsahem tematicky zaměřené diplomové práce bude přehled a rozbor atrií (velkoobjemových zastřešených společných prostorů v budovách) z hlediska prostorové akustiky. Důraz bude kladen zejména na přístupy k jejich navrhování a hodnocení z hlediska akustických podmínek. Součástí práce bude vyhodnocení a návrh akustických úprav nejméně jednoho atria, které bude založené na simulačních výpočtech pomocí programu ODEON a/nebo na výsledcích měření.

Seznam doporučené literatury:

Stavební fyzika 3 - Akustika pozemních staveb, Kaňka, J., Nováček, J., učební skriptum ČVUT, 2015

Room acoustics - Kuttruff, H., London: Spon Press, 2009

Prostorová akustika, Kolmer, F., Kyncl, J. SNTL-ALFA, 1980

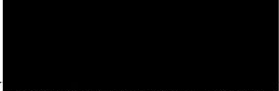
Příslušné právní předpisy a technické normy


Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jiří Nováček, Ph. D.

Datum zadání diplomové práce: 7. 10. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

14. 10. 2016

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Anna Katňáková

Název diplomové práce: Akustika atrií

Základní část: KPS podíl: 100 %

Formulace úkolů: Předmětem práce bude problematika prostorové a kushily atrií. Úvod bude zaměřen na obecný přehled tématu. Dále bude zmapován současný stav z hlediska přístupu k navrhování posuzování atrií. V rámci práce bude rovněž proveden návrh a posouzení akustických úprav nejméně jednoho atriia.

Podpis vedoucího DP: 

Datum: 10.10.2016

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta:

Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta:

Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta:

Datum:

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

ANOTACE

Diplomová práce je zaměřena na akustiku atrií. Součástí práce je teoretický podklad zabývající se prostorovou akustikou a dobou dozvuku. Byl sestaven přehled a rozbor vybraných realizovaných atrií se zaměřením na architektonické, konstrukční a materiálové zpracování a akustické podmínky v těchto prostorech. Dále bylo provedeno výpočtové posouzení modelů atrií z hlediska vlivu objemu, tvarového řešení a rozmístění pohltivosti na dobu dozvuku. Ve vybraném atriu bylo provedeno reálné měření doby dozvuku, vyhodnoceny výsledky měření, vytvořen akustický model prostoru a v něm navrženy úpravy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Prostorová akustika, atrium, doba dozvuku

ANNOTATION

This master's thesis is focused on acoustics of atriums. One part of the thesis consists of the theoretic base about room acoustics and reverberation time. There are a summary and an analysis of current selected realized atriums. This analysis is focused on architectural, structural and material processing and acoustics conditions. Another part of the thesis is about computational assessment of reverberation time in models of atriums. This assessment is based on volume, shape of the atrium and placement of absorption. The measurement of reverberation time was realized in selected atrium. The results were evaluated, the model of the atrium was created and the adjustments were designed in this model.

KEY WORDS

Room acoustics, atrium, reverberation time

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Jiřího Nováčka, Ph.D. a veškeré informační zdroje jsou uvedeny v seznamu literatury.

Praha, leden 2017

.....
Bc. Anna Katrňáková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Jiřímu Nováčkovi, Ph.D., za vedení a odborné konzultace diplomové práce a možnost vyzkoušet si reálná akustická měření se zapůjčenými přístroji. Po celou dobu mého studia na Fakultě stavební ČVUT v Praze jsem měla možnost setkat se a čerpat poznatky od skvělých pedagogů, za což i jim touto cestou děkuji.

Děkuji všem, mnou oslovených správců budov, kteří mi umožnili provést měření v prostorech jejich atrií.

Děkuji především svým rodičům a rodině, za podporu, obětavost a lásku, kterou mě provázejí po celou dobu mého studia.

Obsah

1. Zadání	10
2. Úvod	11
3. Akustika	12
3.1. Šíření zvuku ve volném prostoru.....	12
3.2. Šíření zvuku v uzavřeném prostoru.....	13
4. Prostorová akustika	15
4.1. Vlnová akustika.....	15
4.2. Geometrická akustika.....	15
4.3. Statistická akustika.....	16
5. Doba dozvuku	17
5.1. Výpočet doby dozvuku.....	17
5.2. Optimální doba dozvuku.....	19
5.3. Měření doby dozvuku.....	21
5.3.1. Metoda přerušovaného šumu.....	22
5.3.2. Metoda integrované impulsové odezvy.....	22
6. Zvuk pohlcující konstrukce	23
6.1. Základní rozdělení.....	23
6.2. Současné materiály na trhu.....	24
7. Prostory pro veřejné účely	26
7.1. Provoz v atriích.....	26
7.2. Bezpečnost.....	27
8. Přehled a rozbor atrií	28
8.1. Charles Square Center.....	29
8.2. Kancelářský objekt Nestlé Česko.....	30
8.3. Ústředí ČSOB Group.....	32
8.4. Nová budova Fakulty architektury ČVUT.....	33
8.5. Pobočka České pošty, Praha, Jindřišská.....	35
8.6. Atrium fakulty stavební ČVUT v Praze.....	36
8.7. Národní technická knihovna v Praze.....	38
8.8. Výsledky měření a hodnocení.....	40
9. Modelové varianty atrií	42
9.1. Parametry a výpočet.....	42
9.2. Modely a varianty.....	43
9.3. Výstupní hodnoty.....	46
9.4. Hodnocení.....	52

9.5.	Návrh opatření	53
10.	Program ODEON	56
11.	Vybraný objekt	60
11.1.	Popis prostoru	60
11.2.	Stávající akustický stav	61
11.3.	Měření	61
11.4.	Výsledky měření	65
11.5.	Modelování	66
11.6.	Hodnocení stávajícího stavu.....	71
11.7.	Návrh opatření	71
12.	Závěr.....	78
13.	Literatura, podklady a ostatní zdroje.....	79
13.1.	Literatura.....	79
13.2.	Technické normy a právní předpisy	80
13.3.	www stránky	80
14.	Seznam příloh	82
14.1.	Obrázky.....	82
14.2.	Tabulky	84
14.3.	Grafy	85
14.4.	Výpočty.....	85

1. Zadání

Předmětem diplomové práce je akustika atrií. Konkrétně problematika prostorové akustiky těchto uzavřených prostor a to zejména vzhledem k přístupu k jejich navrhování a hodnocení z hlediska akustických podmínek.

Práci lze tematicky členit do tří bloků. První část je zaměřena na teoretický základ prostorové akustiky, doby dozvuku a používaných akustických materiálů. Druhý blok se věnuje prostorům pro veřejné účely a podává přehled o vybraných současných realizovaných atriích. Rozbor je zaměřen na konstrukční, materiálové a provozní vlastnosti s vlivem na akustiku prostoru. Třetí část práce je praktická. Na základě výpočetních vztahů a simulačního programu byly vytvořeny a podrobeny výpočtu modelové varianty atrií. Ve vybraném objektu, který se nachází v Praze, bylo provedeno měření doby dozvuku na místě. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a byla navržena příslušná opatření.

Cílem této diplomové práce je získání přehledu o navrhování, fungování a akustických vlastnostech specifických prostor, kterými atria jsou. Dále pak možnosti úprav a přístup projektantů a investorů k těmto prostorům.

2. Úvod

V nově projektovaných budovách se často navrhují vnitřní společné prosvětlené prostory, které lze označit jako atria. Při rekonstrukcích budov vznikají atria zastřešením dvorů. Jedná se o vnitřní chráněný prostor, který zpravidla zastává funkci komunikačního uzlu, bývají zde umístěny vertikální komunikace, oddechové prostory s posezením nebo komerční zařízení.

Ať už jsou atria využívána kterýmkoliv výše uvedeným způsobem, vždy se v nich pohybují osoby, které prostorem procházejí, pobývají v něm po krátkou dobu nebo se jedná o jejich pracoviště. Aby jejich pobyt v tomto prostoru byl příjemný, je kromě jiného, důležité zajistit i akustickou pohodu. Tím je myšlena dobrá srozumitelnost řeči bez ozvěny, eliminace provozního a technologického hluku aj. Tyto podmínky lze zajistit již ve fázi projektu nebo následně při rekonstrukci správnou volbou akustických opatření.

Vzhledem k multifunkčnímu využití se ztěžuje klasifikace těchto prostorů, protože je nelze zatřídit do přesné kategorie využití. V rámci této práce byla atria zařazena mezi haly a dvorany veřejných budov, pro které jsou v normách uvedeny doporučené hodnoty akustických limitů (doby dozvuku). Ovšem z hlediska legislativního nejsou tyto limity závazné. Je tedy pouze na rozhodnutí investora, zda bude chtít v prostoru atria řešit akustické podmínky a snažit se limitní hodnoty splňovat.

3. Akustika

Akustika je jedním z oborů fyziky, který se zabývá vznikem a šířením zvukového vlnění, dále jeho vnímáním lidským sluchem, přenosem zvuku a jeho pohybem.

Příčiny a důsledky šíření zvuku lze zkoumat v různých oborech, jako jsou například hudební akustika, elektroakustika nebo stavební akustika.

Z hlediska zaměření této diplomové práce budou teoretickou základnu tvořit poznatky stavební akustiky. Tento obor je zaměřen na kvalitu zvuku v místnostech, zejména v prostorech určených pro poslech hudby nebo mluveného slova. Dále pak se věnuje hygienickým limitům akustických podmínek v chráněných vnitřních a venkovních prostorech.

3.1. Šíření zvuku ve volném prostoru

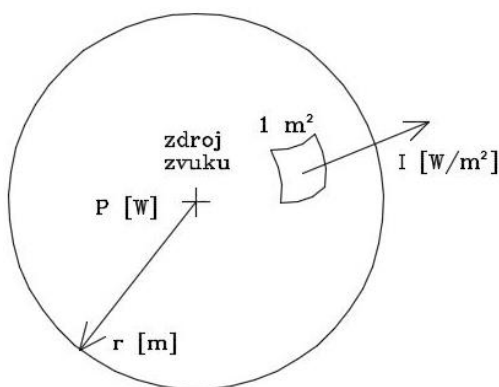
Při šíření zvuku ve volném prostoru se akustický výkon P [W] s rostoucí vzdáleností r [m] od zdroje rozprostírá na stále větší plochu S [m²]. Tím se snižuje intenzita I [W/m²]. Od bodového zdroje se zvuk šíří v kulových vlnoplochách.^[1] Výpočet hladiny akustického tlaku v určité vzdálenosti od bodového zdroje se vypočte podle vztahu (1).

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

L_W je hladina akustického výkonu [dB],

Q činitel směrovosti [-],

r vzdálenost od bodového zdroje [m].



Obrázek č. 1 – šíření zvuku ve volném prostoru

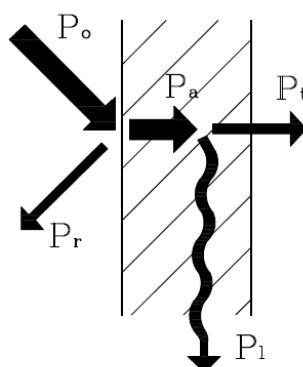
Ve volném zvukovém poli se řeší zejména problematika snižování hluku. *Obecně platí pravidlo: čím blíže ke zdroji je opatření proti hluku umístěno, tím bývá účinnější a často i méně technicky náročné a ekonomicky výhodnější.*^[1]

K útlumu zvuku může docházet vlivem více faktorů: útlum zvuku ve vzduchu, útlum zvuku vlivem gradientu větru, vlivem gradientu teploty, vlivem sněhu nebo ohybem přes překážku.

3.2. Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

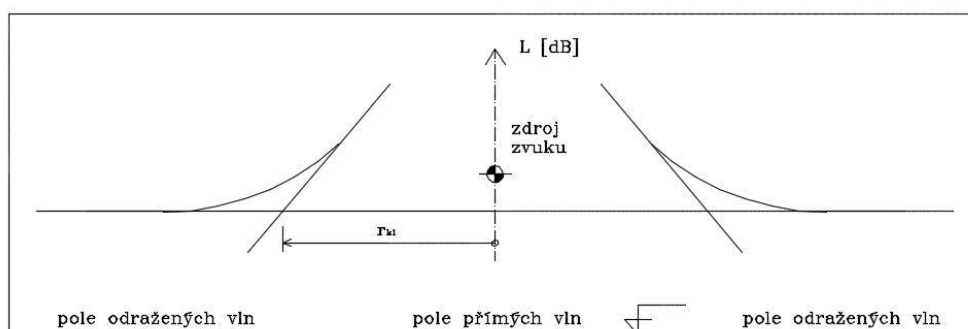
V porovnání s volným prostorem dochází v uzavřeném prostoru ke zvyšování hladiny akustického tlaku díky odrazu zvuku od stěn, stropu a podlahy zpět ke zdroji zvuku. Při dopadu na překážku je část akustického výkonu odražena, část je pohlcena překážkou a část projde.

Na obrázku č. 2 je graficky znázorněno rozložení akustického výkonu při dopadu na překážku.



Obrázek č. 2 – rozložení akustického výkonu při dopadu na konstrukci

Po dopadu zvuku na konstrukci o akustickém výkonu P_0 [W] se část tohoto výkonu od překážky odrazí P_r [W], část je konstrukcí pohlcena P_a [W]. Část pohlceného výkonu se ztratí P_l [W] a část projde konstrukcí do vedlejšího prostoru P_t [W].



Obrázek č. 3 – šíření zvuku v uzavřeném prostoru

Důležitými veličinami v uzavřeném prostoru jsou následující činitelé, kteří jsou bezrozměrná čísla a nabývají hodnot od nuly do jedné. Jsou závislé na kmitočtu zvuku, proto je nutné je stanovovat ve všech oktávových pásmech.

- a) Činitel zvukové odrazivosti ρ [-] – je definován jako podíl odraženého akustického výkonu P_r [W] a dopadajícího akustického výkonu P_0 [W].

$$\rho = \frac{P_r}{P_0} \quad (2)$$

- b) Činitel zvukové pohltivosti α [-] – je definován jako podíl pohlceného akustického výkonu P_a [W] a dopadajícího akustického výkonu P_0 [W].

- je závislý na materiálu, jeho tloušťce a odsazení od tvrdého povrchu stropu nebo stěny (tzn. na tloušťce vzduchové mezery)

$$\alpha = \frac{P_a}{P_0} \quad (3)$$

- c) Činitel prostupu zvuku (průzvučnosti) τ [-] – je definován jako podíl akustického výkonu procházejícího konstrukcí P_t [W] a dopadajícího akustického výkonu P_0 [W].

$$\tau = \frac{P_t}{P_0} \quad (4)$$

V uzavřených prostorech je důležitou veličinou pohltivost povrchů konstrukcí A_i [m^2] (pohltivost i -tého povrchu), které ohraničují uzavřený prostor. Pohltivost je dána součinem plochy povrchu S_i [m^2] a činitelem pohltivosti α [-]. Celková zvuková pohltivost prostoru A [m^2] je dána součtem pohltivostí všech ploch, které místnost ohraničují, ale také zvukových pohltivostí předmětů a osob, které se v prostoru nacházejí.

$$A = \alpha_1 * S_1 + \alpha_2 * S_2 + \dots + \alpha_n * S_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (5)$$

4. Prostorová akustika

Atria lze definovat jako velkoobjemové zastřešené společné prostory v budovách. Fyzikálním oborem, který se zabývá akustickými jevy uvnitř těchto prostor, je prostorová akustika. Předmětem jejího zkoumání je dobrá slyšitelnost a srozumitelnost zvuku v prostoru. Jedná se zejména o prostory, které jsou spojené s poslechem hudby, řečnickým přednesem nebo místa koncentrace většího počtu osob, které mluví ve stejnou dobu (např. divadla, kina, koncertní sály, přednáškové místnosti, soudní síně, haly apod.).

Metody používané v prostorové akustice:

- a) vlnová akustika
- b) geometrická akustika
- c) statistická akustika

4.1. Vlnová akustika

V uzavřeném prostoru se zdrojem zvuku vzniká akustické pole. Prostor v blízkosti zdroje zvuku, který je omezen vzdáleností $r_k [m]$ se nazývá pole přímých vln. Ve vzdálenějších místech od zdroje je pole odražených vln, u nějž se předpokládá, že má difúzní charakter, tzn. ve všech místech je stejná energie.

K zajištění difúznosti zvukového pole používá vlnová akustika následující opatření nebo jejich kombinace:

- a) Velikost uzavřeného prostoru – důraz je kladen na celkový objem uzavřeného prostoru, z hlediska akustiky jsou vhodnější prostory s objemem větším než 100 m^3 .
- b) Různoběžnost stěn prostoru – omezuje stojaté vlnění.
- c) Rozměry prostoru – u pravoúhlého prostoru je vhodné, pokud rozměry nejsou navzájem celistvými násobky (vhodný poměr stran kvádra např. 2:3:5, nevhodný poměr např. 1:2:4).
- d) Obložení stěn, členitost reliéfu stěn pomocí říms, sloupů, polosloupů apod. zvyšuje difúznost zvukového pole.

4.2. Geometrická akustika

Zajištěním kvalitního příjmu zvukového signálu posluchači, kteří jsou různě vzdáleni od zdroje zvuku, se zabývá geometrická akustika. Zejména ve velkých sálech a auditoriích je potřeba zesílit zvukový signál převážně v zadních řadách hlediště. Toho je možné dosáhnout dvojím způsobem:

- 1) elektroakusticky – v místnosti jsou instalovány mikrofony a reproduktorová soustava,
- 2) stavebně – vhodným uspořádáním odrazných ploch, které zajistí, aby odraz zvuku byl směřován do vzdálenějších řad hlediště.

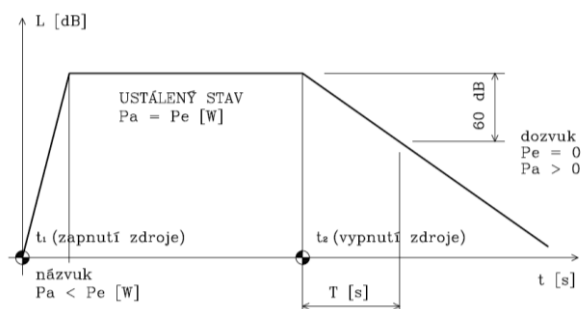
Odrážné plochy se umísťují nejčastěji na strop sálu. Odražený zvuk urazí delší dráhu než přímo šířený zvuk, a k posluchači tak dorazí s určitým zpožděním. Dle velikosti zpoždění zvuku dochází buď k požadovanému zesílení zvuku, nebo naopak k nežádoucí ozvěně a zhoršení srozumitelnosti mluveného slova (směšování hlásek). U velmi vzdálených ploch, u kterých je dráha odraženého zvuku více než trojnásobná vzhledem k přímé dráze, má odražený zvuk již tak malou intenzitu, že není vnímán nijak rušivě.

K posílení zvukového signálu v auditoriích se nejčastěji používá stavebních opatření a to ve formě několika odrazných ploch, rovinných nebo zakřivených, které se umísťují zpravidla na strop sálu. Důležitou zásadou je směřování odrazů zvuku ve směru od zdroje do hloubky sálu. Vhodným opatřením je doplnění prostoru o širokopásmový zvuk pohlcující obklad.

4.3. Statistická akustika

Statistická akustika se zabývá procesy, které nastávají po vypnutí zdroje zvuku. Veličina, se kterou pracuje, se nazývá doba dozvuku T [s].

Průběh hladin akustického tlaku je znázorněn na obrázku č. 4. Při spuštění zdroje zvuku v čase t_1 dochází ke zvyšování hladiny akustického tlaku v poli odražených vln. Tento jev lze označit jako názvuk. Po krátké době dojde k ustálení hladiny akustického tlaku, a tím k rovnováze mezi akustickým výkonem P_e [W] emitovaným zdrojem a akustickým výkonem P_a [W] pohlcovaným ohraničujícími konstrukcemi místnosti. Tento rovnovážný stav je udržován po celou dobu provozu zdroje zvuku. Po vypnutí zdroje zvuku v čase t_2 se ruší pole přímých vln, ale hladina akustického tlaku v poli odražených vln se snižuje postupně. Jednotlivé zvukové vlny po svých odrazech dorazí do konečného místa s menším či větším zpožděním. Tento jev se nazývá dozvuk.



Obrázek č. 4 – průběh hladiny akustického tlaku

5. Doba dozvuku

Standardní doba dozvuku T [s] (doba dozvuku) je doba, za kterou od okamžiku vypnutí zdroje zvuku poklesne hustota akustické energie v daném bodě 10^6 krát. To odpovídá snížení hladiny akustického tlaku v poli odražených vln o 60 dB. Tato hodnota se určuje z lineárně proloženého dozvukového poklesu v úseku mezi hladinami 5 dB až 35 dB pod jeho počáteční hladinou.

5.1. Výpočet doby dozvuku

Doba dozvuku závisí na objemu místnosti V [m^3], celkové pohltivosti místnosti A [m^2] a kmitočtu zvuku, a proto se sleduje v oktávových pásmech, obvykle v rozsahu od 125 Hz do 4000 Hz. Na základě těchto veličin je definován vztah pro výpočet doby dozvuku, který byl odvozen v roce 1898 americkým fyzikem **W. C. Sabine**.

$$T = 0,163 * \frac{V}{A} \quad (6)$$

V je objem místnosti [m^3],

A celková ekvivalentní pohltivá plocha místnosti [m^2], která je definována vztahem (5).

Sabinův vztah je dostatečně přesný pro prostory, které nejsou opatřeny obklady pohlcující zvuk. Pro výpočet doby dozvuku v prostorech opatřených pohlcujícími materiály (tj. pro $\alpha_m > 0,2$) je vhodnější **vztah Eyringův**.

$$T = 0,163 * \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_m)} \quad (7)$$

V je objem místnosti [m^3],

S_i plocha i -tého povrchu [m^2],

α_m střední činitel pohltivosti [-], který je stanoven jako průměrná hodnota ze všech povrchů v místnosti a vypočte se dle vzorce (8).

$$\alpha_m = \frac{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i\alpha_i}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{A}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (8)$$

$$T = 0,163 * \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_m) + 4mV} \quad (9)$$

V prostorech, které mají objem větší než 2000 m³, je Eyringův vztah doplněn o vliv činitele útlumu zvuku ve vzduchu $m [m^{-1}]$ (9). Tento činitel je závislý na teplotě, vlhkosti a kmitočtu. Příslušné hodnoty činitele jsou uvedeny v tabulce č. 1. Specifikace hodnot je pouze pro oktávová pásma od 1000 Hz a to z toho důvodu, že pro nižší pásma jsou hodnoty tohoto činitele velmi malé a tudíž je lze zanedbat.

Tabulka č. 1 – hodnoty činitele útlumu zvuku ve vzduchu m pro oktávová pásma v normálních atmosférických podmínkách, tlak 101,325 kPa, teplota 20 °C (podle ČSN 73 0525 ^[12])

f [Hz]	Relativní vlhkost [%]										
	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1000	0,0041	0,0025	0,0018	0,0013	0,0012	0,0011	0,0012	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013
2000	0,0137	0,0095	0,0067	0,0041	0,0031	0,0027	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0023
4000	0,0297	0,0295	0,0242	0,0161	0,0118	0,0094	0,0079	0,0069	0,0063	0,0058	0,0055

V místnosti s nerovnoměrným rozložením pohltivosti lze pro výpočet doby dozvuku použít metodu Arau-Puchades (1988).

$$T = \left[\frac{0,163 V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_{m,x}) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} * \left[\frac{0,163 V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_{m,y}) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} * \left[\frac{0,163 V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1-\alpha_{m,z}) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (10)$$

$\alpha_{m,i}$ je střední činitel pohltivosti ve směru dané osy (x, y, z) [-], který je stanoven jako průměrná hodnota ze všech povrchů stěn kolmých na danou osu a vypočte se dle vzorce (11).

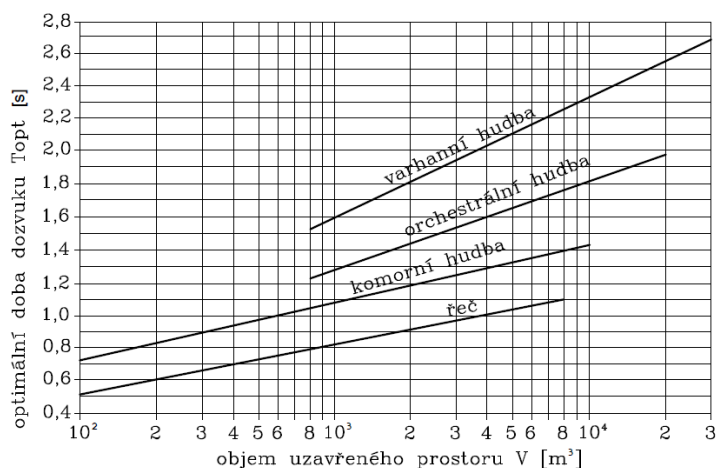
$$\alpha_{m,x} = \frac{S_{x,1}\alpha_{x,1} + S_{x,2}\alpha_{x,2}}{S_x} \quad (11)$$

5.2. Optimální doba dozvuku

Optimální doba dozvuku T_0 [s] je doporučená hodnota standardní doby dozvuku T , která slouží jako základní kritérium při poslechu v uzavřeném prostoru.

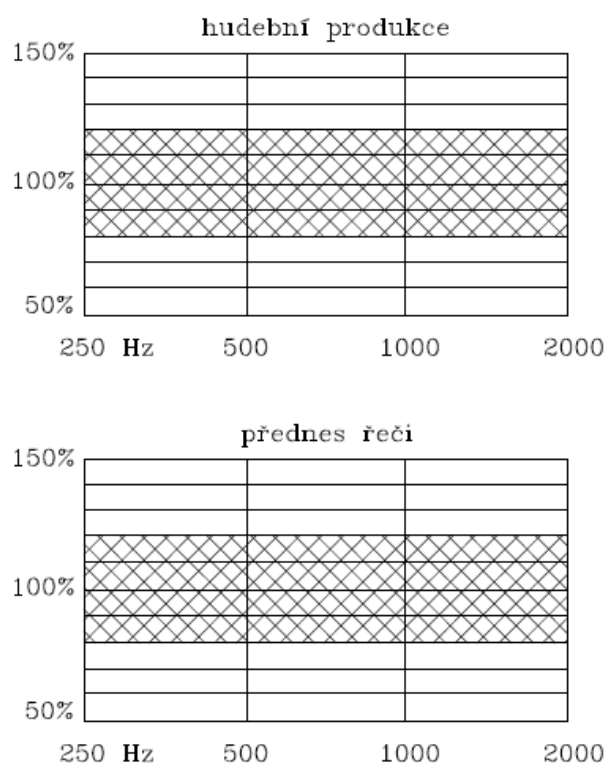
Dosažení optimální doby dozvuku je důležitým faktorem pro zajištění akustické pohody prostoru, ale existuje i řada dalších veličin, které na tuto pohodu mají také vliv, jako např. míra jasnosti, míra zřetelnosti, míra hlasitosti aj. Většina těchto veličin je založena na zpracování impulsových odezev uzavřeného prostoru.

Dle normy ČSN 73 0525 ^[12] se stanovuje optimální doba dozvuku různých prostor podle jejich účelu a objemu V [m³], jak je znázorněno na obrázku č. 5. Je požadováno, aby této hodnoty bylo dosaženo ve stanovených oktávových pásmech včetně povolených tolerancí podle obrázku č. 6.



Obrázek č. 5 – optimální doba dozvuku různých prostor v závislosti na jejich objemu

(podle ČSN 73 0525 ^[12])

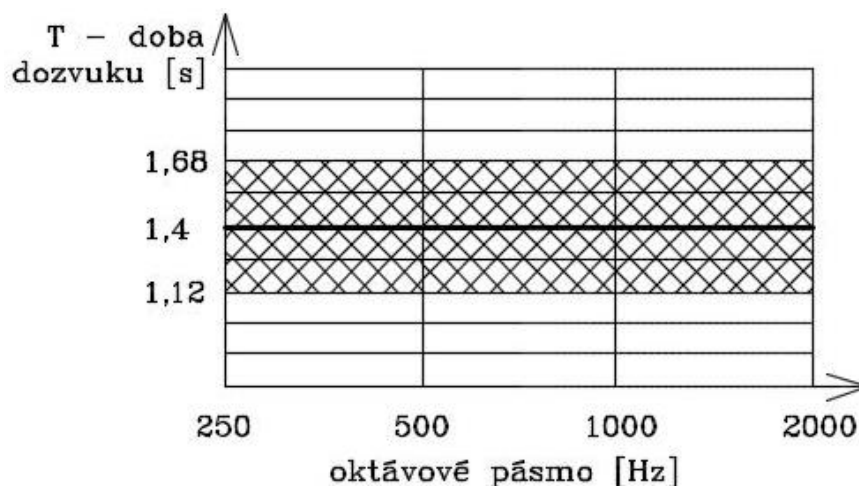


Obrázek č. 6 – povolené tolerance doby dozvuku $T/T_{opt,100}$ [%] pro obsazený prostor v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (podle ČSN 73 0525 ^[12])

Pro dvorany veřejných budov, mezi které lze zařadit i atria, je tato doba stanovena v ČSN 73 0527 ^[13] bez závislosti na objemu daného prostoru hodnotou $T_0 = 1,4$ s (tabulka č. 2).

Tabulka č. 2 - požadavky na prostory pro veřejné účely (podle ČSN 73 0527 ^[13])

Prostor	T_0 [s]	Přípustné rozmezí T/T_0
Tělocvičny	500 m ³ až 3 000 m ³ : $0,3961 \cdot \log V + 0,023$ 3 000 až 20 000 m ³ : $1,0366 \cdot \log V - 2,204$	250 Hz – 2 000 Hz
Sportovní haly		
Plavecké haly		
Nádražní haly		
Letištní haly		
Haly a dvorany veřejných budov (je-li důležitá srozumitelnost řeči)	1,4	250 Hz – 2 000 Hz: 0,8-1,2
Přepážkové haly pošt, spořitelén a bank	širokopásmový obklad stropu	-
Čítárny a studovny	širokopásmový obklad stropu	-



Obrázek č. 7 – rozmezí doby dozvuku

Na obrázku č. 7 je definováno rozmezí přijatelné doby dozvuku pro haly a dvorany veřejných budov, které vychází z tabulky č. 2 a obrázku č. 6. Výsledný interval je $T = \langle 1,12; 1,68 \rangle$.

5.3. Měření doby dozvuku

Měřením doby dozvuku se lze přesvědčit, zda skutečné hodnoty doby dozvuku odpovídají hodnotám, které jsou pro daný účel optimální. Dle výsledků lze navrhnout vhodné akustické úpravy prostoru.

Základní metody měření doby dozvuku jsou metoda přerušovaného šumu a metoda integrované impulsové odezvy.

Pro potřeby měření jsou potřeba následující základní přístroje: zdroj zvuku (např. reproduktor, pokud možno všesměrový), přijímač a vyhodnocovací jednotka (např. PC s výpočetním programem).

Základem měření je vygenerování zvukového pole, k čemuž se použije reproduktor (nebo reproduktory) v pevných polohách a splňující požadavky na směrovost, které jsou uvedeny v příloze A normy ČSN EN ISO 16283-1^[17].

Pro obě metody popsané v odstavcích 5.3.1. a 5.3.2. se doporučuje počet měření podle normy ČSN EN ISO 3382-2^[16] (tabulka č. 21). Dle účelu měření se volí i kmitočtový rozsah. U orientační metody by měl být kmitočtový rozsah minimálně 250 Hz až 2000 Hz, u inženýrské a přesné metody 125 Hz až 4000 Hz v oktávových pásmech.

Tabulka č. 3 – rozsah měření doby dozvuku

kmitočtové pásmo								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
orientační metoda								
inženýrská metoda								
přesná metoda								

Výsledná doba dozvuku se vyhodnocuje z poklesu dozvukové křivky. Hodnocení začíná 5 dB pod počáteční hladinou akustického tlaku. Preferovaný rozsah je 20 dB za předpokladu, že spodní hranice rozsahu vyhodnocení je minimálně 10 dB nad celkovou hladinou hluku pozadí.

5.3.1. Metoda přerušovaného šumu

Základním procesem je vybuzení zvukového pole v posuzovaném prostoru. Po dosažení ustáleného stavu se vypne zdroj zvuku a zaznamená se poklesová křivka.

Jako budící signály se používají třetinooktávové šумы v rozsahu 100 Hz až 5000 Hz nebo oktávové šумы v pásmech 125 Hz až 4000 Hz. Po vypnutí zdroje zvuku se vyhodnocuje pokles hladiny akustického tlaku.

5.3.2. Metoda integrované impulsové odezvy

Měření zvuku je založeno na pulsním signálu, který vzniká např. výstřelem z poplašné pistole, prasknutím nafukovacího balónu nebo speciálními signály (např. MLS = Maximum Length Sequence).

Výsledná doba dozvuku se vypočte dle normy ČSN EN ISO 3382-1 ^[15] ze zpětné integrace kvadrátu filtrované impulsové odezvy.

Metoda je obdobná jako výše uvedená metoda přerušovaného šumu. Liší se ale ve způsobu zachycení signálu a výpočtu doby dozvuku. Tento způsob měření je méně ovlivněn hlukem z pozadí, než předešlá metoda.

6. Zvuk pohlcující konstrukce

V předchozí kapitole byly uvedeny normové požadavky na optimální dobu dozvuku v různých prostorech. Pro dosažení těchto hodnot se v praxi používají zvuk pohlcující konstrukce, které jsou ve většině případů plošného charakteru a umísťují se na strop, zavěšují pod strop nebo osazují na stěny prostoru. Na trhu se v současné době objevují i prostorové útvary, jako jsou např. krychle, kužely apod., které mohou tvořit designový doplněk prostoru.

6.1. Základní rozdělení

Pro zvýšení činitele pohltivosti stropu nebo stěn místností se používají zvuk pohlcující konstrukce různých forem. Tyto prvky snižují hladiny akustického tlaku v poli odražených vln a způsobují změny dalších akustických vlastností místnosti např. i dobu dozvuku.

Při výběru zvuk pohlcující konstrukce je nutné zvážit i další hlediska a to zejména provozní, estetická, požární, ekonomická a hlediska zdravotní nezávadnosti.

Druhy konstrukčních řešení:

- 1) Porézní konstrukce – materiály s vysokou pórovitostí, které jsou tvořeny vlákny nebo ztuhlou pěnou
 - materiály: rohože a desky z minerálních nebo organických vláken.
- 2) Kmitající membrány a desky – jedná se o tenkou desku nebo fólii připevněnou na dřevěný nebo kovový rošt, který určuje tloušťku vzduchové dutiny d [m]
 - materiály: koženka, novodurová fólie, polyetylenová fólie.
- 3) Dutinové rezonátory – základem konstrukce je prvek s dutinou, do které se vkládá pórovitý materiál
 - materiály: tvárnicové rezonátory, děrované desky.
- 4) Kombinované konstrukce
 - vícenásobné rezonanční soustavy – jsou tvořeny několika rezonančními prvky řazenými za sebou
 - akustická tělesa – prostorové útvary ve tvaru jednoduchých geometrických těles, které jsou většinou z pórovitého materiálu krytého pletivem nebo tkaninou.

6.2. Současné materiály na trhu

V současné době se na trhu s akustickými materiály často vyskytuje pojem akustická pěna. Jedná se o polyuretanovou pěnu s výbornými akustickými vlastnostmi. Tou nejpodstatnější je, že pohlcuje zvuk. Této vlastnosti je dosaženo díky její vnitřní struktuře, která je tvořena velkým množstvím mikroskopických vzduchových bublin. Dalšími příhodnými vlastnostmi jsou nízká hmotnost, tvárnost a protipožární vlastnosti, kdy ve styku s ohněm se pěna kroutí a deformuje, nehoří a nedoutná.

Tato pěna může být zpracována v různých formách, velikostech, barvách, provedeních, s různými motivy apod.

Formy zpracování akustické pěny:

- desky, panely, obklady,
- profilované desky (vlny, kostky, jehlany),
- prostorové útvary (kostky, jehlany, kužely).

Dalším akustickým řešením jsou akustické stěnové obklady a podhledy. Tyto kazety jsou v celé své tloušťce perforované, nejčastěji se používají kruhové nebo oválné otvory různých velikostí. Jádro obkladu je z MDF desky¹, která je z obou stran opatřena laminátem nebo pohledovou dýhou. Požadovaných akustických vlastností v prostoru lze dosáhnout možnými úpravami těchto obkladů. Pohltivost je možné ovlivňovat odstupem obkladů od zdi, velikostí otvorů nebo druhem a tloušťkou dalších akustických výplní.

Výběr vhodného akustického materiálu závisí zejména na jeho parametrech. Těmi jsou vlastní rozměry, objemová hmotnost (kg/m^3), teplotní odolnost materiálu, požární parametry a zejména hodnoty činitele pohltivosti.

V následující tabulce je přehled vybraných současných produktů a jejich parametrů.

Tabulka č. 4 – parametry zvuk pohlcujících konstrukcí [22], [29], [30]

popis materiálu	činitel pohltivosti α [-]					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Akustický molitan, tvarován s reliéfem vlnky, tl. 25 mm, objem. hmot. 23-35 kg/m^3	0,08	0,05	0,22	0,5	0,39	0,44
Akustický molitan, tvarován s reliéfem block (kostka), tl. 80 mm, objem. hmot. 23-35 kg/m^3	0,34	0,95	1,14	1,0	1,02	1,04

¹ MDF – Medium Density Fibreboard = polotvrdá dřevovláknitá deska

Akustický podhled Ecophon Focus™ Ds, tl. 20 mm, odsazení 200 mm, plošná hmotnost 3-4 kg/m ²	0,5	0,85	0,85	0,85	1,0	1,0
Ecophon Solo™ Square - volně zavěšené akustické panely ve tvaru čtverce s jádrem ze skelné vlny, tl. 40 mm, odsazení 200 mm	0,5	1,1	1,8	2,2	2,2	1,9
Akustické podhledové desky z minerální vlny Knauf AMF (Thermatex Alpha One), tl. 24 mm, odsazení 200 mm, plošná hmotnost 3,8 kg/m ²	0,55	0,85	1,0	0,95	1,0	1,0

7. Prostory pro veřejné účely

Za prostory pro veřejné účely jsou považovány zejména nádražní a letištní haly, haly veřejných budov, přepážkové haly pošt, spořitelen, bank apod. Zde dochází ke koncentraci většího počtu mluvících osob, proto je důležité, aby v těchto prostorech byla zajištěna dobrá srozumitelnost, zřetelnost a jasnost zvuku.

7.1. Provoz v atriích

Předmětem této diplomové práce je akustika atrií, proto v následujících kapitolách bude věnována pozornost zejména těmto prostorům.

Atria slouží jako komunikační prostor, kde se kříží různé provozy či funkce. Jsou součástí budov různého charakteru (administrativní budovy, školy, knihovny, pošty, veřejné instituce, obchodní centra aj.), kde je zpravidla umístěna recepce, šatna, vertikální komunikace (schodiště, eskalátory, výtahy) a v případě administrativních budov jsou do nich orientovány kanceláře. V budovách se smíšenými funkcemi může být atrium přístupné veřejnosti a sloužit jako komerční prostor, kde jsou situovány menší či větší prodejny, restaurační zařízení, služby apod.

Ve všech zmíněných provozech vzniká hluk, který může být při běžném hovoru v prostoru atria rušivým elementem, což znepríjemňuje či znemožňuje další hovor. Obtěžujícím prvkem může být například pohyb s nákupními vozíky, provoz pokladen, používání jídelního nádobí při stolování či kavárenském provozu. Dalšími zvuky, kterým se často v těchto prostorech nelze vyhnout, jsou zvuky od technologií vzduchotechniky, eskalátorů, výtahů, zavírání dveří, kročejový hluk apod.

Normou ČSN 73 0527 ^[13] jsou doporučeny hladiny přípustného hluku z pozadí. Hodnoty jsou ovšem stanoveny pouze orientačně, protože rušivost hluku při přenosu řeči vždy závisí na druhu a délce produkce, nárocích na kvalitu a dalších okolnostech. Pro nádražní nebo letištní haly, haly veřejných budov, přepážkové haly pošt, spořitelen a bank je doporučena nejvyšší přípustná ekvivalentní hladina akustického tlaku A pozadí $L_{pAeq} = 55 \text{ dB}$.

Doba dozvuku v atriích je důležitým akustickým parametrem. V normě ČSN 73 0527 ^[13] nejsou hodnoty doby dozvuku definovány přímo pro atria, ale tyto prostory lze zařadit mezi haly a dvorany veřejných budov. Pro ně je stanovena doba dozvuku $T = 1,4 \text{ s}$ s přípustným rozmezím hodnot $\pm 20\%$, tudíž hodnoty se mohou pohybovat v intervalu $T = \langle 1,12; 1,68 \rangle$ (obrázek č. 7).

7.2. Bezpečnost

Základními požadavky na bezpečné užívání prostoru atrií jsou zejména nároky na kvalitu a jakost použitých materiálů a stabilitu konstrukčních prvků.

Z hlediska požární bezpečnosti by atria měla tvořit ucelené funkční části, tzn. být samostatným požárním úsekem. Jde o rizikový prostor, kde musí být zajištěn bezproblémový únik osob a zabráněno šíření požáru mimo požární úsek.

8. Přehled a rozbor atrií

V následující kapitole je uveden přehled několika vybraných atrií, které byly zhodnoceny z hlediska architektonického, materiálového a akustického. Přehled slouží pro ilustraci současných trendů v navrhování atrií.

Obecně lze jako atrium označit prostor/dvůr mezi budovami, který je zastřešen a tak je vytvořen další vnitřní prostor. Často vzniká atrium při rekonstrukci objektů, ale není výjimkou i v novostavbách, a to zejména u veřejných budov.

Objemy atrií se pohybují přibližně mezi 500 m³ a 30 000 m³. Použití materiálů je založeno na architektonickém návrhu, ale v současné době se nejvíce používají velké prosklené plochy, nebo na historických objektech původní fasády s klasickou omítkou. Jelikož jsou atria charakteristická právě tím, že tvoří uzavřený prostor, jsou vždy zastřešena. Aby bylo zajištěno dostatečné osvětlení prostoru atria nebo i navazujících prostor, střešní konstrukce je tvořena z ocelových vazníků se zasklením. Na podlahy se zpravidla používají keramické dlažby různých formátů a kvality. Atria slouží jako komunikační uzly, tudíž dlažba musí být odolná. V prostoru jsou často umístěny vertikální komunikace, tj. schodiště, eskalátory nebo výtahy. Tyto prvky mohou mít taktéž různý materiálový charakter, což závisí na návrhu architekta či přání investora.

Jako rešerše byl použit článek o akustice atrií, který byl zpracován na Vienna University of Technology ^[6]. V něm bylo hodnoceno a posuzováno pět atrií. Všechna byla podrobena měřením doby dozvuku a hladiny akustického tlaku A a následně porovnána s modelovou verzí.

Vybraná atria pro diplomovou práci byla na místě podrobena vizuální prohlídce, byla provedena fotodokumentace a měřením zjištěny hladiny akustického tlaku A. Měření proběhlo na místě zvukoměrem AL 1 Acoustilyzer s mikrofonom MiniSPL Measurement Microphone. Ve vybraných objektech bylo provedeno hodinové měření. Vždy po 5 minutách byla změřena a zvukoměrem vyhodnocena půl minutová sekvence. Výstupem měření byly ekvivalentní hodnoty akustického tlaku A, minimální a maximální hodnota a následně vypočten energetický průměr za celou hodinu.

Stanovení energetického průměru z hladin akustického tlaku A za měřenou hodinu bylo provedeno v programu MS Excel dle následujícího vzorce (12).

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i} \sum_{i=1}^n (t_i * 10^{0,1 * L_{Ai}}) \right] \quad (12)$$

n je počet dílčích intervalů,

t_i délka i -tého intervalu [min],

L_{Ai} hladina akustického tlaku A v daném intervalu [dB].

8.1. Charles Square Center

Charles Square Center je nárožní administrativní budovou, která se nachází na Karlově náměstí č. p. 10, Praha 2. Budova, kterou navrhl architekt Jim Goettschem (SIAL Liberec), byla vybudována v roce 2002. Objekt má 3 podzemní podlaží se 143 parkovacími místy a 9 nadzemních podlaží. Celková užitná plocha je 26 990 m², z čehož 15 300 m² zaujímají kancelářské prostory.

Uprostřed objektu je průchozí atrium, které tvoří hlavní komunikační uzel. Průchod je umožněn dvěma vstupy. Prostor atria je přes čtyři podlaží, ale veřejnost má přístup pouze do prvního a druhého. První podlaží je s vyšší světlou výškou. Nachází se zde kavárna s posezením, prodejna potravin, drogerie, papírnictví, květinářství, pobočka banky a další menší komerční prostory. Součástí prostoru je i solitérní zeleň, eskalátory a malý prodejní stánek. Přístup pro veřejnost je po eskalátorech i do 2. nadzemního podlaží, kde jsou umístěny menší obchody a služby.

Parametry atria:

Půdorysné rozměry: cca 37 x 22 m = 814 m²

Výška: cca 18,25 m

Objem: cca 14 856 m³

Materiály: podlaha – keramická dlažba,

strop – zaklenutá ocelová konstrukce se zasklením,

stěny – lehký obvodový plášť, který je tvořen kovovým rámem se zasklením,

ochoz – ocelová kazetová konstrukce se skleněnou výplní, skleněné zábradlí.

V tabulce č. 5 jsou naměřené hodnoty hladin akustického tlaku A a následně vypočten energetický průměr z těchto hodnot. Měření proběhlo ve čtvrtek 24. listopadu 2016 od 9 do 10 hodin dopoledne v prostorech posezení kavárny.

Tabulka č. 5 – hodnoty akustického tlaku A (Charles Square Center)

	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	energ. prům.
$L_{a,ekv}$	64,0	64,0	63,8	66,5	67,3	64,9	66,5	66,5	64,9	66,3	67,0	67,6	66,0
$L_{a,min}$	61,1	60,7	60,3	61,1	64,7	61,8	62,7	63,5	61,6	63,0	64,5	64,6	62,7
$L_{a,max}$	69,4	71,0	67,8	72,5	71,3	69,5	77,4	70,1	69,2	71,4	70,3	71,4	71,7

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v decibelech [dB]

Vyšší hodnoty akustického tlaku v prostoru atria jsou způsobeny zejména provozem kavárny a to kvůli manipulaci s nádobím, použitím kávovaru nebo pokladny, dále hudbou z reproduktorů, která zpříjemňuje posezení v kavárně. Dalším zdrojem zvuku je prodejna potravin a to díky používání pokladen či manipulací s nákupními košíky. Ke zvyšování hladiny akustického tlaku A má taktéž lidská mluva a provozní hluk z prodejen.



Obrázek č. 8 – atrium Karlovo nám. (foto autor)



Obrázek č. 9 – atrium Karlovo nám. (foto autor)

8.2. Kancelářský objekt Nestlé Česko

Nová kancelářská budova, která byla zbudována v roce 2006 v pražských Modřanech (Mezi Vodami 2035/31, 143 00 Praha 4), je dílem architekta Martina Kotíka z architektonického ateliéru Omicron-K. V objektu jsou 2 podzemní podlaží a 5 nadzemních podlaží s celkovou užitnou plochou téměř 15 000 m² a pěti sty zaměstnanci.

Budova má půdorysný tvar písmene U, které je uzavřeno velkolepým atriem, jež navazuje na vstupní prostory budovy, ale zároveň je odděleno vertikálními komunikacemi (schodiště a výtahy). Prostor atria je terasovitě členěn a rozdělen na několik funkčních zón. Velkou část zaujímá relaxační zóna, která je tvořena vzrostlou solitérní zelení, nízkou zelení, vodními plochami a posezením. Dále jsou zde pohovky, sezení a kávový automat, které slouží pro veřejné schůzky nebo posezení u kávy. Do prostoru zasahuje ocelovo-skleněná konstrukce, která odděluje prostor jídelny.

Atrium zaujímá po výšce 5 nadzemních podlaží, od druhého nadzemního podlaží jsou do prostoru atria orientovány otevřené kanceláře, které je možno ještě oddělit od atria stahovacími roletami. Po celé šířce jsou podlaží opatřena velkoplošnými pohltivými obklady Patt. Do prostoru jsou vykonzolovány čtyři zasedací místnosti eliptického tvaru, které mají skleněný plášť. Jejich podlahová konstrukce je ze spodní části, která je vykonzolována do prostoru atria, opatřena taktéž akusticky pohltivým materiálem.

Parametry atria:

Půdorysné rozměry: cca 1088 m²

Výška: cca 24 m

Objem: cca 26 112 m³

Materiály: podlaha – kombinace zeleně, dřevěné mozaiky, vody a dlažeb,

strop – strukturální zasklení,

stěny – strukturální zasklení, pohltivé obklady Patt, bílá omítka.

V tabulce č. 6 jsou naměřené hodnoty hladin akustického tlaku A a následně vypočten energetický průměr z těchto hodnot. Měření proběhlo v úterý 6. prosince 2016 od 9 do 10 hodin dopoledne v prostorech pro veřejné posezení.

Tabulka č. 6 – hodnoty akustického tlaku A (Nestlé)

	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	energ. prům.
$L_{a,ekv}$	58,5	58,8	59,7	56,4	56,2	58,4	57,9	57,3	57,1	60,3	59,4	57,4	58,3
$L_{a,min}$	54,8	53,2	54,2	52,5	53,2	54,3	54,0	53,6	52,4	53,5	54,3	52,7	53,6
$L_{a,max}$	68,3	69,4	70,3	65,5	64,0	65,5	67,0	67,7	66,8	74,0	75,9	69,3	70,1

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v decibelech [dB]



Obrázek č. 10 – atrium Nestlé Modřany (foto autor)



Obrázek č. 11 – atrium Nestlé Modřany

8.3. Ústředí ČSOB Group

Nové ústředí ČSOB Group bylo navrženo architektem Josefem Pleskotem a zrealizováno v roce 2006. Budova je umístěna na Radlické č. p. 333 v Praze a zastavěná plocha činí něco málo přes 16 000 m². Objekt je složen z 6 pavilonů, 3 atrií a 2 dvorů. Celý objekt je navržen v modulu 8,1 m. Velkou část prostorů zaujímají velkoplošné kanceláře pro 2500 úředníků.

Do atrií jsou orientovány kanceláře, proto jsou zde použita akustická opatření. Útlum v kancelářích je zajištěn kobercem na podlaze, nábytkem a zařízením kanceláře. V atriu jsou použity na svislých stěnách (zejména na parapetech jednotlivých podlaží) pohlcující obklady z děrovaného sádkartonu. *Pohltivost stropu byla zvýšena pouze v místech předpokládaného většího zdroje zvuku, tj. v místech provozu občerstvení. Obklad stropu byl v těchto místech realizován pomocí desek z minerálních vláken potažených tkaninou a zavěšených svisle.*^[19]

Parametry atria:

Půdorysné rozměry: cca 24,3 x 24,3 = 590,5 m²

Výška: cca 21 m

Objem: cca 12 400 m³

Z důvodu, že se jedná o prostor centrální budovy banky, nebylo možno provést ani v jednom z atrií měření hladiny akustického tlaku A.

8.4. Nová budova Fakulty architektury ČVUT

Součástí vysokoškolského kampusu Českého vysokého učení technického v Praze - Dejvicích je od roku 2010 i nová budova Fakulty architektury, kterou navrhla architektka Alena Šrámková.

Budova má v půdoryse tvaru písmene L, 3 podzemní podlaží, 8 nadzemních podlaží, 2 vystupující posluchárny a 3 vnitřní krytá atria.

Atria jsou přes celou výšku budovy a slouží zejména jako zdroj denního světla, komunikační prostor a prostor pro příležitostné výstavy, besedy apod.

Hlavním materiálem celého objektu je pohledový monolitický beton, který je dominantním prvkem i v atriích. Podlahy jsou z keramické dlažby a osvětlovací otvory jsou opatřeny zasklením. V každém atriu se nachází monolitické betonové schodiště.

Parametry atria 1:

Půdorysné rozměry: 16x10 = 160 m²

Výška: 30 m

Objem: 4800 m³

Materiály: podlaha – keramická dlažba,

strop – ocelová konstrukce se zasklením,

stěny – pohledový monolitický beton.

V tabulce č. 7 jsou naměřené hodnoty hladin akustického tlaku A a následně vypočten energetický průměr těchto hodnot. Měření proběhlo ve středu 23. listopadu 2016 od 9 do 10 hodin dopoledne v prvním atriu při vstupu z krčku od fakulty stavební.

Tabulka č. 7 – hodnoty akustického tlaku A (Fakulta architektury ČVUT)

	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	energ. prům.
$L_{a,ekv}$	57,3	56,5	56,1	53,8	57,1	54,3	56,7	55,0	51,7	56,9	53,2	51,5	55,4
$L_{a,min}$	52,2	50,5	48,8	47,5	46,1	48,9	50,5	48,1	45,4	49,9	45,3	44,7	48,8
$L_{a,max}$	64,4	63,6	60,9	60,8	69,1	59,1	61,7	65,5	59,6	62,9	65,5	59,6	63,8

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v decibelech [dB]

Měření proběhlo v atriu, které navazuje spojovacím krčkem na fakultu stavební. Tento prostor slouží jako hlavní komunikační prostor, kde se kříží cesty směrem k bufetu, hlavnímu vstupu, vertikálním komunikacím a na studijní oddělení. Jsou zde umístěny i lavice na sezení v prvním podlaží a na ochozech v dalších patrech, tudíž prostor slouží i pro odpočinek, relaxaci či studium. Mobilní vybavení umožňuje v prostoru pořádat výstavy, projekce a další.

Největšími zdroji zvuku jsou kročejový hluk, zabouchnutí dveří, lidská mluva, zvuk výtahu, vstupních turniketů a provoz bufetu.



Obrázek č. 12 – atrium FA ČVUT Praha (foto autor)



Obrázek č. 13 – atrium FA ČVUT Praha

8.5. Pobočka České pošty, Praha, Jindřišská

Pobočka České pošty sídlí v novorenesanční budově č. p. 909/14 v Jindřišské ulici v Praze, je výjimečná tím, že má své přepážky umístěny v atriu, které vzniklo zastřešením dvora. Prostor si zachovává svůj historický vzhled s doplněním nezbytných prvků pro zajištění provozu, jako jsou přepážky, mobiliář na sezení, prodejní stánek, informační a reklamní panely a jiné.

Samotná budova byla vystavěna v letech 1871-1874 a v dalších letech byla ještě upravována. Na konci 19. století došlo na objektu ke stavebním úpravám, při kterých byla přepážková hala zastropena skleněnou střešní konstrukcí. Tento prostor původně sloužil jako dvůr, kam zajížděly poštovní vozy. Při rekonstrukci byla hala opatřena novorenesanční výzdobou, jejímž autorem je malíř Karel Vítězslav Mašek. V letech 1996 až 1999 proběhla velká rekonstrukce a modernizace těchto prostorů.

Parametry atria:

Půdorysné rozměry:	1000 m ²
Výška:	cca 12 m
Objem:	cca 12 000 m ³
Materiály:	podlaha – keramická dlažba, strop – ocelová konstrukce se zasklením, stěny – omítka s malbou.

Do prostoru pošty se vstupuje dvěma vstupy, které vnitřní prostor oddělují od hlučné komunikace ještě vstupní chodbou. Atrium obdélníkového půdorysu s plochou 1000 m² výškově převyšuje tři podlaží. První podlaží je zvýšené se vstupy do budov obklopujících atrium a postranních prostor. Po dvou točitých schodištích lze vystoupat do druhého podlaží. Okna prostor druhého a třetího podlaží jsou orientována do atria, aby bylo zajištěno dostatečné osvětlení prostor.

Ocelová střešní konstrukce se zasklením zajišťuje dostatek přirozeného osvětlení. Konstrukce je valbového typu s minimálním sklonem. Ve střeše je dvanáct polí nahrazeno větracími žaluziemi.

V tabulce č. 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty hladin akustického tlaku A a následně vypočten energetický průměr těchto hodnot. Měření proběhlo ve středu 30. listopadu 2016 od 9 do 10 hodin dopoledne.

Tabulka č. 8 – hodnoty akustického tlaku A (pošta Jindřišská)

	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	energ. prům.
$L_{a,ekv}$	58,9	58,9	56,8	60,2	55,6	57,0	58,8	59,3	57,9	64,6	61,4	57,6	59,6
$L_{a,min}$	53,4	53,4	52,9	54,6	52,8	53,3	54,2	55,2	53,6	55,0	54,8	54,6	54,1
$L_{a,max}$	66,8	67,8	65,2	64,6	60,3	66,2	68,1	64,3	65,1	79,3	73,5	61,0	70,8

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v decibelech [dB]

Největšími zdroji hluku je lidská mluva a provozní hluk pošty jako například zvuk tiskárny, použití razítka nebo manipulace s balíky. Za velmi obtěžující lze označit zvuk odsunutí nebo zasunutí židle ke stolku. Tento jev nastal i v průběhu měření v čase 9:45.



Obrázek č. 14 – atrium pobočky České pošty Praha, Jindřišská (foto autor)

8.6. Atrium fakulty stavební ČVUT v Praze

Budova Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze – Dejvicích se nachází na ulici Thákurova 2077/7 a je složena ze tří objektů, které byly zbudovány v 70. letech 20. století.

Vstupní hala objektu vznikla v roce 1996 zastřešením dvorany budovy C. Projekt a realizaci zajistil architektonický atelier K1arch.

Atrium je obdélníkového půdorysu, s dvěma podlažimi a ochozem v patře. Ochoz je nesen ocelovými sloupky se skleněným zábradlím. Zastřešení je tvořeno ocelovou konstrukcí

pyramidového tvaru s čirým zasklením a osmi otevíratelnými částmi. Rekonstrukce zastřešení proběhla v roce 2015.

Prostor slouží jako hlavní komunikační uzel. Je zde hlavní vstup do budovy s turnikety, vrátnice, šatna, studijní oddělení a kanceláře vedení fakulty. Dále čítárna, prostory na sezení, zeleň a dvě přímá schodiště. V druhém nadzemním podlaží je ochoz se skleněným zábradlím, ze kterého se vstupuje do přednáškových místností a taktéž slouží jako horizontální komunikace.

Žádné plochy nemají akustickou úpravu. Zvuk se z prostoru šíří do dalších objektů, které na atrium navazují.

Parametry atria:

Půdorysné rozměry: cca 1084 m²

Výška: cca 8,5 m

Objem: cca 9215 m³

Materiály: podlaha – keramická dlažba,

strop – ocelová konstrukce se zasklením,

stěny – omítka s malbou.

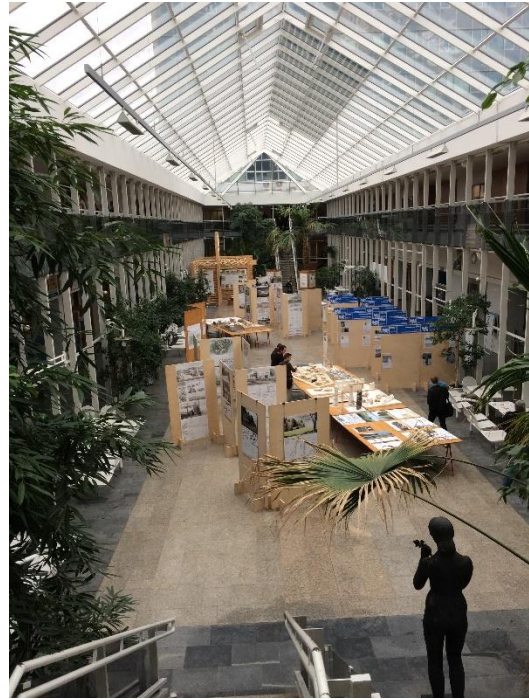
Měření hladiny akustického tlaku A proběhlo v úterý 29. listopadu 2016 od 9 do 10 hodin dopoledne v prvním podlaží. V tabulce č. 9. jsou uvedeny naměřené hodnoty a následně vypočten energetický průměr.

Tabulka č. 9 – hodnoty akustického tlaku A (Fakulta stavební ČVUT)

	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	energ. prům.
$L_{a,ekv}$	54,4	59,2	56,3	53,7	52,8	54,0	52,9	57,3	59,8	56,2	59,1	60,5	57,2
$L_{a,min}$	46,8	51,2	51,4	49,9	48,0	49,0	46,1	52,9	54,6	49,7	54,3	55,2	51,7
$L_{a,max}$	62,9	77,9	61,0	57,6	60,0	61,0	59,2	62,4	64,6	64,6	63,7	68,0	68,5

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v decibelech [dB]

Prostor není opatřen žádnými akustickými úpravami. Největšími zdroji zvuku jsou lidská mluva, zavírání dveří z přednáškových místností ve druhém podlaží, provoz turniketů a kročejoyý hluk.



Obrázek č. 15 – atrium FSv ČVUT Praha (foto autor)

Obrázek č. 16 – atrium FSv ČVUT Praha

8.7. Národní technická knihovna v Praze

Nová budova Národní technické knihovny byla zbudována v letech 2006-2008 v areálu vysokých škol v Praze – Dejvicích. Autorem stavby je architektonické studio Projektíl architekti.

Budova má tvar zaobleného čtverce, 6 nadzemních podlaží a 3 podzemní podlaží. Od druhého nadzemního podlaží je přes všechna podlaží vytvořena centrální dvorana s horním osvětlením, kde jsou umístěny centrální pulty služeb, výtahy, schodiště a ochozy jednotlivých pater.

Ve všech prostorech je barevná kaučuková nášlapná vrstva podlah. Přiznané konstrukce v atriu jsou z pohledového betonu, příčky jsou skleněné.

V atriu je na stěně výtahové šachty umístěna přes celou výšku atria bílá pohlcující akustická deska.

Parametry atria:

Půdorysné rozměry:	cca 18,2 x 34,15 = 621,53 m ² (dle půdorysu střešní konstrukce)
Výška:	cca 24,9 m
Objem:	cca 15 476 m ³

Materiály: podlaha – kaučuková nášlapná vrstva,
 strop – ocelová konstrukce se zasklením,
 stěny – sklo, pohledový beton.

V tabulce č. 10 jsou naměřené hodnoty hladin akustického tlaku A a následně vypočten energetický průměr z těchto hodnot. Měření proběhlo v úterý 22. listopadu 2016 od 9 do 10 hodin dopoledne.

Tabulka č. 10 – hodnoty akustického tlaku A (NTK Praha)

	9:00	9:05	9:10	9:15	9:20	9:25	9:30	9:35	9:40	9:45	9:50	9:55	energ. prům.
$L_{a,ekv}$	45,4	46,0	45,5	43,9	43,7	43,4	46,1	44,4	44,8	47,6	46,2	48,7	45,8
$L_{a,min}$	41,3	41,3	40,9	40,7	39,9	40,3	40,8	40,6	39,3	41,6	40,6	44,3	41,2
$L_{a,max}$	51,7	56,3	54,2	49,2	53,0	49,8	54,3	58,8	52,7	62,5	58,8	56,2	56,5

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v decibelech [dB]

Nejvíce pronikavými zvuky při pobytu v atriu jsou zejména rázy kročejového hluku, dovírání dveří, lidská mluva a taktéž jsou slyšitelné zvukové signály výtahu.



Obrázek č. 17 – atrium NTK s akust. obkladem



Obrázek č. 18 – atrium NTK (foto autor)

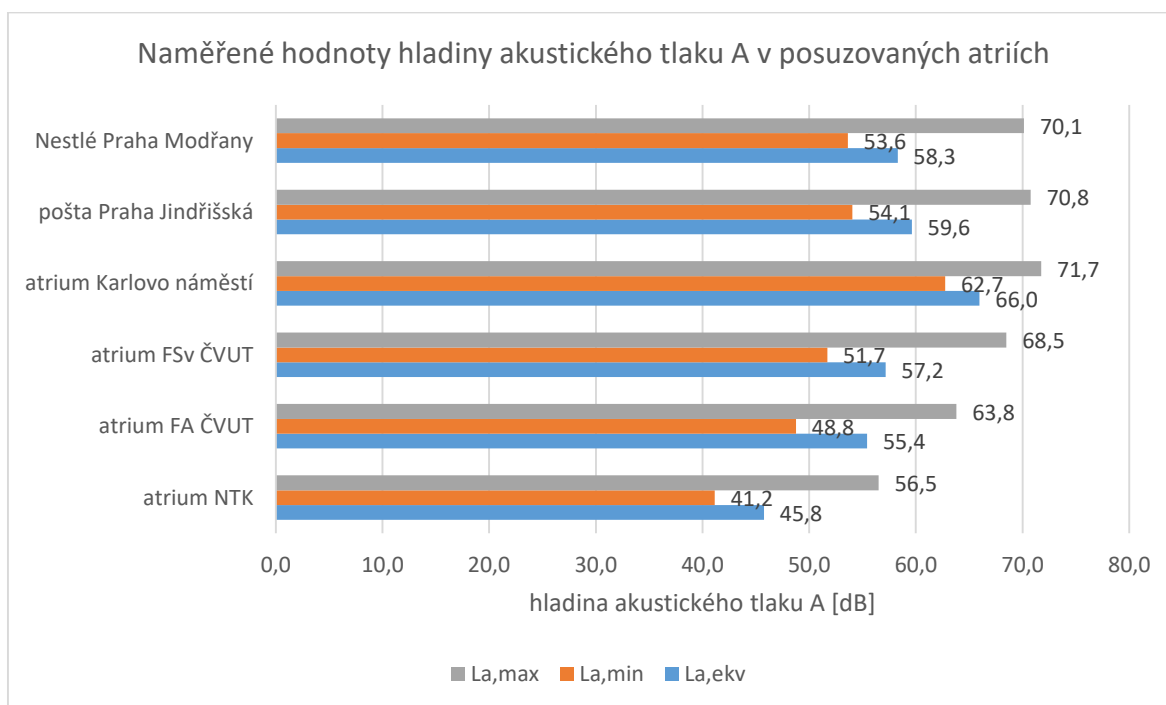
8.8. Výsledky měření a hodnocení

Z jednotlivých měření hladin akustického tlaku A byl vypočten energetický průměr a výsledky jsou zapsány v tabulce č. 11 a znázorněny graficky v grafu č. 1.

Tabulka č. 11 – hodnoty hladin akustického tlaku A v posuzovaných atriích

PROSTOR	ENERGETICKÝ PRŮMĚR		
	$L_{a,ekv}$ [dB]	$L_{a,min}$ [dB]	$L_{a,max}$ [dB]
Nestlé Praha Modřany	58,3	53,6	70,1
Pošta Jindřišská, Praha	59,6	54,1	70,8
Atrium Karlovo náměstí Praha	66,0	62,7	71,7
Fakulta stavební ČVUT Praha	57,2	51,7	68,5
Fakulta architektury ČVUT Praha	55,4	48,8	63,8
Národní technická knihovna Praha	45,8	41,2	56,5

Graf č. 1 – hodnoty akustického tlaku A



V prostorech, kde probíhalo měření, tj. prostory knihoven, pošt, administrativních budov, školních budov nebo obchodních prostor, se vyskytuje provoz, který lze označit jako pracoviště.

Pro pracovní prostředí jsou definovány limitní hodnoty hluku. Ale vztahují se k délce trvání pracovní směny. Měření hladiny akustického tlaku A ve vybraných atriích probíhalo v intervalu jedné hodiny, tudíž výsledné hodnoty nelze porovnávat s limitními.

Vzhledem k různorodosti využití jednotlivých atrií nelze naměřené hodnoty hladin akustického tlaku A porovnávat celkově s některým z legislativních požadavků. Hodnoty lze ale srovnat dle funkčnosti. Vzájemně se maximálně liší o 20 dB. Nejmenší hodnoty byly naměřeny v atriu knihovny, což odpovídá využití takového prostoru a naopak nejvyšší hodnoty akustického tlaku byly zjištěny v atriu na Karlově náměstí, které slouží jako obchodní a komunikační prostor.

Další srovnání bylo provedeno z hlediska nejčastějších zdrojů hluku. V tabulce č. 12 jsou uvedeny zjištěné zdroje hluku v posuzovaných prostorech a taktéž je zde uvedeno, zda je prostor vybaven akustickým opatřením.

Tabulka č. 12 – zdroje hluku v posuzovaných atriích

	NTK	FA ČVUT	FSv ČVUT	Karl.nám	Pošta	Nestlé
kročejevý hluk	•	•	•			
lidská mluva	•	•	•	•	•	•
zavírání dveří	•	•	•			
výtah	•	•				•
turnikety		•	•			
provoz občerstvení		•		•		•
provoz okolních prostor				•	•	•
přírodní faktory (voda)						•
akustické opatření	•					•

Přehled nejčastěji používaných materiálů:

- podlaha – nejčastěji používaným materiálem je keramická dlažba, která je vhodná pro prostory, které slouží jako komunikační uzly a tudíž je nutné, aby byla odolná proti oděru;
- stěny – použití materiálů pro svislé konstrukce závisí na architektonickém zpracování prostoru, jako často používané materiály jsou pohledový beton, omítka nebo sklo;
- střecha – její funkcí je zajištění dostatečného osvětlení prostoru, tudíž se skoro vždy jedná o vazníkovou ocelovou konstrukci se zaklením.

9. Modelové varianty atrií

Atria mají v reálných projektech různé rozměry, liší se celkovým objemem, materiálovou charakteristikou, rozložením pohltivosti i konstrukčním řešením. Na základě těchto podmínek, bylo vytvořeno 48 modelů atrií, které se liší svojí velikostí, tvarovou orientací, pohltivostí ploch a konstrukčním uspořádáním. Jednotlivé varianty byly vytvořeny z toho důvodu, aby mohlo být zjištěno, jaký vliv mají tyto parametry na dobu dozvuku v modelovém prostoru atrie.

9.1. Parametry a výpočet

Hodnocenou veličinou je ve všech případech doba dozvuku T [s], které bylo dosaženo dvěma způsoby. První způsob je založen na výpočtu doby dozvuku podle vztahu Sabine (6), Eyring (9) a Arau-Puchades (10) v oktávových pásmech 250, 500, 1000 a 2000 Hz. Z vypočtených hodnot byla stanovena průměrná hodnota doby dozvuku $T_{30 \text{ stř.}(500,1000)}$ [s] jako aritmetický průměr hodnot dob dozvuku v oktávových pásmech 500 Hz a 1000 Hz.

Druhý způsob získání doby dozvuku v jednotlivých modelech atrií, je podložen modelovou základnou v programu Sketch-up 2014. Vytvořené modely byly importovány do programu ODEON 14 Combined a z něj získané hodnoty pro dobu dozvuku byly použity pro hodnocení. Stejně jako v předchozí variantě byla stanovena průměrná hodnota doby dozvuku $T_{30 \text{ stř.}(500,1000)}$ [s].

Výše uvedené způsoby získání hodnot doby dozvuku, byly sestaveny na základě článku vědeckého listu Applied Acoustics ^[10], který byl zaměřen na srovnání použitých metod. Na referenčním prostoru univerzitní posluchárny zjistili, že na místě použité měřicí metody integrované impulsové odezvy a metoda přerušovaného šumu, poskytují téměř totožné výsledky. Výpočetní program ODEON vykazuje přesné výsledky a z klasických výpočetních metod je nejvhodnější Eyringova metoda, protože její výsledky jsou obdobné skutečně naměřeným.

Základními parametry pro všechny modely jsou jednotlivé rozměry (délka, výška a šířka – počítáno v metrech), jednotlivé plochy S_i [m^2] a celkový objem V [m^3].

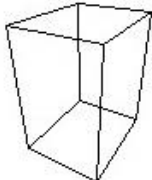
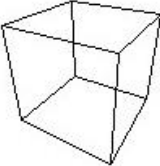
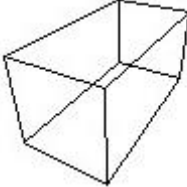
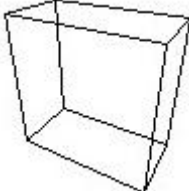
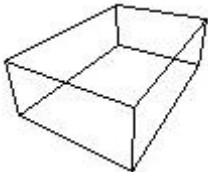
Pro výpočet doby dozvuku daného modelu byl jednotlivým plochám přiřazen parametr činitele pohltivosti materiálu α [-] a na základě plochy vypočtena celková pohltivost místnosti A [m^2] a střední činitel zvukové pohltivosti α_m [-].

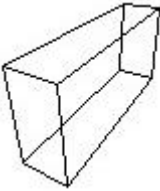
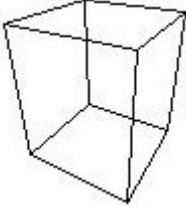
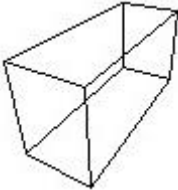
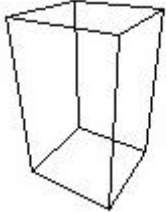
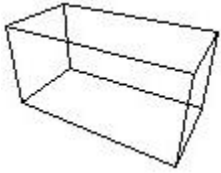
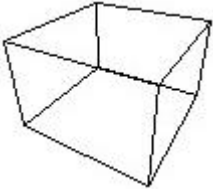
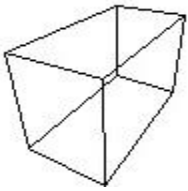
9.2. Modely a varianty

V tabulce č. 13 jsou uvedeny základní modely atrií, které se odlišují celkovým objemem prostoru a tvarovou orientací. V dalším kroku byly posuzovány varianty úpravy prostoru, které se nejčastěji vyskytují v realizovaných atriích. Tyto úpravy prostoru byly taktéž posouzeny z hlediska jejich vlivu na dobu dozvuku a jsou specifikovány v tabulce č. 14.

Všechny varianty modelů atrií byly vytvořeny ve skicovacím programu a následně importovány do programu ODEON 14 Combined, kde byly jednotlivým plochám přiřazeny požadované vlastnosti. Jako modelový zdroj zvuku byl zvolen bodový zdroj, který byl vždy umístěn uprostřed půdorysu 1,5 m nad zemí.

Tabulka č. 13 – přehled modelů atrií

označení	objem [m ³]	axonometrie	poměr stran
referenční	150		1 : 1,25 : 1,6
A	250		1 : 1 : 1
B	500		1 : 2 : 1
C	1000		1 : 0,5 : 1
D	1500		1 : 1,5 : 0,5

E	2000		1 : 4 : 2
F	2500		1 : 1 : 1,5
G	3000		1 : 2,7 : 1,3
H	3500		1 : 1 : 1,75
I	4000		1 : 0,5 : 0,5
J	4500		1 : 1 : 0,67
K	5000		1 : 2 : 1,25

Tabulka č. 14 – popis variant při porovnání modelů

název varianty	popis
ZÁKLADNÍ	model je prostý, v základních rozměrech, pro všechny povrchy byla stanovena pohltivost 5% (součinitel zvukové pohltivosti je ve všech oktávových pásmech roven 0,05).
STROP	model je prostý, v základních rozměrech, kromě stropu byla pro všechny povrchy stanovena pohltivost 5% (součinitel zvukové pohltivosti je ve všech oktávových pásmech roven 0,05). Strop je navržen s 90% pohltivostí (součinitel zvukové pohltivosti je ve všech oktávových pásmech roven 0,9).
VSTUP	vždy ve dvou protilehlých stěnách je ve všech případech vytvořen otvor pro vstup s rozměry 3,15 m výšky a 6,3 m šířky. Tomuto otvoru je přiřazena pohltivost 50% (součinitel zvukové pohltivosti je ve všech oktávových pásmech roven 0,5). Ostatní povrchy mají základní pohltivost 5% (součinitel zvukové pohltivosti je ve všech oktávových pásmech roven 0,05).
OCHOZ	v každém podlaží (po 3,15 m) je vytvořen po celém obvodu ochoz. Hloubka ochozu je 1,5 m, výška zábradlí 1,0 m. Konstrukci ochozu byla přiřazena materiálová charakteristika monolitického betonu (ODEON - materiál 102) a pro zábradlí sklo (ODEON - materiál 10005). Ostatní povrchy mají základní pohltivost 5% (součinitel zvukové pohltivosti je ve všech oktávových pásmech roven 0,05).

9.3. Výstupní hodnoty

V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny vypočtené hodnoty doby dozvuku pro jednotlivé modely a varianty. V každé variantě je vypočtena doba dozvuku podle metody Sabine (6), Eyring (9), Arau-Puchades (10) a pomocí programu ODEON. Postup výpočtu je uveden v předcházející kapitole (9.1. Parametry a výpočet) a pro vybrané modely doložen v přílohách.

Získané hodnoty doby dozvuku jsou graficky znázorněny ve spojnicových grafech (graf č. 2, 3, 4 a 5).

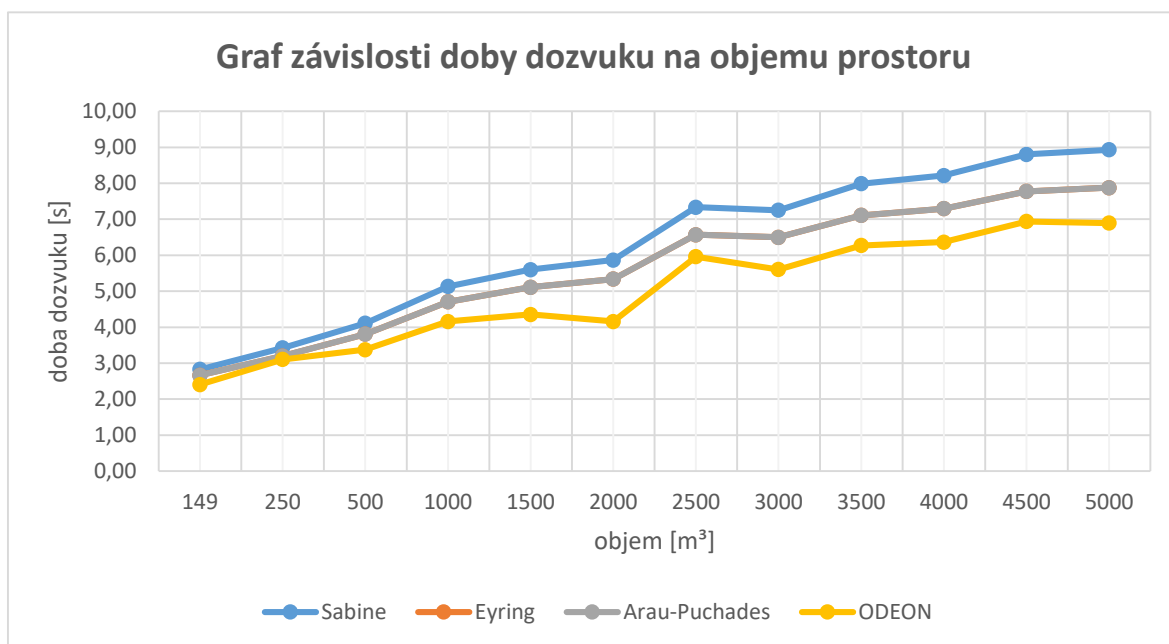
V tabulkách jsou šedou barvou zvýrazněna pole s hodnotami, které splňují normové požadavky na dobu dozvuku podle tabulky č. 2 a obrázku č. 7, tj. jsou v rozmezí $T = \langle 1,12; 1,68 \rangle$.

Varianta: ZÁKLADNÍ

Tabulka č. 15 – hodnoty doby dozvuku – základní varianta

označení	objem [m ³]	<i>T sabine</i> [s]	<i>T eyring</i> [s]	<i>T arau</i> [s]	<i>T odeon</i> [s]
ref	149,1	2,83	2,66	2,66	2,41
A	250	3,42	3,20	3,20	3,11
B	500	4,11	3,81	3,81	3,38
C	1000	5,13	4,71	4,71	4,16
D	1500	5,60	5,11	5,11	4,36
E	2000	5,87	5,34	5,34	4,16
F	2500	7,34	6,57	6,57	5,96
G	3000	7,25	6,50	6,50	5,61
H	3500	7,99	7,11	7,11	6,27
I	4000	8,22	7,30	7,30	6,37
J	4500	8,80	7,77	7,77	6,94
K	5000	8,93	7,88	7,88	6,90

Graf č. 2 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru - základní varianta

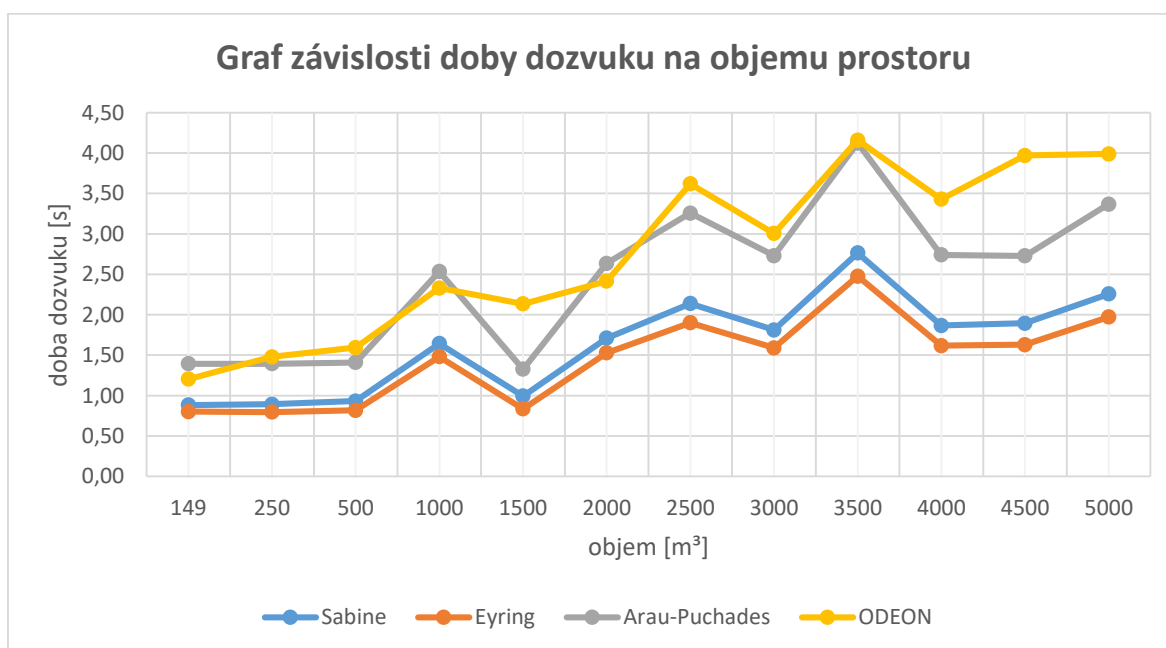


Varianta: STROP

Tabulka č. 16 – hodnoty doby dozvuku – varianta strop

označení	objem [m ³]	<i>T_{sabine}</i> [s]	<i>T_{eyring}</i> [s]	<i>T_{arau}</i> [s]	<i>T_{odeon}</i> [s]
ref	149,1	0,88	0,80	1,39	1,21
A	250	0,89	0,80	1,39	1,48
B	500	0,93	0,82	1,41	1,60
C	1000	1,64	1,48	2,53	2,33
D	1500	0,99	0,84	1,33	2,14
E	2000	1,71	1,53	2,64	2,42
F	2500	2,14	1,90	3,26	3,62
G	3000	1,81	1,59	2,73	3,01
H	3500	2,76	2,48	4,12	4,16
I	4000	1,87	1,62	2,74	3,43
J	4500	1,90	1,63	2,73	3,97
K	5000	2,26	1,97	3,37	3,99

Graf č. 3 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru – varianta strop

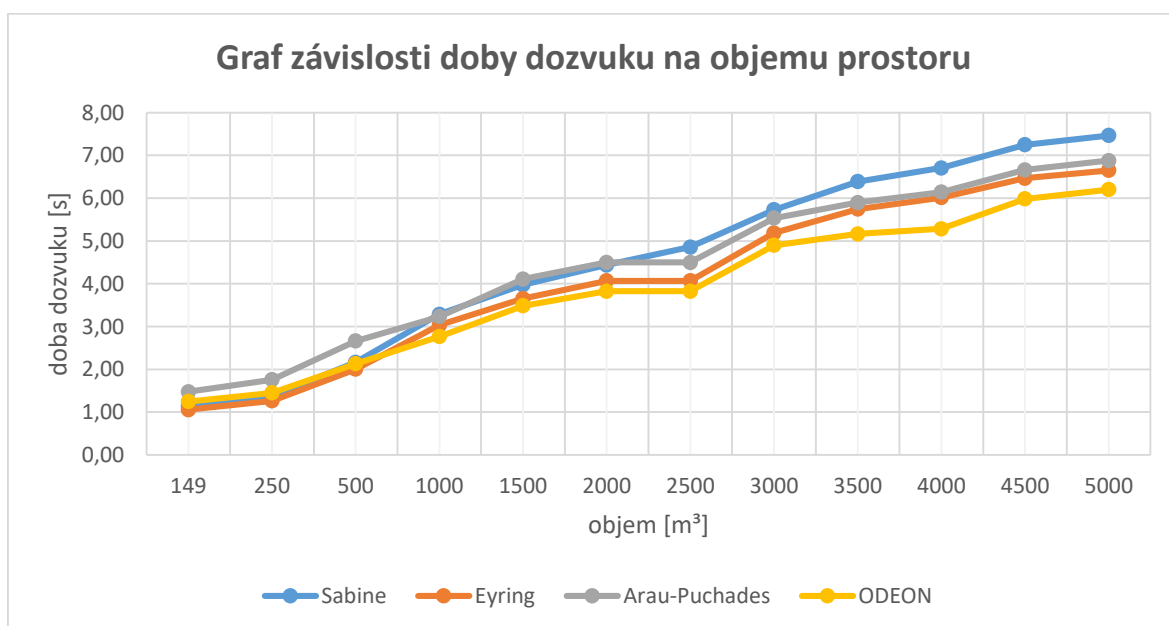


Varianta: VSTUP

Tabulka č. 17 – hodnoty doby dozvuku – varianta vstup

označení	objem [m ³]	<i>T sabine</i> [s]	<i>T eyring</i> [s]	<i>T arau</i> [s]	<i>T odeon</i> [s]
ref	149,1	1,14	1,06	1,47	1,25
A	250	1,37	1,26	1,75	1,45
B	500	2,16	2,00	2,66	2,13
C	1000	3,28	3,03	3,23	2,77
D	1500	3,97	3,65	4,11	3,49
E	2000	4,44	4,07	4,50	3,83
F	2500	4,86	4,07	4,50	3,83
G	3000	5,73	5,19	5,54	4,90
H	3500	6,39	5,74	5,90	5,17
I	4000	6,70	6,01	6,14	5,29
J	4500	7,25	6,46	6,66	5,99
K	5000	7,47	6,65	6,88	6,20

Graf č. 4 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru – varianta vstup

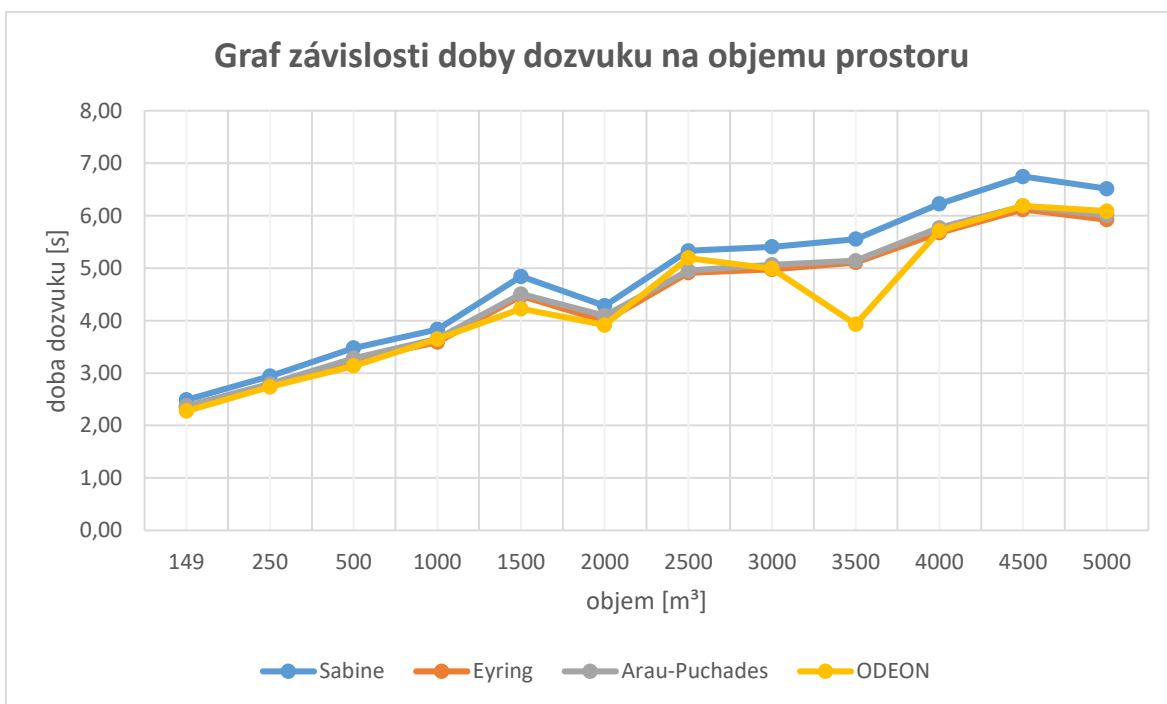


Varianta: OCHOZ

Tabulka č. 18 – hodnoty doby dozvuku – varianta ochoz

označení	objem [m ³]	<i>T sabine</i> [s]	<i>T eyring</i> [s]	<i>T arau</i> [s]	<i>T odeon</i> [s]
ref	149,1	2,49	2,36	2,37	2,28
A	250	2,94	2,78	2,79	2,74
B	500	3,48	3,26	3,28	3,14
C	1000	3,83	3,59	3,65	3,65
D	1500	4,84	4,47	4,51	4,23
E	2000	4,28	3,99	4,09	3,92
F	2500	5,33	4,91	4,95	5,19
G	3000	5,41	4,97	5,06	4,99
H	3500	5,55	5,11	5,14	3,93
I	4000	6,22	5,67	5,77	5,71
J	4500	6,74	6,12	6,18	6,19
K	5000	6,51	5,92	6,00	6,09

Graf č. 5 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru – varianta ochoz

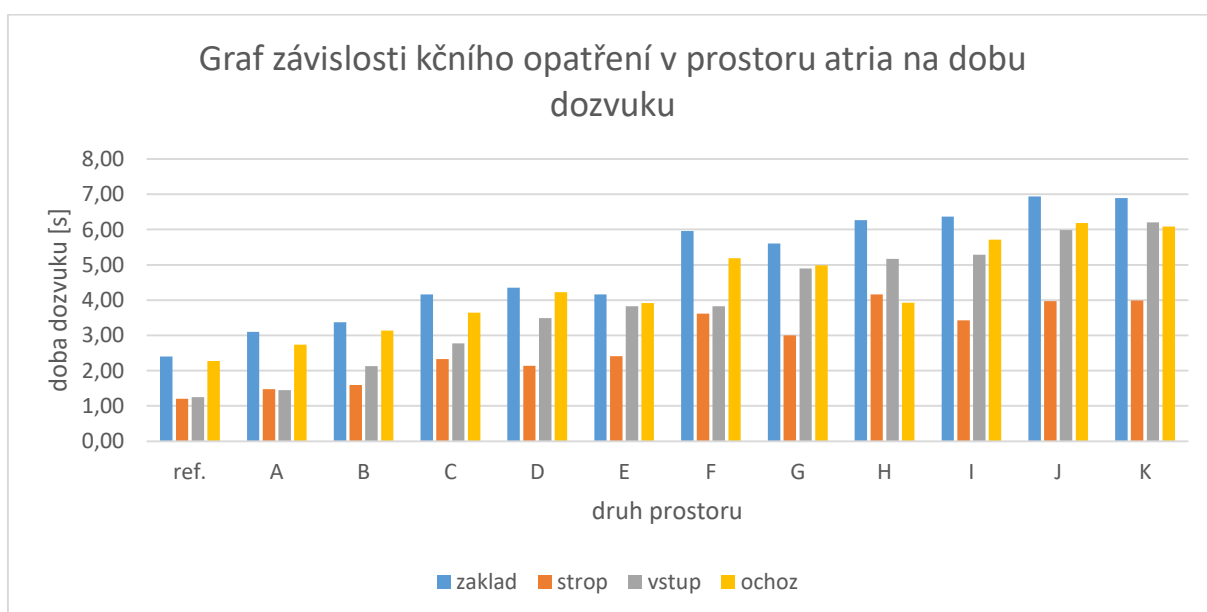


Posouzení doby dozvuku z hlediska použitého konstrukčního opatření (použité hodnoty jsou výstupní hodnoty doby dozvuku z programu ODEON).

Tabulka č. 19 – hodnoty doby dozvuku z hlediska jednotlivých variant

označení	objem [m ³]	T odeon [s]			
		základní	strop	vstup	ochoz
ref	149,1	2,41	1,21	1,25	2,28
A	250	3,11	1,48	1,45	2,74
B	500	3,38	1,60	2,13	3,14
C	1000	4,16	2,33	2,77	3,65
D	1500	4,36	2,14	3,49	4,23
E	2000	4,16	2,42	3,83	3,92
F	2500	5,96	3,62	3,83	5,19
G	3000	5,61	3,01	4,90	4,99
H	3500	6,27	4,16	5,17	3,93
I	4000	6,37	3,43	5,29	5,71
J	4500	6,94	3,97	5,99	6,19
K	5000	6,90	3,99	6,20	6,09

Graf č. 6 – graf závislosti konstrukčního opatření prostoru atria na dobu dozvuku



9.4. Hodnocení

Obecné modely atrií a následně i varianty byly podrobeny výpočtu z hlediska doby dozvuku. Graf č. 6 ukazuje, že se vzrůstajícím objemem prostoru se doba dozvuku prodlužuje a tvarová orientace nemá význačný vliv na její délku.

Použité metody výpočtu (Sabine (6), Eyring (9), Arau-Puchades (10) a program ODEON) lze také podle výsledků srovnávat. U varianty strop, kde je v prostoru nerovnoměrně rozložená pohltivost konstrukcí, se výpočtu programu nejvíce blíží metoda Arau-Puchades a rozchází se s metodami Sabine a Eyring (graf č. 3). Z grafu č. 2 u základní varianty lze vyčíst, že se vzrůstajícím objemem prostoru se zvětšuje i rozdíl mezi hodnotami jednotlivých metod.

Opatření jednoho povrchu v prostoru materiálem se zvýšenou pohltivostí mělo výrazný vliv na zkrácení doby dozvuku. V modelové variantě byl strop s 90% pohltivostí.

V další variantě označené jako vstup, která představuje vstupní otvor pro přístup do atria, bylo zjištěno, že tento prvek v prostoru má výrazný vliv na snížení doby dozvuku pouze u menších objemů. Zde vstupní otvor zabírá větší poměrnou plochu k celkové ploše než u velkých objemů.

Vytvoření konstrukční překážky ve formě ochozu v každém podlaží nemá na délku doby dozvuku významný vliv. I s ohledem na nerovnoměrné rozložení pohltivých a odrazivých ploch došlo pouze k minimálnímu zkrácení doby dozvuku.

Podle ČSN 73 0527 ^[13] je stanovena pro dvorany veřejných budov, mezi které lze zařadit i atria, hodnota doby dozvuku bez závislosti na objemu daného prostoru hodnotou $T_0 = 1,4$ s (tabulka č. 2) s rozmezím hodnot $\pm 20\%$, tj. rozmezí $T = <1,12; 1,68>$ (obrázek č. 7). S těmito hodnotami byla modelová atria a varianty úprav srovnávána.

U všech modelů v základní variantě, kde jsou veškeré povrchy s 5% pohltivostí, nebylo v žádném případě dosaženo požadovaných hodnot. V případě úpravy s 90% pohltivostí stropu, došlo u některých objemů k dosažení stanovených hodnot. Tato skutečnost byla ovšem prokázána výpočtem převážně u modelů s nižším objemem (149,1; 250; 500, 1000 a 1500 m³). Vytvoření prostoru pro vstup, který byl definován 50% pohltivostí, měl vliv na snížení doby dozvuku a splnění požadavků, taktéž jen u menších objemů (149,1 a 250 m³).

Z hlediska posouzených variant bylo nejvhodnějším konstrukčním opatřením v modelovém případě zvýšení pohltivosti stropní konstrukce. Obecně lze pohltivé plochy osazovat i na svislé konstrukce. Vše záleží na správném a citlivém návrhu akustických opatření dle konkrétního zadání, aby bylo v prostoru dosaženo požadovaných hodnot se zachováním funkčnosti prostoru a architektonického zpracování.

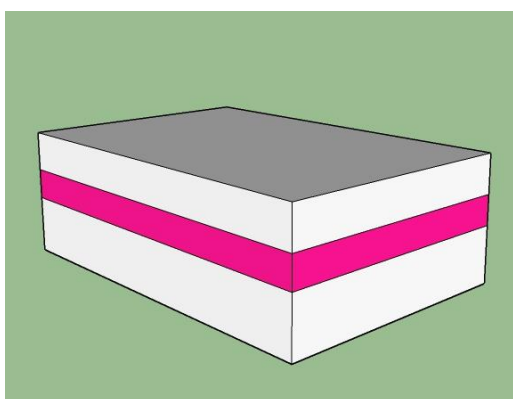
9.5. Návrh opatření

V předcházející kapitole byly posouzeny jednotlivé varianty řešení prostoru z hlediska doby dozvuku. Zvýšení pohltivosti stropní konstrukce mělo značný vliv na snížení doby dozvuku. Na základě tohoto zjištění byl proveden návrh akustického opatření.

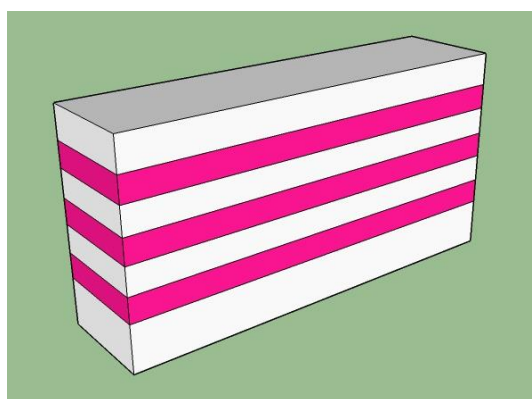
V reálných projektech mají atria ve většině případů prosklenou střechu, z tohoto důvodu nelze akustická opatření osazovat na strop, jak tomu bylo v modelové variantě strop. Dále také nelze tyto prvky umístit na podlahu. Vhodnou variantou umístění akusticky pohltivých materiálů je na stěny místnosti nebo zavěsit pod strop, ale se zachováním prostupu světla do prostoru.

Umístěním pohltivé plochy pouze na strop vzniká v prostoru nerovnoměrné rozložení pohltivosti. V návrhu akustických opatření byly pohltivé plochy rozloženy rovnoměrně na stěny modelu. Tyto plochy představují ochozy nebo parapety v jednotlivých podlažích, která se zpravidla v atriih vyskytují.

Návrh byl proveden na všechny základní modely atrii a následně podrobeny výpočtu podle vztahů Sabine (6), Eyring (9), Arau-Puchades (10) a v programu Odeon. Pohltivé plochy byly umístěny v každém podlaží na celou šířku a do výše 1,5 m s pohltivostí 90% (součinitel pohltivosti $\alpha = 0,9$). Strop, podlaha a ostatní plochy zůstaly bez úprav s pohltivostí 5%. V tabulce č. 20 jsou výsledné hodnoty doby dozvuku pro jednotlivé modely s akustickou úpravou.



Obrázek č. 19 – úprava u modelu D



Obrázek č. 20 – úprava u modelu E

Tabulka č. 20 – hodnoty doby dozvuku s akustickou úpravou

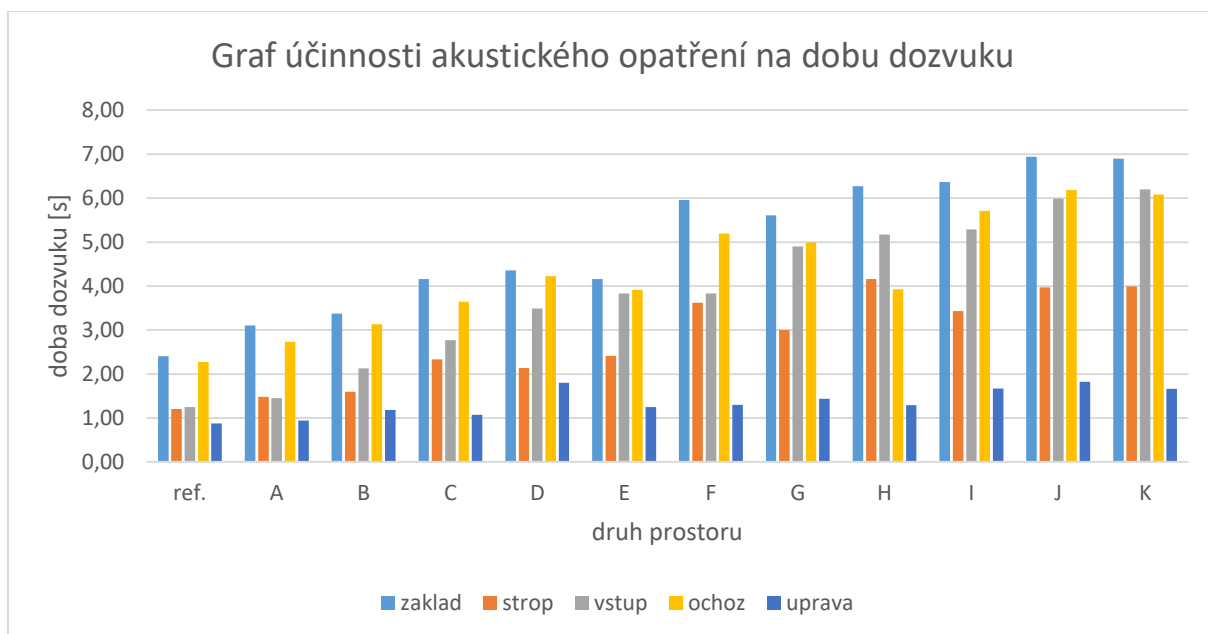
označení	objem [m ³]	<i>T sabine</i> [s]	<i>T eyring</i> [s]	<i>T arau</i> [s]	<i>T odeon</i> [s]
ref	149,1	0,81	0,73	0,78	0,88
A	250	0,93	0,83	1,03	0,94
B	500	1,20	1,08	1,38	1,18
C	1000	0,92	0,78	0,98	1,07
D	1500	1,97	1,79	2,38	1,80
E	2000	1,10	0,93	1,21	1,25
F	2500	1,30	1,09	1,43	1,30
G	3000	1,47	1,26	1,70	1,44
H	3500	1,25	1,02	1,28	1,29
I	4000	1,77	1,52	2,12	1,67
J	4500	1,97	1,70	2,40	1,82
K	5000	1,71	1,45	1,97	1,66

Dle výše uvedené tabulky (tabulka č. 20) bylo díky akustického opatření dosaženo nízkých hodnot doby dozvuku. Následující graf č. 7 zobrazuje celkové posouzení doby dozvuku u všech modelů z hlediska použitých variant a i vliv akustických úprav. Srovnání základní varianty, která nemá žádné konstrukční ani materiálové úpravy, a varianty s akustickou úpravou se vyznačuje výrazným zkrácením doby dozvuku v prostoru. Tento efekt je žádoucí ve velkoobjemových prostorech pro vytvoření kvalitních akustických podmínek bez ozvěny a zajišťující srozumitelnost řeči.

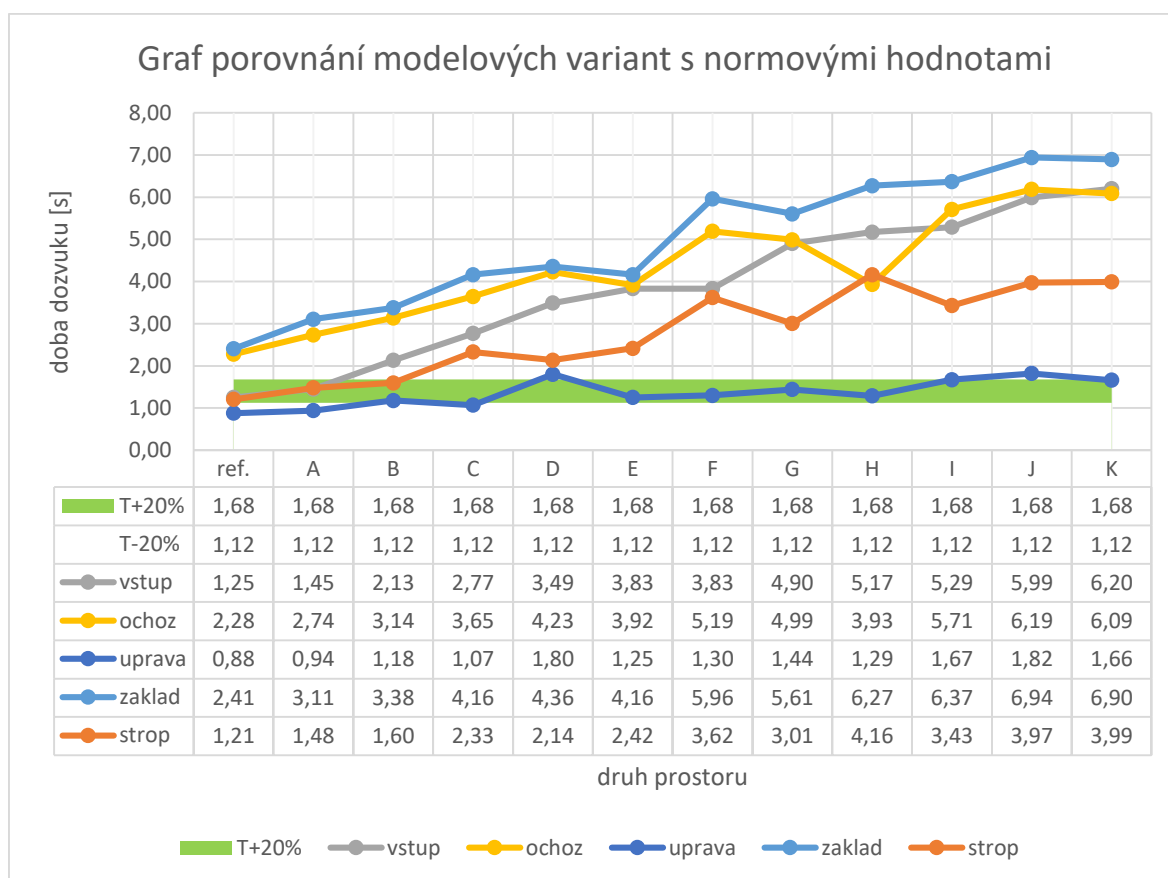
V grafu č. 8 je znázorněno srovnání dosažených hodnot s normovými parametry podle ČSN 73 0527 ^[13], kde je požadovaná doba dozvuku $T = 1,4$ s s tolerancí $\pm 20\%$, tj. $T = <1,12; 1,68>$. Z grafu je patrné, že akustickou úpravou byly splněny normové požadavky.

Opatření stěn akustickým obkladem mělo značný vliv na snížení doby dozvuku v prostoru. Ovšem v praxi záleží na konkrétním prostoru a jeho řešení, protože ne vždy je možno umístit akustické prvky na stěny, na strop, zavěsit pod strop nebo není k dispozici dostatečná plocha. Řešení musí být tedy vždy přizpůsobeno konkrétním podmínkám, aby byl zajištěn bezproblémový provoz prostoru.

Graf č. 7 – graf účinnosti akustického opatření na dobu dozvuku



Graf č. 8 – porovnání modelových variant s normovými hodnotami

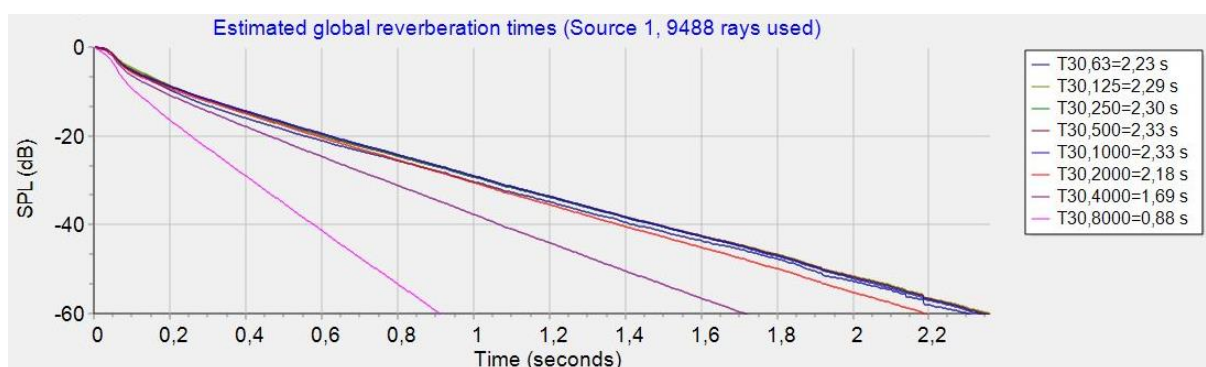


10. Program ODEON

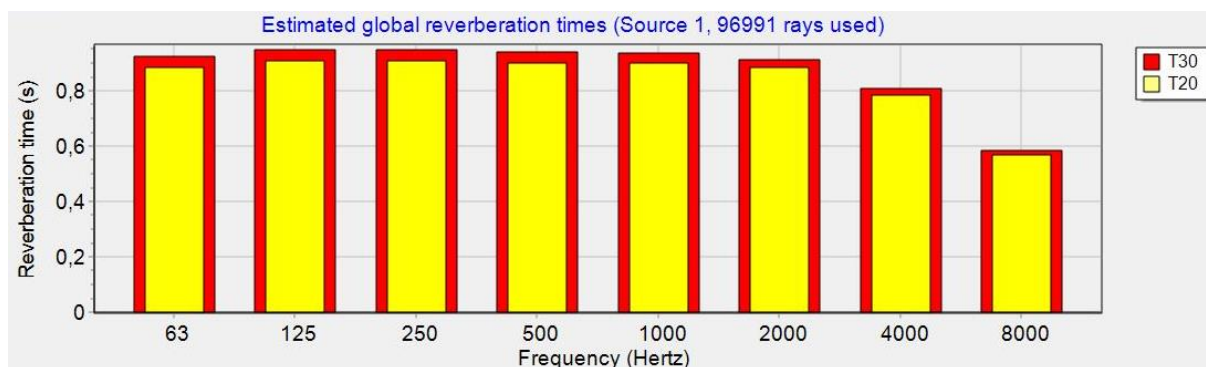
Program ODEON je simulační a výpočetní program, který se používá pro předpověď akustických jevů ve velkoobjemových prostorech, jako jsou například koncertní haly, divadla, sportovní stadiony, velkoprostorové kanceláře, restaurace, letištní haly a podobně.

Výsledky a vyhodnocení jsou ve formě hodnot akustických parametrů nebo mapy zvukového pole (obrázek č. 21, 22, 23).

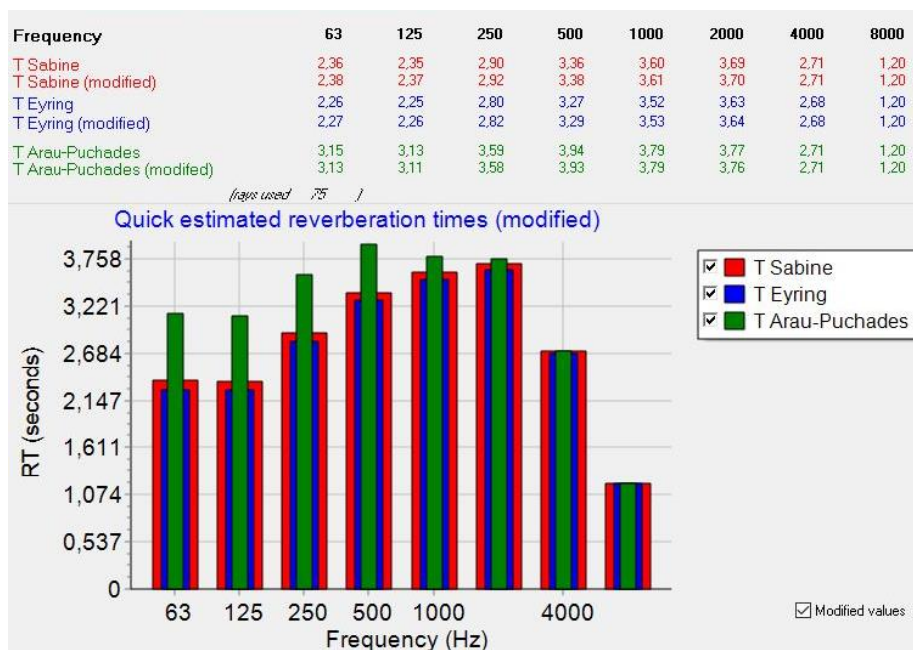
Program a výstupy z něj byly použity pro výpočet doby dozvuku pro modely atrií i vybraný objekt.



Obrázek č. 21 – vypočtené hodnoty doby dozvuku (program ODEON)



Obrázek č. 22 – vypočtené hodnoty doby dozvuku (program ODEON)



Obrázek č. 23 – odhad hodnoty doby dozvuku podle jednotlivých výpočetních modelů

(program ODEON)

Výpočetní metody pro dobu dozvuku

- Quick Estimate

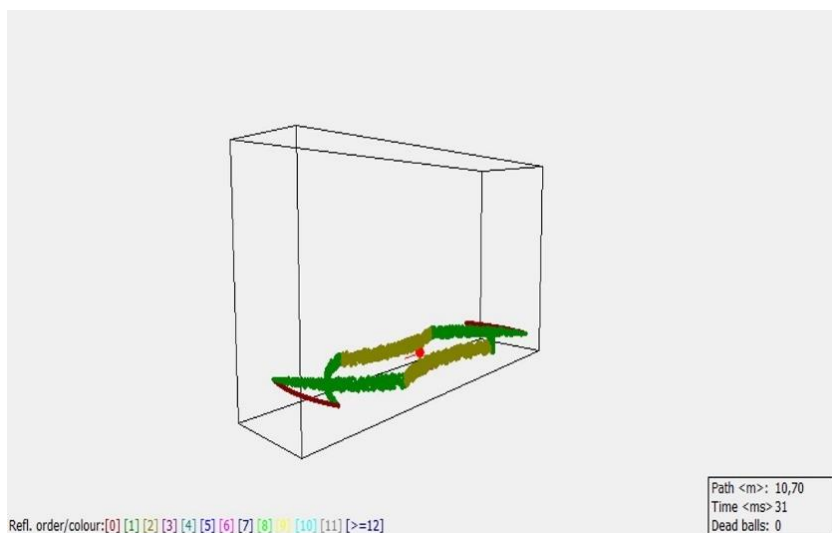
Tato metoda odhaduje střední činitel pohltivosti, který dále dosazuje do vztahu Sabine, Eyring a Arau-Puchades, aby získala odhadovanou dobu dozvuku.

Proces odhadu probíhá tak, že ze zdroje jsou vyslány „částice“, a za předpokladu, že se díky rozptylovým podmínkám odrazí od povrchů v náhodných směrech, počítá, kolikrát narazí na každý povrch. Povrchy, které jsou zasaženy velmi často, pak mají větší váhu středního činitele pohltivosti v místnosti. Povrchy, které nejsou v celém průběhu dotčeny vůbec, jsou vyřazeny z výpočtu a povrchy, které jsou zasaženy na obou stranách, jsou započteny dvakrát. Výsledná odhadovaná doba dozvuku odpovídá dílčímu objemu, ve kterém je zdroj umístěn.

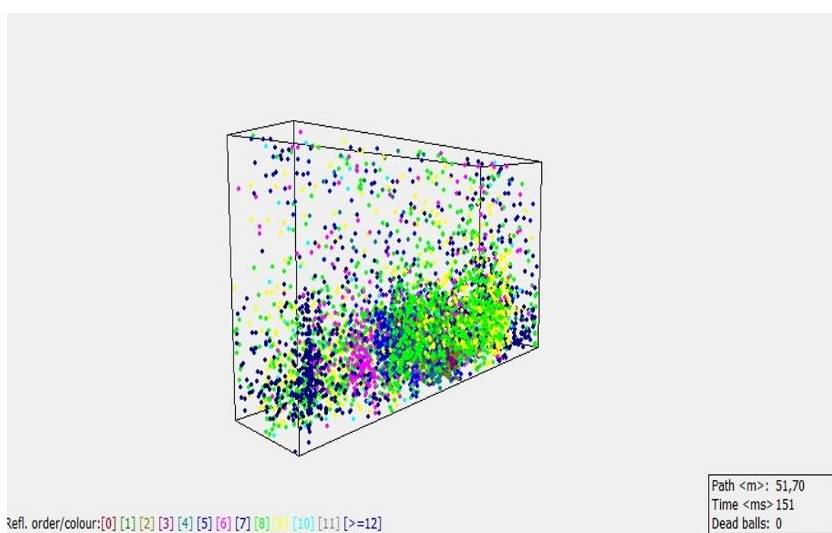
- Global Estimate

Tato metoda odhaduje celkovou dobu dozvuku T_{20}, T_{30} pomocí Schroederovy metody (Schroeder, 1970).

Zde jsou „částice“ vyslány ze zdroje v náhodných směrech. Program zaznamenává ztrátu energie z každé částice jako funkci času kvůli pohltivosti povrchů v místnosti a ve vzduchu. Součtem těchto mnoha částic se získá celková energická ztráta místnosti.



Obrázek č. 24 – průběh modelace vyslání zvuku ze zdroje (program ODEON)



Obrázek č. 25 – průběh rozptylu zvuku v prostoru (program ODEON)

Výpočet odezvy ze zdrojů k přijímači

Záměrem použitých metod je dosažení předpovědí jednobodových, vícebodových nebo grid výsledků. Výsledky simulačního výpočtu jsou obdobné těm, které by se získaly při měření impulsní odezvy v reálné místnosti.

Výpočet je rozdělen do dvou kroků

- část nezávislá na přijímači – účelem tohoto postupu je nalézt fiktivní zdroje, které vyzařují energii do místnosti. Podstatné nejsou odrazy zvuku. Hlavní myšlenkou je nahrazení místnosti množstvím zdrojů s různými pozicemi v prostoru.
- část závislá na přijímači – dalším krokem je umístění přijímače v určitém bodě v místnosti a sbírání odrazů zvuku. Nyní se sčítají příspěvky od přímého a odraženého zvuku na přijímacím místě a umožňují výpočet výsledků jednobodových, vícebodových nebo grid.

Pokud je použit více než jeden přijímač, tak se část závislá na přijímači opakuje pro každý přijímač. Pokud je použit více než jeden zdroj, tak se odpověď na daném přijímači jednoduše sečte s odpovědí z jednotlivých zdrojů.

Metody

- metoda včasného odrazu – v prostoru je umístěn přijímač, který zachycuje a vypočítává odrazy pro každý bodový zdroj, který může být vzhledem k přijímači viditelný nebo neviditelný;
- metoda zpožděného odrazu – odrazy, které nejsou zachyceny metodou včasného odrazu, jsou započítány touto metodou.

11. Vybraný objekt

Jako reálný objekt bylo vybráno atrium v Praze. Jedná se soubor historických budov, které prošly rekonstrukcí. V rámci ní byl zastřešen dvůr a vytvořeno atrium. Většinu ploch v objektech zaujmají kancelářské prostory, dále pak parkovací místa nebo restaurační provozy.

11.1. Popis prostoru

Přístup do atria je chodbou skrze budovu. Atrium vzbuzuje dojem, že jde o velmi prosvětlený a diferencovaný prostor, který je obklopen jednotlivými budovami a zastřešen pultovou ocelovou konstrukcí se skleněnými výplněmi. Pod střechou jsou zavěšeny čtyři panely umělého osvětlení.

Půdorysně zaujímá atrium plochu přibližně 1 100 m² a objem necelých 30 000 m³. Prostor je výškově členěn pomocí vyrovnávacích ramp a schodišťových stupňů. V atriu se nachází centrální recepce, záhony s vegetací, několik míst se sedacím nábytkem pro odpočinek a zahrádka náležící k restauraci.

Škála použitých materiálů je velmi pestrá. Na podlaze je použit kamenný obklad, dřevo i teraco. Vertikální konstrukce jsou tvořeny zejména skleněnými výplněmi otvorů v kombinaci s kovovými profily, které tvoří lehký obvodový plášť. Část stěn je opatřena standardní bílou omítkou. Na všech velkoformátových oknech jsou osazeny vnější žaluzie.



Obrázek č. 26 – vybrané atrium (foto autor)



Obrázek č. 27 – vybrané atrium (foto autor)

11.2. Stávající akustický stav

V současné době v prostoru atria není použito žádných akustických opatření. Při běžném rozhovoru dochází v prostoru k ozvěně. Tento jev nastává zejména z důvodu použitých materiálů v prostoru a jejich pohltivosti.

V atriu je umístěno posezení restaurace. Její provoz a případné ozvučení reprodukovanou hudbou jsou jedním ze zdrojů hluku v prostoru. Skrze atrium se vstupuje do kancelářských prostor, tudíž pohyb osob a jejich hovor přispívá taktéž ke zvyšování hladiny akustického tlaku.

11.3. Měření

Měření doby dozvuku v atriu proběhlo v neděli 27. listopadu 2016 od 5:00 hodin ráno. Brzká ranní hodina byla zvolena z toho důvodu, aby se v prostoru atria či přilehlých prostorech nenacházely osoby, které by mohly být ohroženy zvukem, který byl pro měření doby dozvuku nezbytný. Dalším důvodem byla eliminace zdrojů hluku.

Měření in situ se zúčastnili studentka Anna Katrňáková a vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Nováček, Ph.D. V době měření byla v atriu přítomna pouze jedna osoba ostrahy objektu a nebyl zde žádný zdroj hluku. Všichni byli v průběhu měření chráněni sluchátky.

Vybuzení zvuku bylo zvoleno metodou prasknutím nafukovacího balónku. Tato metoda byla vybrána z několika důvodů. V prostoru atria je použita kamenná podlaha, která prošla v nedávné

době rekonstrukcí, tudíž osazení těžkého přístroje bylo vyloučeno z hlediska možnosti poškození podlahy. Zvuk vzniklý prasknutím balonku byl vyhodnocen jako dostatečně silný pro měření, ale zároveň neškodný v případě nejistoty, že se v objektu nenachází další osoby.

Použité vybavení:

- zvukový analyzátor Norsonic Nor140 (obrázek č. 28)
- měřící mikrofon Nor1225
- mikrofonní předzesilovač Nor1209
- akustický kalibrátor Nor1251
- stativ k analyzátoru
- 6 kusů klasických nafukovacích balónků
- špendlík
- meteostanice
- kompaktní fotoaparát
- laserový dálkoměr



Obrázek č. 28 – zvukový analyzátor Norsonic Nor140

Postup měření:

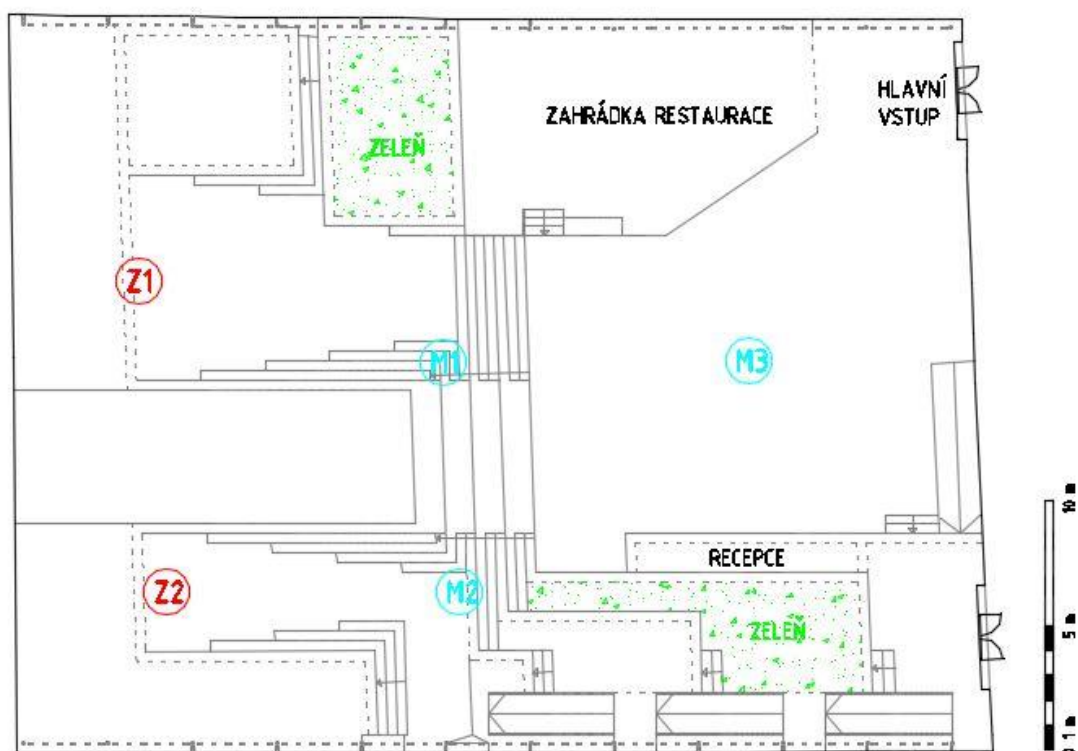
- 1) Po vstupu do prostoru byla provedena vizuální prohlídka. V atriu se nacházel nábytek a zeleň, které jsou součástí vybavení. Přítomna byla jedna osoba ostrahy.
- 2) Stanovení vnitřních podmínek (teplota, relativní vlhkost a tlak) bylo provedeno odečtením hodnot z meteostanice, která byla ihned po příchodu zapnuta.
- 3) Měřicí metodou byla metoda integrované impulsové odezvy a zdrojem zvuku bylo zvoleno prasknutí nafukovacího balónku.
- 4) Dále byla stanovena místa, kde budou umístěny zdroje zvuku a místa příjmu zvuku. Jednotlivé pozice byly změřeny laserovým dálkoměrem a zakresleny do půdorysu atria (obrázek č. 31).
Zvolené polohy mikrofonů a vzájemné vzdálenosti splňují požadavky normy ČSN EN ISO 3382-2 ^[16] pro inženýrskou metodu měření. Dle tabulky č. 21 je vyžadováno 6 kombinací zdroj-mikrofon. Byly tedy stanoveny 2 místa zdroje a 3 polohy mikrofonu.
Splněny byly i normou stanovené požadavky na vzájemné vzdálenosti zdrojů a mikrofonů, vzdálenosti od odrazujících povrchů a od podlahy.
- 5) Následně byl sestaven stativ a na něj osazen měřicí mikrofon ve výšce 1,7 m nad podlahou. Stativ byl poté umístěn na příslušnou pozici.
- 6) Samotné měření proběhlo šestkrát, na třech místech byl umístěn mikrofon a vždy za dvou míst byl prasknutím balónku vyslán zvuk. Balónek byl prasknut ve výšce přibližně 1,5 m.
- 7) Výsledné hodnoty doby dozvuku byly odečteny z displeje analyzátoru a zapsány do tabulky (tabulka č. 22).

Tabulka č. 21 – minimální počty míst a měření (ČSN EN ISO 3382-2 ^[15])

	orientační metoda	inženýrská metoda	přesná metoda
kombinace zdroj – mikrofon	2	6	12
místa zdroje	≥ 1	≥ 2	≥ 2
místa mikrofonu	≥ 2	≥ 2	≥ 3
počet poklesů v každém místě (metoda přerušeno šumu)	1	2	3



Obrázek č. 29 – měření in situ (foto J. Nováček) Obrázek č. 30 – měření in situ (foto J. Nováček)



Obrázek č. 31 – půdorysné schéma atria

11.4. Výsledky měření

Vnitřní podmínky:

- teplota – 18,4 °C
- vlhkost – 34%
- tlak – 986 hPa

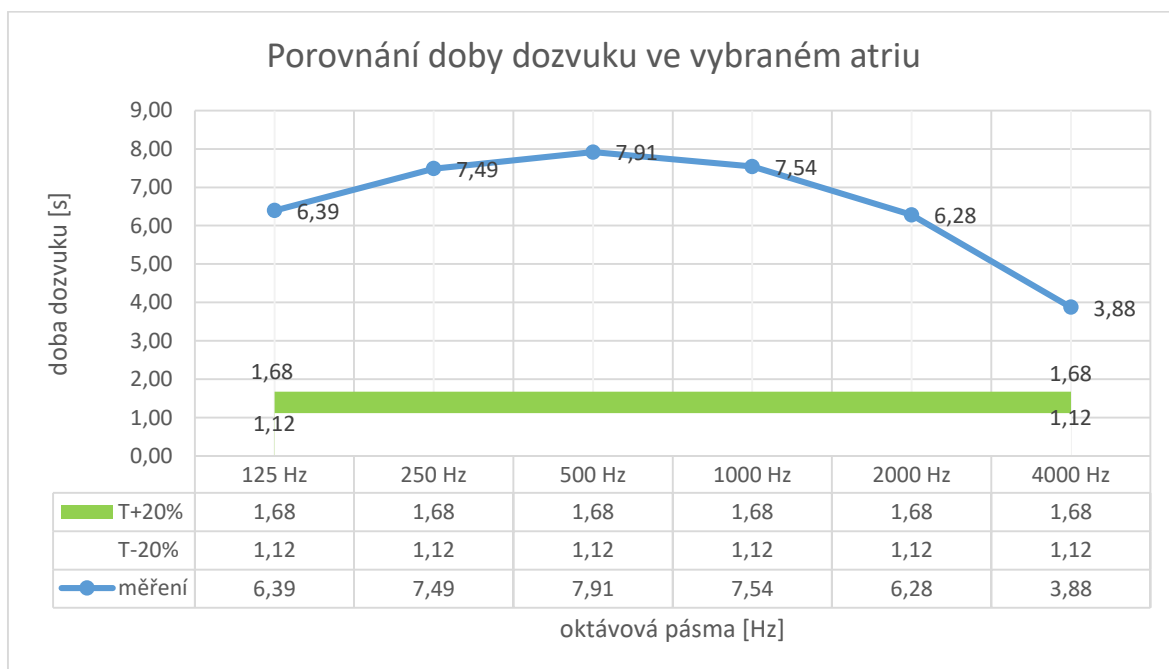
Tabulka č. 22 - naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s]

měření	zdroj	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
M1	Z1	6,74	7,55	8,11	7,59	6,19	4,00
	Z2	6,36	7,36	8,00	7,55	6,38	3,87
M2	Z1	6,74	7,64	7,89	7,84	6,12	3,88
	Z2	6,09	7,27	7,84	7,36	6,22	3,73
M3	Z1	5,80	7,50	8,00	7,45	6,35	3,87
	Z2	6,63	7,59	7,64	7,45	6,42	3,90
aritmet. průměr		6,39	7,49	7,91	7,54	6,28	3,88

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v sekundách [s]

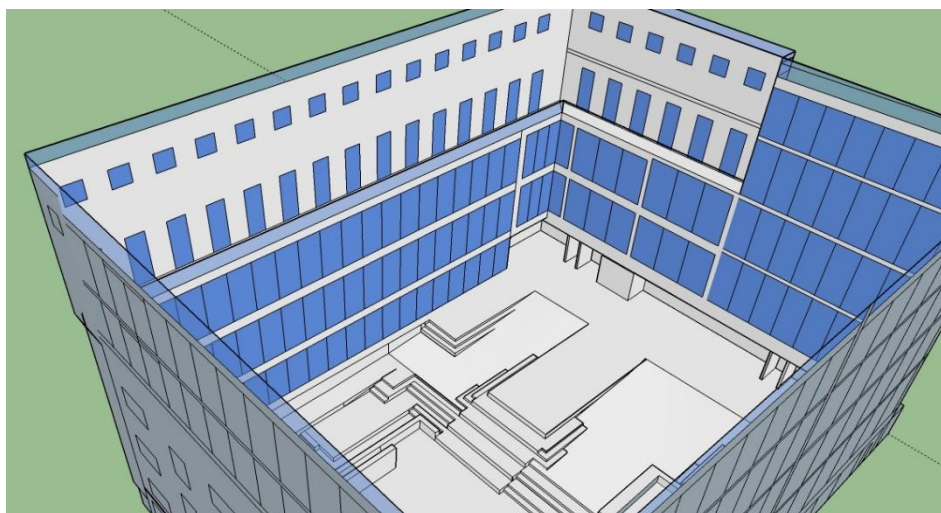
Naměřené hodnoty doby dozvuku uvedené v tabulce č. 22 jsou dlouhé. Dle grafu č. 9 značně převyšují normové požadavky na dobu dozvuku pro haly a dvorany veřejných budov $T = <1,12;1,68>$ (tabulka č. 2, obrázek č. 7).

Graf č. 9 - naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s]

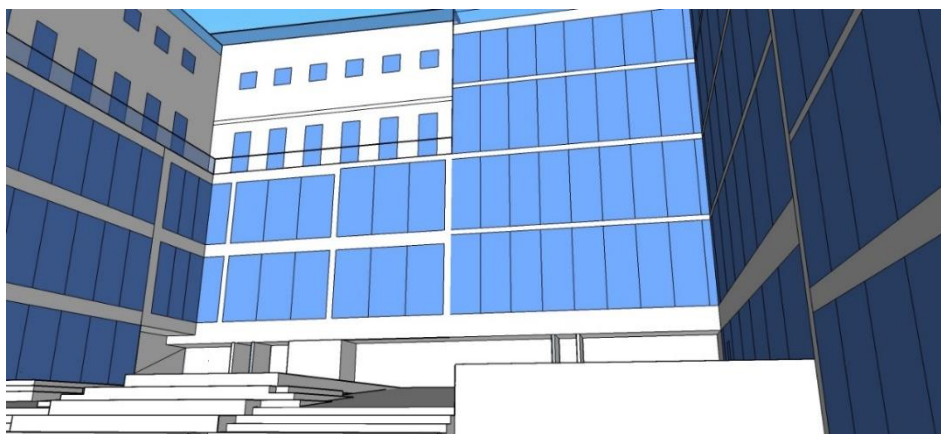


11.5. Modelování

Prostor vybraného atria byl vymodelován v programu Sketch-Up 2014 a následně exportován do programu ODEON 14 Combined, kde bylo nasimulováno měření, které proběhlo ve skutečnosti a je popsáno v předešlé kapitole.

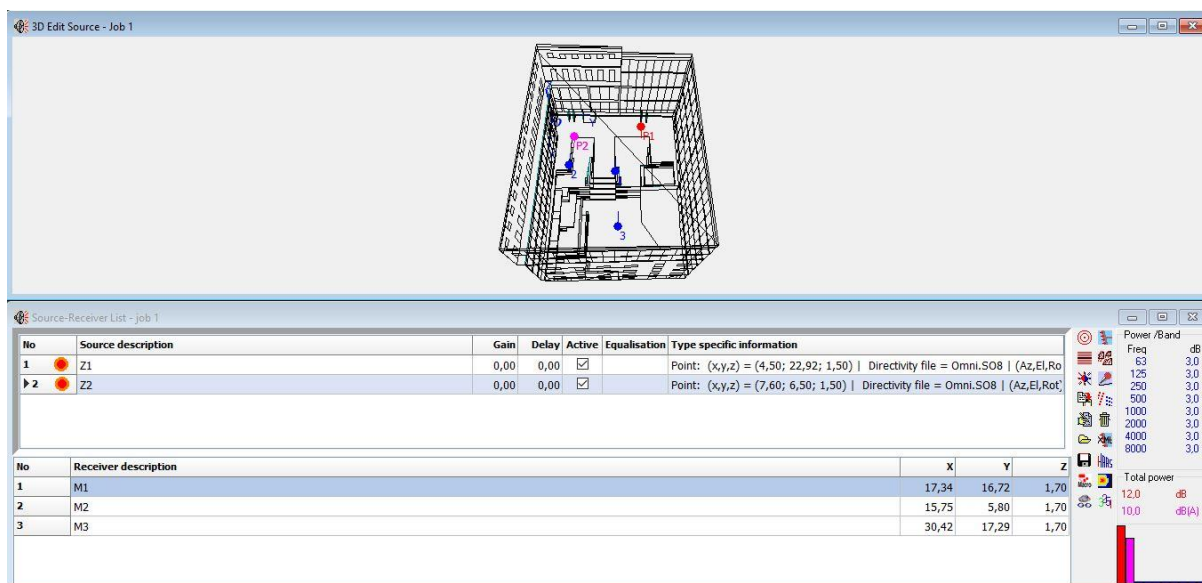


Obrázek č. 32 – model atria (nadhled)



Obrázek č. 33 – model atria

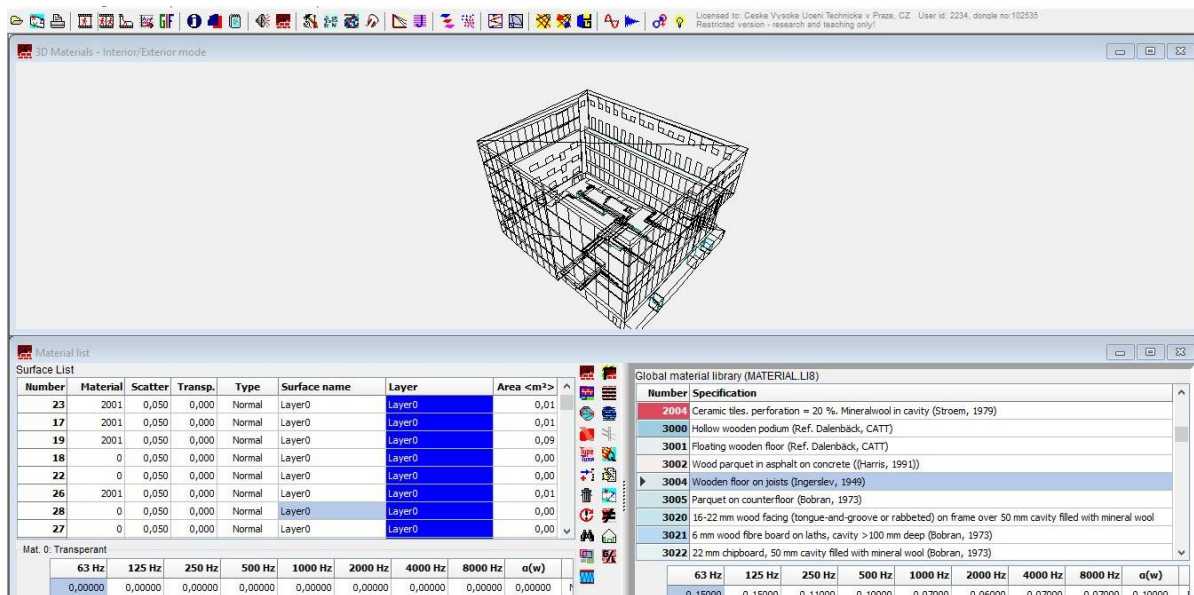
Zdroje zvuku Z1, Z2 a místa příjmu zvuku M1, M2 a M3 byly rozmístěny stejně jako při reálném měření (obrázek č. 33). Materiály povrchů byly vybrány z dostupné knihovny programu tak, aby co nejvíce odpovídaly skutečným materiálům a jejich činiteli pohltivosti zvuku (tabulka č 23). Po přiřazení materiálů k jednotlivým plochám byl proveden rychlý odhad dob dozvuku podle tří základních metod (Sabine, Eyring a Arau-Puchades), který je poskytován programem (obrázek č. 35).



Obrázek č. 34 – umístění zdrojů a přijímačů

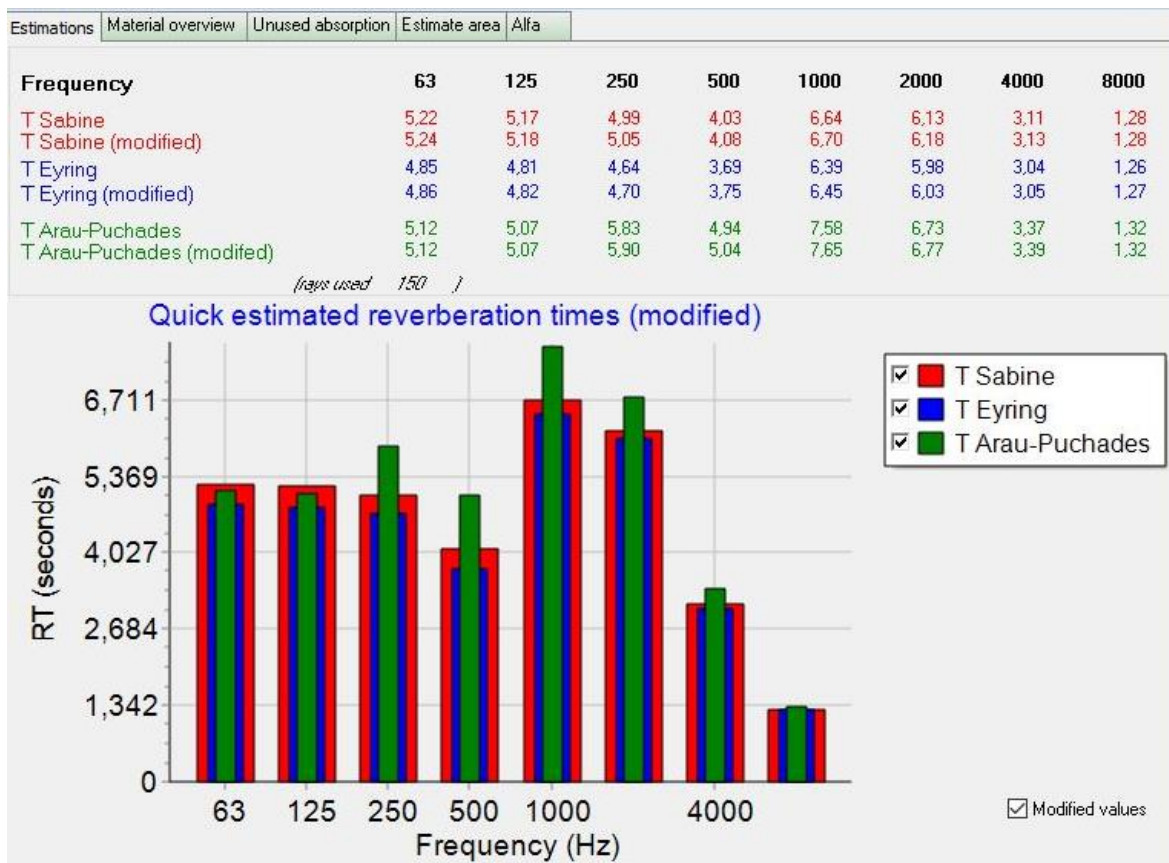
Tabulka č. 23 – parametry použitých materiálů

materiál	činitel zvukové pohltivosti α [-]							α (w)
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
108 Concrete or terrazzo Ref. (Harris, 1991)	0,01	0,01	0,01	0,015	0,02	0,02	0,02	0,05
2001 Marble or glazed tile (Harris, 1991)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00
2002 Ceramic tiles. perforation = 5%. mineralwool in cavity (Stoem, 1979)	0,21	0,21	0,54	0,74	0,34	0,28	0,42	0,35
3004 Wooden floor on joists (Ingerslev, 1949)	0,15	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,1
4000 Lime cement plaster (Bobran, 1973)	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05
10002 Single pane of glass, 3 mm	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,05
10003 Double glazing, 2-3 mm, 10 mm gap	0,1	0,1	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,05
10005 Glass, large panes of heavy plate glass	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,05

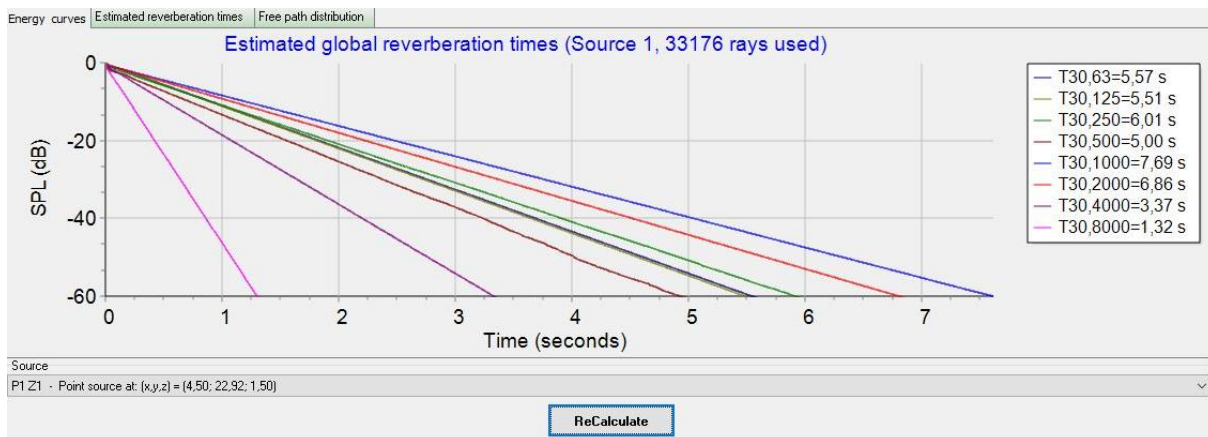


Obrázek č. 35 – přiřazení materiálů

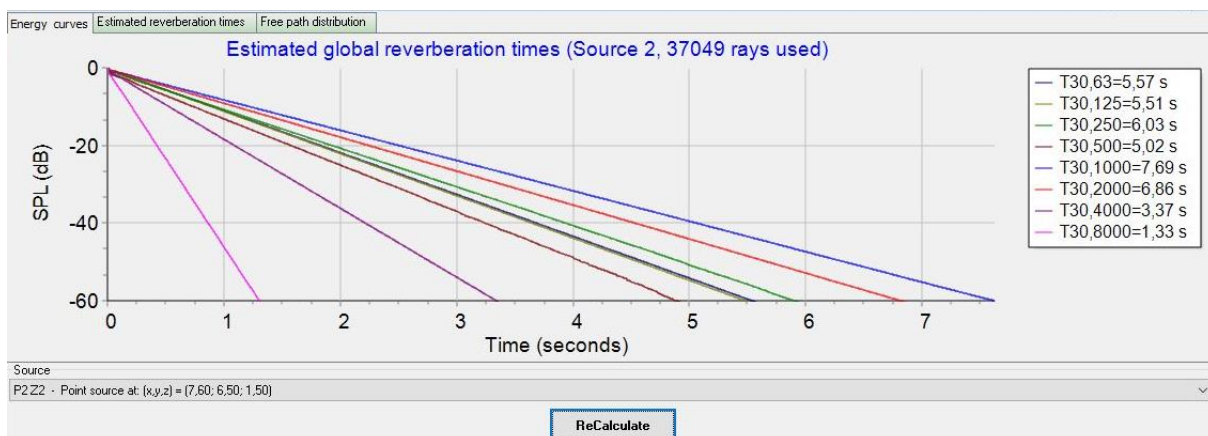
Pro každý zdroj zvuku byl programem proveden výpočet, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 24 a doloženy grafickými výstupy z programu (obrázek č. 36 a 37). Hodnoty doby dozvuku se od výsledků reálného měření liší a to z několika důvodů. V programu nejsou přesné parametry materiálů, které jsou použity v atriu. V rámci vytváření modelu v programu ODEON byly pro povrchy zvoleny materiály, které se svým charakterem nejvíce blíží těm použitým v atriu. Dále se v reálném prostoru atria nacházejí plochy zeleně, které nebyly v modelu zohledněny.



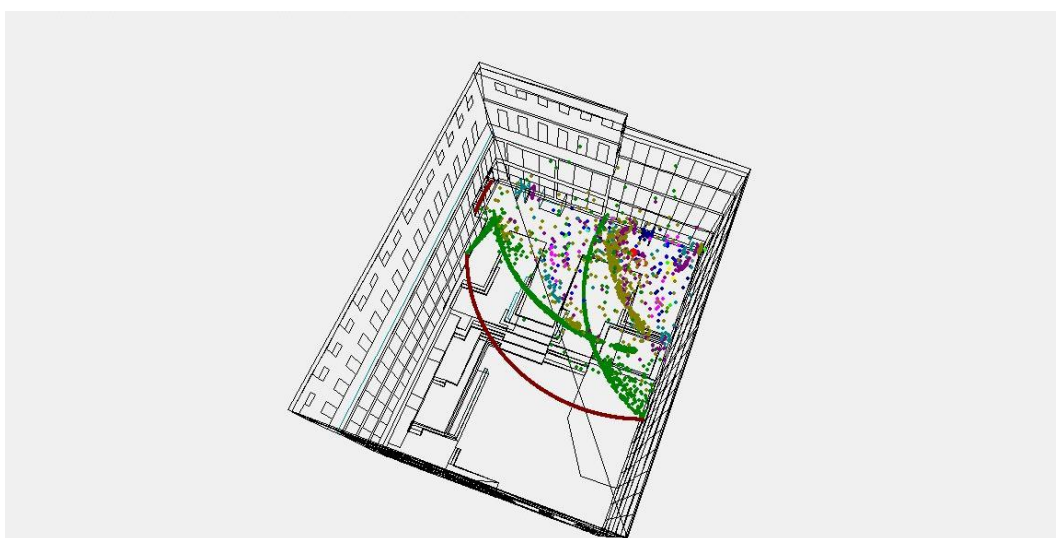
Obrázek č. 36 – odhad doby dozvuku



Obrázek č. 37 – doba dozvuku ze zdroje Z1



Obrázek č. 38 – doba dozvuku ze zdroje Z2



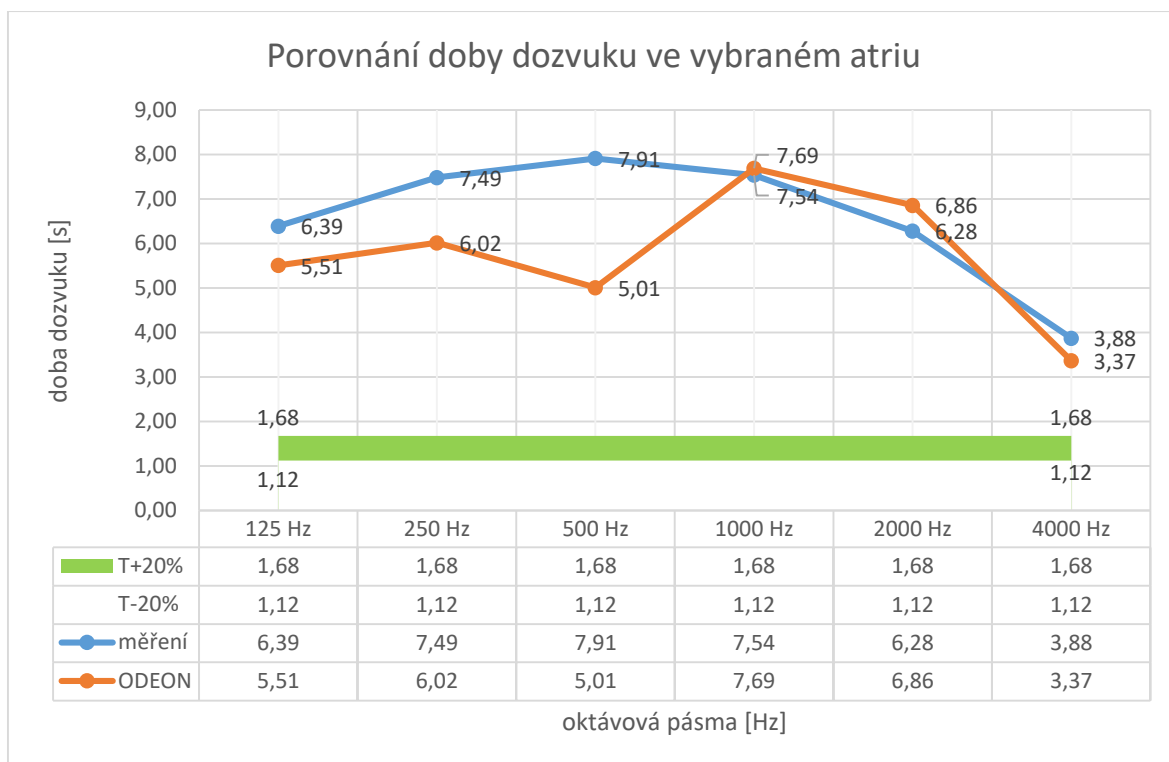
Obrázek č. 39 – grafické zobrazení průběhu zvuku ze zdroje Z1

Tabulka č. 24 – doba dozvuku ve vybraném prostoru (program odeon)

měření	zdroj	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
M1, M2,	Z1	5,57	5,51	6,01	5,00	7,69	6,86	3,37
M3	Z2	5,57	5,51	6,03	5,02	7,69	6,86	3,37
aritm. průměr		5,57	5,51	6,02	5,01	7,69	6,86	3,37

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v sekundách [s]

Graf č. 10 – porovnání doby dozvuku výpočtem programu s reálným měřením



11.6. Hodnocení stávajícího stavu

Dle výsledků v tabulce č. 22 z reálného měření na místě a v tabulce č. 24 z modelového výpočtu, nejsou splněny požadavky normy ČSN 73 0527 ^[13]. V halách a dvoranách veřejných budov je stanovena maximální doba dozvuku $T = 1,4$ s (dle tabulky č. 2) s rozptylem $\pm 20\%$, tj. $T = \langle 1,12; 1,68 \rangle$ viz obrázek č. 7. V obou případech je požadovaná hodnota překročena několikanásobně. Normou stanovená hodnota je pouze doporučená, ale z hlediska akustické pohody v atriu je vhodné provést akustická opatření ke zkrácení doby dozvuku.

11.7. Návrh opatření

Konkrétní akustické opatření bylo navrženo s ohledem na stávající architektonické zpracování prostoru, provozní podmínky a zejména podmínky osvětlení prostoru atria a přiléhajících kanceláří.

Ke zkrácení doby dozvuku a dosažení příjemné akustické pohody v atriu, byl navržen akustický obklad ve formě akustických podhledových desek z minerální vlny, který byl rozmístěn na svislé konstrukce a zavěšen pod strop. Zasklení kanceláří je členěno na jednotlivá okna. Dělicí pásy mezi nimi byly opatřeny akustickým obkladem, stejně tak velká část horních stěn nad ochozem. Pod střešní konstrukcí bylo zavěšeno dvanáct kusů akustických desek o rozměrech 3 x 3 x 0,3 m.

Dále byl obložen prostor recepce a na stěně umístěna deska, která může nést funkci výtvarného prvku. Akustická úprava je na obrázcích č. 40, 41, 42, 43 a 44 označena růžovou barvou.

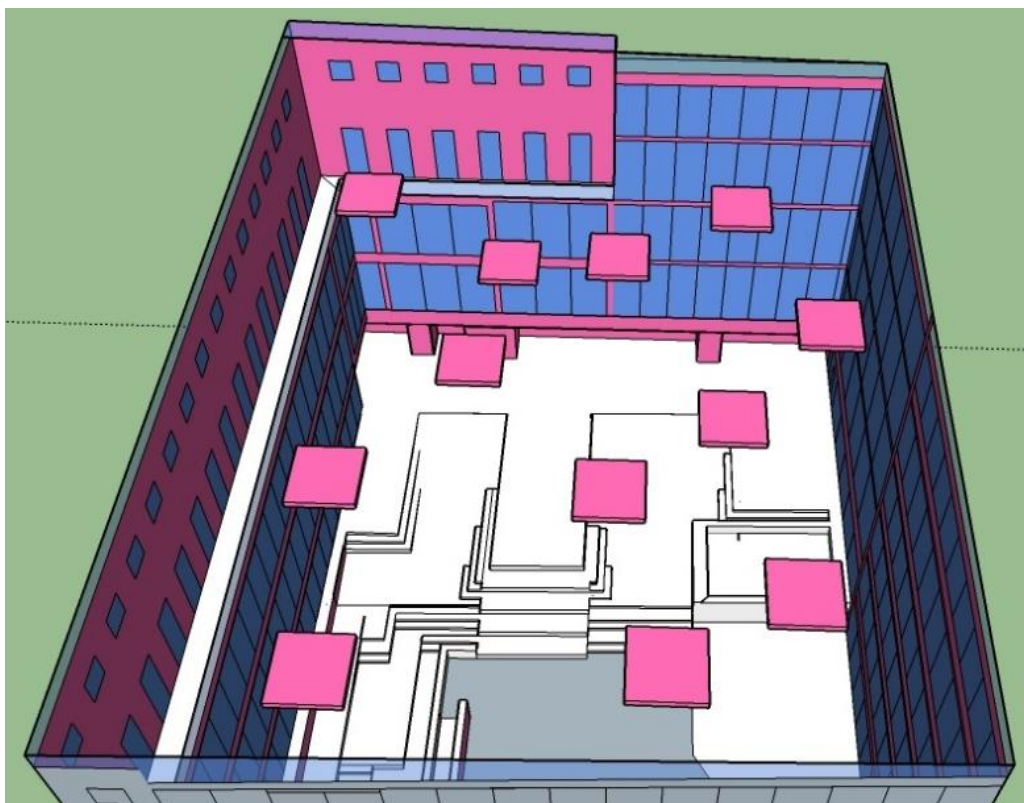
Parametry pro zvolené akustické opatření byly použity podle konkrétního materiálu: akustické podhledové desky z minerální vlny Knauf AMF (Thermatex Alpha One), tl. 24 mm, odsazení 200 mm, plošná hmotnost 3,8 kg/m². Tento materiál byl zvolen na všechny povrchy z důvodu vysokých hodnot činitele pohltivosti.

Tabulka č. 25 – hodnoty činitele pohltivosti pro akustický materiál obkladu [30]

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
činitel pohltivosti α [-]	0,55	0,85	1,0	0,95	1,0	1,0

Tabulka č. 26 – druhy a plochy akustických úprav

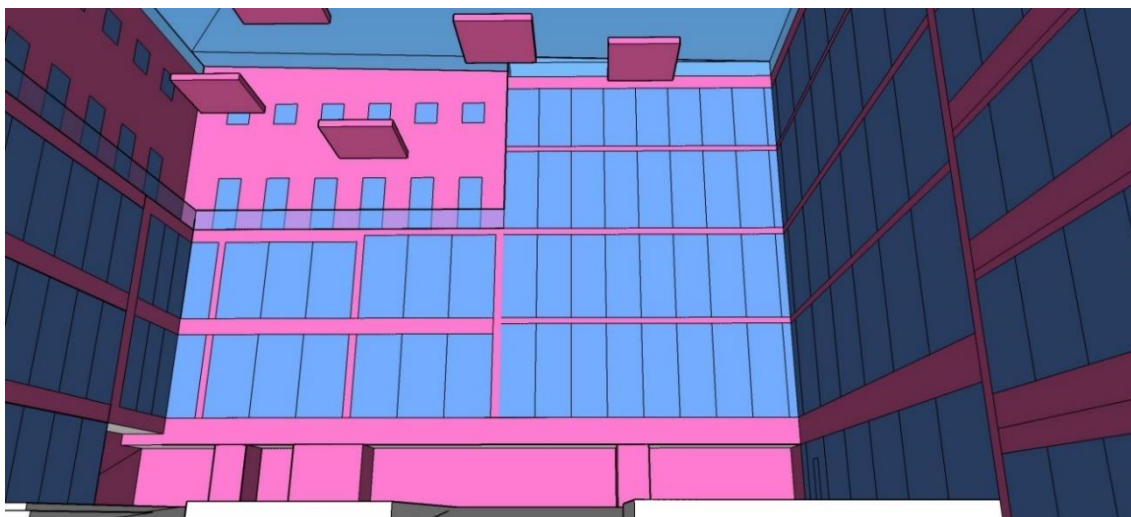
opatření	plocha [m ²]
akustický obklad	1018,4
zavěšené desky (12 ks)	259,2
deska na stěně	5,32
recepce	21,9
celkem	1034,8



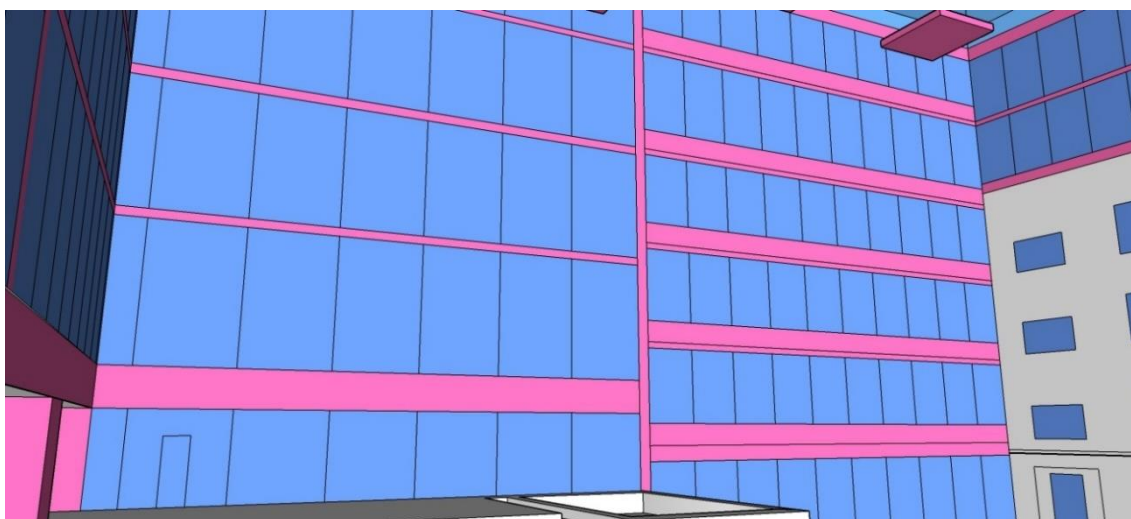
Obrázek č. 40 – model atria s akustickou úpravou



Obrázek č. 41 – model atria s akustickou úpravou (pohled J)



Obrázek č. 42 – model atria s akustickou úpravou (pohled S)



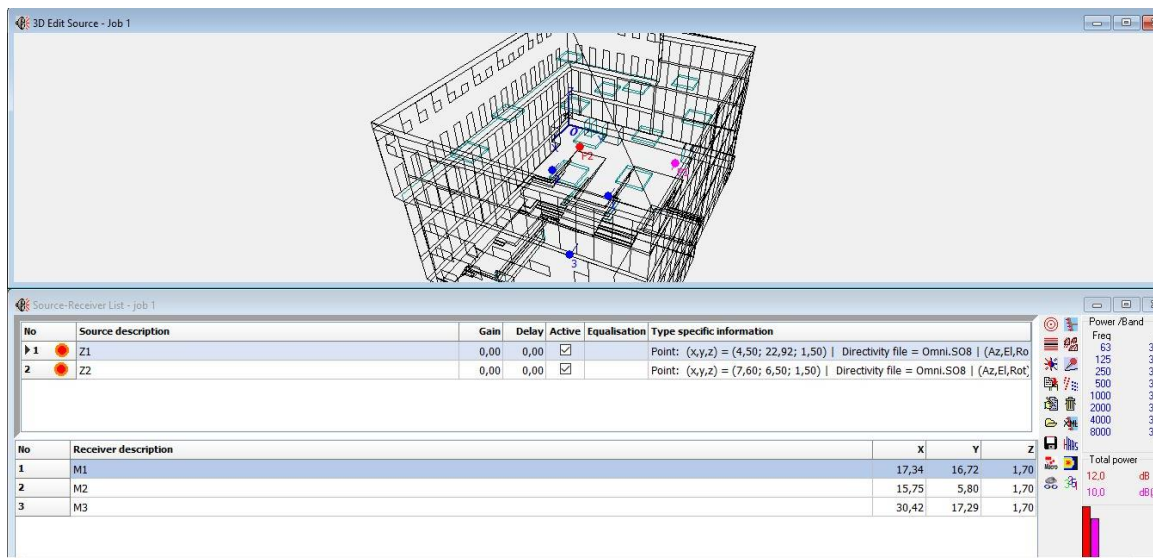
Obrázek č. 43 – model atria s akustickou úpravou (pohled V)



Obrázek č. 44 – model atria s akustickou úpravou (pohled Z)

Prostor byl znovu podroben výpočtu v programu ODEON. Zdroje zvuku a místa příjmu byly rozmístěny stejně jako při základní modelaci (obrázek č. 45), která je popsána v předešlé kapitole (11.1.5. Modelování). Výpočtem programu bylo dosaženo hodnot, které jsou uvedeny v tabulce č. 25.

Obrázek č. 46 dokládá výpočet doby dozvuku podle metody Sabine (6), Eyring (9) a Arau-Puchades (10), který je jedním z výstupů programu. Na obrázku č. 47 už jsou zobrazeny výsledné hodnoty doby dozvuku pro zdroj Z1.

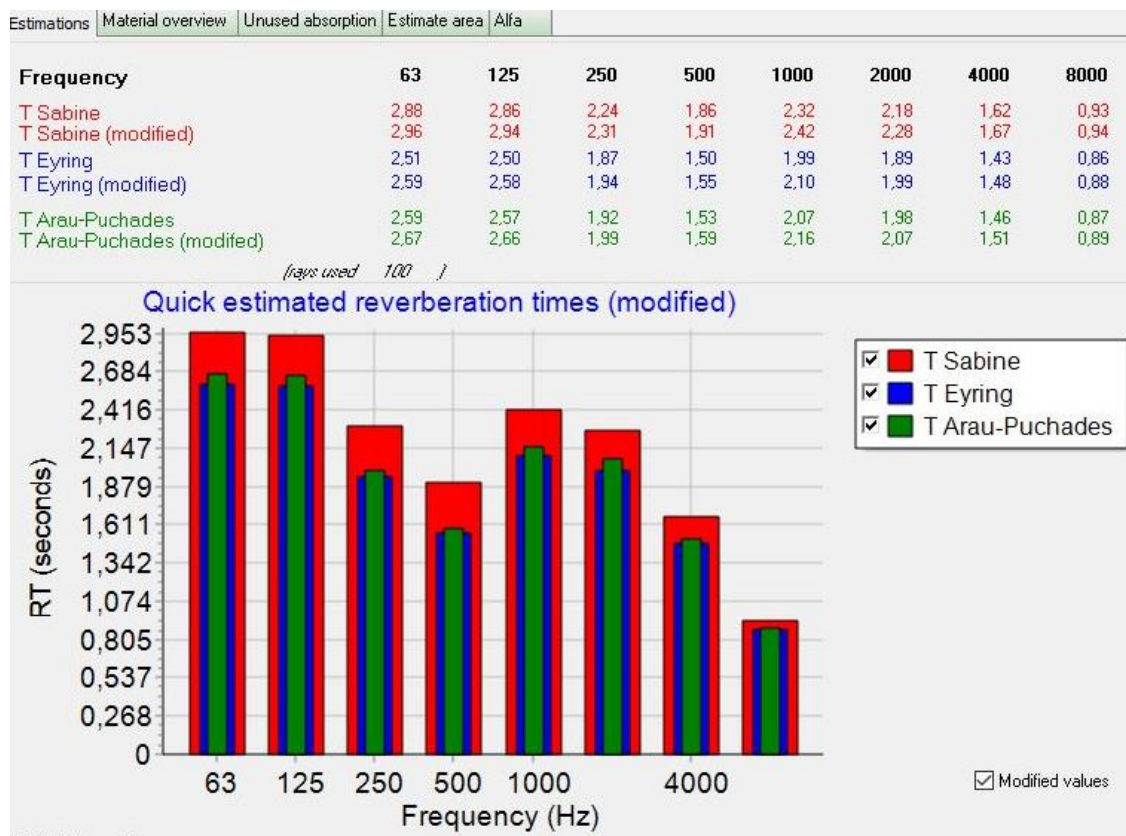


Obrázek č. 45 – zdroje a přijímače zvuku v modelu atria

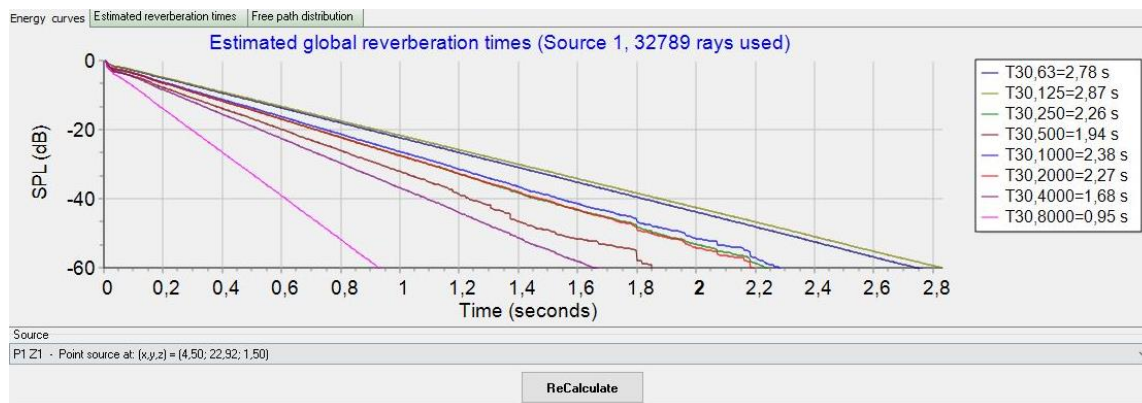
Tabulka č. 27 – doba dozvuku vybraného prostoru s úpravou (program odeon)

měření	zdroj	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	100 Hz	2000 Hz	4000 Hz
M1, M2,	Z1	2,78	2,87	2,26	1,94	2,38	2,27	1,68
M3	Z2	2,78	2,86	2,30	2,03	2,40	2,29	1,71
aritm. průměr		2,78	2,87	2,28	1,99	2,39	2,28	1,70

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v sekundách [s]



Obrázek č. 46 – odhad doby dozvuku (model s akustickou úpravou)



Obrázek č. 47 – grafické zobrazení průběhu zvuku ze zdroje Z1 (model s akustickou úpravou)

Graf č. 11 ukazuje srovnání doby dozvuku ve stávajícím stavu (podle měření a výpočtu programu) s navrženým akustickým opatřením. Hodnoty jsou vždy aritmetickým průměrem ze všech dosažených hodnot. V porovnání se stávajícím stavem, který je doložen měřením na místě a výpočtem v programu, je patrné, že umístěním akustického obkladu došlo k výraznému zkrácení doby dozvuku v prostoru atria a to až o 5 s.

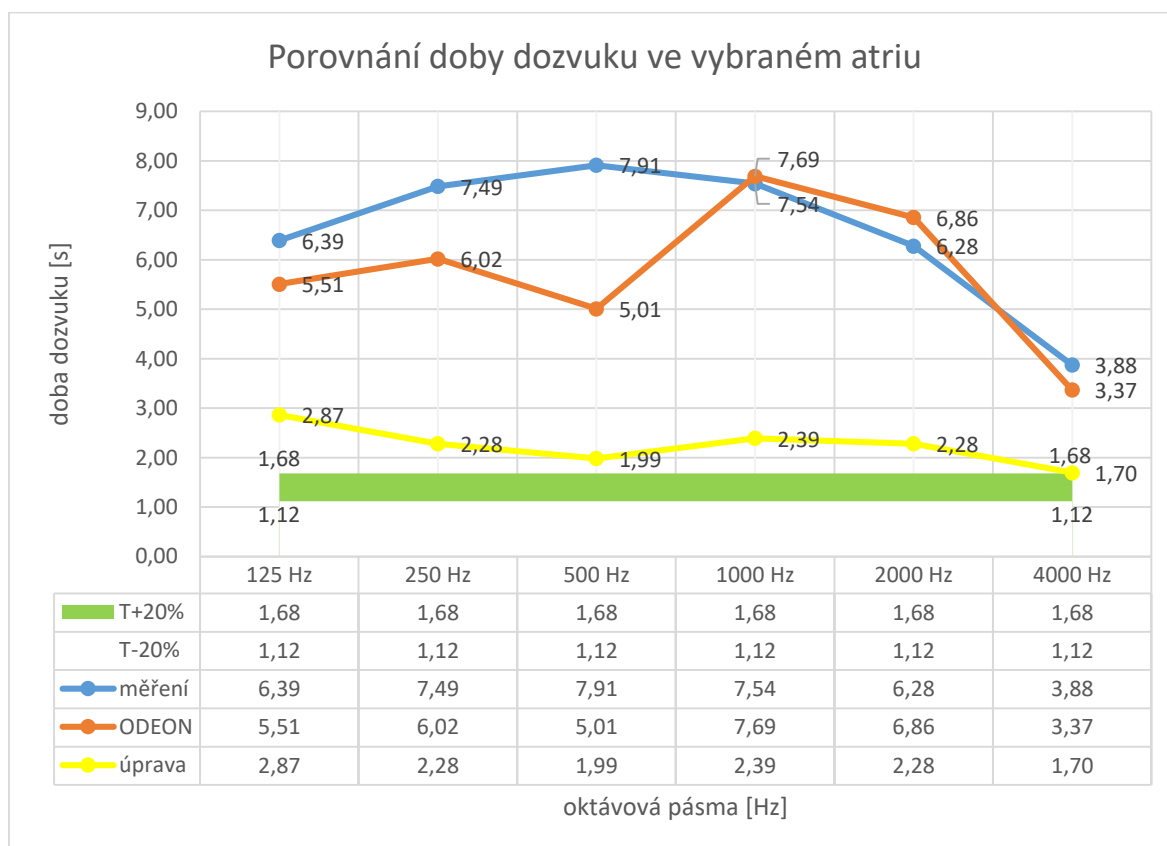
V grafu č. 11 je zaznačena optimální hodnota doby dozvuku a přijatelné rozmezí pro haly a dvorany veřejných budov podle ČSN 73 0527 ^[13]. Rozmezí hodnot je $T = <1,12;1,68>$. Ani navrženými akustickými úpravami nebylo dosaženo těchto limitů. Ve srovnání se stávajícím stavem ovšem došlo k výraznému zkrácení doby dozvuku, což zlepšuje akustickou pohodu v prostoru.

Tabulka č. 28 – doba dozvuku vybraného prostoru srovnání výsledků

aritm. průměr	125 Hz	250 Hz	500 Hz	100 Hz	2000 Hz	4000 Hz
reálné měření	6,39	7,49	7,91	7,54	6,28	3,88
výpočet odeon	5,51	6,02	5,01	7,69	6,86	3,37
akust. úprava	2,87	2,28	1,99	2,39	2,28	1,70

Pozn.: hodnoty jsou uvedeny v sekundách [s]

Graf č. 11 – porovnání doby dozvuku ve vybraném atriu



12. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo uvést přehled v navrhování, fungování a akustických vlastnostech atrií. Z provedeného průzkumu lze vyvodit, že atria jsou v současné době navrhována jako reprezentativní společné prostory, u kterých je z hlediska pohledu investora kladen důraz zejména na architektonické zpracování a vybavení prostoru. Ale ve vybraných případech už je brán i ohled na akustickou pohodu v prostoru, jsou aplikována akustická opatření a to vhodným způsobem se zachováním architektury atria.

Z porovnání modelových atrií bylo zjištěno, že u prostor většího objemu (který atria zpravidla vykazují) je doba dozvuku delší a tvar prostoru výrazně délku doby dozvuku neovlivňuje. Nerovnoměrné (varianta strop) i rovnoměrné (návrh úpravy) rozložení pohltivosti v prostoru má vliv na dobu dozvuku. Zvýšením pohltivosti ploch v prostoru dochází ke zkrácení doby dozvuku. V některých modelových případech i pod normou stanovenou hodnotu $T = 1,4$ s. Z toho vyplývá, že aplikace akusticky pohltivého materiálu v prostoru je vhodným řešením pro vytvoření příjemné akustické pohody v prostoru s dobrou srozumitelností řeči.

U vybraného atria byla in situ naměřena dlouhá doba dozvuku. Navrženým akustickým opatřením byla tato hodnota zkrácena a v prostoru tak zajištěno zlepšení akustické pohody. Normou stanovená hodnota doby dozvuku je pouze doporučená a není žádným legislativním předpisem vyžadována jako závazná. S ohledem na architektonické zpracování a fungování prostoru, nebylo dosaženo normové hodnoty doby dozvuku, která je stanovena pro haly a dvorany veřejných budov.

Závěrem tedy lze konstatovat, že při úpravách či rekonstrukcích prostor obdobného rozsahu jako je vybrané atrium, není jednoduché zajistit normou stanovené hodnoty doby dozvuku se zohledněním všech stávajících podmínek. Lze se jim ale pomocí akustických opatření přiblížit a zlepšit tak akustickou pohodu v prostoru atria.

13. Literatura, podklady a ostatní zdroje

13.1. Literatura

- [1] KAŇKA, Jan. *Stavební fyzika 1: akustika budov*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03664-8.
- [2] Přednášky k předmětu Akustika – vybrané stati vypracované doc. Ing. Janem Kaňkou, Ph.D. a Ing. Jiřím Nováčkem, Ph.D.
- [3] KAŇKA, Jan. *Akustika stavebních objektů*. Brno: ERA, 2009. Technická knihovna (ERA). ISBN 978-80-7366-140-3.
- [4] KUTTRUFF, Heinrich. *Room acoustics*. 4th ed. London: Spon, 2000
- [5] CAVANAUGH, William J. a Joseph A. WILKES. *Architectural acoustics: principles and practice*. New York: Wiley, c1999. ISBN 0471306827
- [6] MAHDAVI, Ardeshir. PAK, JinGuk. LECHLEITNER, Josef. *Acoustics of atria: Contrasting Measurement and Modeling Results*. Vienna: Proceedings: Building Simulation, 2007
- [7] KAŇKA, Jan a Jiří NOVÁČEK. *Stavební fyzika 3*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05674-5.
- [8] ČECHURA, Jiří. *Stavební fyzika 10: akustika stavebních konstrukcí*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01593-9.
- [9] CHRISTENSEN, Claus Lyngge a Georgios KOUTSOURIS. *ODEON Room Acoustics Software*. Version 12, 2nd Edition, Denmark, 2013
- [10] PASSERO Carolina Reich Marcon a Paulo Henrique Trombetta ZANNIN. *Statistical comparison of reverbation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades' formulas*. Applied Acoustics 71 (2010) 1204-1210
- [11] KYNCL, Jaroslav a Felix KOLMER. *Prostorová akustika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.

13.2. Technické normy a právní předpisy

- [12] ČSN 73 0525 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Všeobecné zásady
- [13] ČSN 73 0527 Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely
- [14] ČSN EN 12354-6 Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků – Část 6: Zvuková pohltivost v uzavřených prostorech
- [15] ČSN EN ISO 3382-1 Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přenos hudby a řeči
- [16] ČSN EN ISO 3382-2 Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech
- [17] ČSN EN ISO 16283-1 Akustika – Stavební měření zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost
- [18] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací

13.3. www stránky

- [19] KAŇKA, Jan. Prostorová akustika. StavbaWEB [online]. 18.12.2007. Dostupný na World Wide Web: < <https://stavbaweb.dumabyt.cz/prostorova-akustika-2570/clanek.html>>
- [20] www.archiweb.cz
- [21] www.odeon.dk
- [22] www.akustickematerialy.cz
- [23] www.akusticky-molitan.cz
- [24] www.k1arch.cz
- [25] www.metrostav.cz/cz/aktuality/aktualni_informace/detail?id=1750
- [26] www.techlib.cz
- [27] www.konstrukce.cz/clanek/narodni-technicka-knihovna-moderni-design-i-technologie/

- [28] www.zakonyprolidi.cz
- [29] www.ecophon.com
- [30] www.amf-cz.cz
- [31] wikipedia.org
- [32] www.atlasceska.cz/praha/hlavni-posta-jindrisska-ulice/
- [33] www.ahk.cz
- [34] www.tzb-info.cz
- [35] www.ceyhun.net
- [36] www.casopisstavebnictvi.cz
- [37] www.citace.com

14. Seznam příloh

14.1. Obrázky

Obrázek č. 1 – šíření zvuku ve volném prostoru

Obrázek č. 2 – rozložení akustického výkonu při dopadu na konstrukci

Obrázek č. 3 – šíření zvuku v uzavřeném prostoru

Obrázek č. 4 – průběh hladiny akustického tlaku

Obrázek č. 5 – optimální doba dozvuku různých prostor v závislosti na jejich objemu (podle ČSN 73 0525 ^[12])

Obrázek č. 6 – povolené tolerance doby dozvuku $T/T_{opt}100$ [%] pro obsazený prostor v závislosti na středním kmitočtu oktávového pásma (podle ČSN 73 0525 ^[12])

Obrázek č. 7 – rozmezí doby dozvuku

Obrázek č. 8 – atrium Karlovo nám. (foto autor)

Obrázek č. 9 – atrium Karlovo nám. (foto autor)

Obrázek č. 10 – atrium Nestlé Modřany (foto autor)

Obrázek č. 11 – atrium Nestlé Modřany (foto autor)

Obrázek č. 12 – atrium FA ČVUT Praha (foto autor)

Obrázek č. 13 – atrium FA ČVUT Praha (foto autor)

Obrázek č. 14 – atrium pobočky České pošty Praha, Jindřišská (foto autor)

Obrázek č. 15 – atrium FSv ČVUT Praha (foto autor)

Obrázek č. 16 – atrium FSv ČVUT Praha (foto autor)

Obrázek č. 17 – atrium NTK s akust. obkladem (foto autor)

Obrázek č. 18 – atrium NTK (foto autor)

Obrázek č. 19 – úprava u modelu D

Obrázek č. 20 – úprava u modelu E

Obrázek č. 21 – vypočtené hodnoty doby dozvuku (program ODEON)

Obrázek č. 22 – vypočtené hodnoty doby dozvuku (program ODEON)

Obrázek č. 23 – odhad hodnoty doby dozvuku podle jednotlivých výpočetních modelů (program ODEON)

Obrázek č. 24 – průběh modelace vyslání zvuku ze zdroje (program ODEON)

Obrázek č. 25 – průběh rozptylu zvuku v prostoru (program ODEON)

Obrázek č. 26 – vybrané atrium (foto autor)

Obrázek č. 27 – vybrané atrium (foto autor)

Obrázek č. 28 – zvukový analyzátor Norsonic Nor140

Obrázek č. 29 – měření in situ (foto J. Nováček)

Obrázek č. 30 – měření in situ (foto J. Nováček)

Obrázek č. 31 – půdorysné schéma atria

Obrázek č. 32 – model atria (nadhled)

Obrázek č. 33 – model atria

Obrázek č. 34 – umístění zdrojů a přijímačů

Obrázek č. 35 – přiřazení materiálů

Obrázek č. 36 – odhad doby dozvuku

Obrázek č. 37 – doba dozvuku ze zdroje Z1

Obrázek č. 38 – doba dozvuku ze zdroje Z2

Obrázek č. 39 – grafické zobrazení průběhu zvuku ze zdroje Z1

Obrázek č. 40 – model atria s akustickou úpravou

Obrázek č. 41 – model atria s akustickou úpravou (pohled J)

Obrázek č. 42 – model atria s akustickou úpravou (pohled S)

Obrázek č. 43 – model atria s akustickou úpravou (pohled V)

Obrázek č. 44 – model atria s akustickou úpravou (pohled Z)

Obrázek č. 45 – zdroje a přijímače zvuku v modelu atria

Obrázek č. 46 – odhad doby dozvuku (model s akustickou úpravou)

Obrázek č. 47 – grafické zobrazení průběhu zvuku ze zdroje Z1 (model s akustickou úpravou)

14.2. Tabulky

Tabulka č. 1 – hodnoty činitele útlumu zvuku ve vzduchu m pro oktávová pásma v normálních atmosférických podmínkách, tlak 101,325 kPa, teplota 20 °C (podle ČSN 73 0525 ^[12])

Tabulka č. 2 - požadavky na prostory pro veřejné účely (podle ČSN 73 0527 ^[13])

Tabulka č. 3 – rozsah měření doby dozvuku

Tabulka č. 4 – parametry zvuk pohlcujících konstrukcí [21], [28], [29]

Tabulka č. 5 – hodnoty akustického tlaku A (Charles Square Center)

Tabulka č. 6 – hodnoty akustického tlaku A (Nestlé)

Tabulka č. 7 – hodnoty akustického tlaku A (Fakulta architektury ČVUT)

Tabulka č. 8 – hodnoty akustického tlaku A (pošta Jindřišská)

Tabulka č. 9 – hodnoty akustického tlaku A (Fakulta stavební ČVUT)

Tabulka č. 10 – hodnoty akustického tlaku A (NTK Praha)

Tabulka č. 11 – hodnoty hladin akustického tlaku A v posuzovaných atriích

Tabulka č. 12 – zdroje hluku v posuzovaných atriích

Tabulka č. 13 – přehled modelů atrií

Tabulka č. 14 – popis variant při porovnání modelů

Tabulka č. 15 – hodnoty doby dozvuku – základní varianta

Tabulka č. 16 – hodnoty doby dozvuku – varianta strop

Tabulka č. 17 – hodnoty doby dozvuku – varianta vstup

Tabulka č. 18 – hodnoty doby dozvuku – varianta ochoz

Tabulka č. 19 – hodnoty doby dozvuku z hlediska jednotlivých variant

Tabulka č. 20 – hodnoty doby dozvuku s akustickou úpravou

Tabulka č. 21 – minimální počty míst a měření (ČSN EN ISO 3382-2^[15])

Tabulka č. 22 - naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s]

Tabulka č. 23 – parametry použitých materiálů

Tabulka č. 24 – doba dozvuku vybraného prostoru (program odeon)

Tabulka č. 25 – hodnoty součinitele pohltivosti pro akustický materiál obkladu

Tabulka č. 26 – druhy a plochy akustických úprav

Tabulka č. 27 – doba dozvuku vybraného prostoru s úpravou (program odeon)

Tabulka č. 28 – doba dozvuku vybraného prostoru srovnání výsledků

14.3. Grafy

Graf č. 1 – hodnoty akustického tlaku A

Graf č. 2 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru - základní varianta

Graf č. 3 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru – varianta strop

Graf č. 4 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru – varianta vstup

Graf č. 5 – graf závislosti doby dozvuku na objemu prostoru – varianta ochoz

Graf č. 6 – graf závislosti konstrukčního opatření prostoru atria na dobu dozvuku

Graf č. 7 – graf účinnosti akustického opatření na dobu dozvuku

Graf č. 8 – porovnání modelových variant s normovými hodnotami

Graf č. 9 - naměřené hodnoty doby dozvuku T_{20} [s]

Graf č. 10 – porovnání doby dozvuku ve vybraném atriu

Graf č. 11 – porovnání doby dozvuku ve vybraném atriu

14.4. Výpočty

Příloha č. 1 – výpočet doby dozvuku, model A, varianta základní

Příloha č. 2 – výpočet doby dozvuku, model A, varianta strop

Příloha č. 3 – výpočet doby dozvuku, model A, varianta vstup

Příloha č. 4 – výpočet doby dozvuku, model A, varianta ochoz

Příloha č. 5 – výpočet doby dozvuku, model A, varianta úprava

Příloha č. 6 – výpočet doby dozvuku, model D, varianta základní

Příloha č. 7 – výpočet doby dozvuku, model D, varianta strop

Příloha č. 8 – výpočet doby dozvuku, model D, varianta vstup

Příloha č. 9 – výpočet doby dozvuku, model D, varianta ochoz

Příloha č. 10 – výpočet doby dozvuku, model D, varianta úprava

Příloha č. 11 – výpočet doby dozvuku, model F, varianta základní

Příloha č. 12 – výpočet doby dozvuku, model F, varianta strop

Příloha č. 13 – výpočet doby dozvuku, model F, varianta vstup

Příloha č. 14 – výpočet doby dozvuku, model F, varianta ochoz

Příloha č. 15 – výpočet doby dozvuku, model F, varianta úprava

Příloha č. 16 – výpočet doby dozvuku, model J, varianta základní

Příloha č. 17 – výpočet doby dozvuku, model J, varianta strop

Příloha č. 18 – výpočet doby dozvuku, model J, varianta vstup

Příloha č. 19 – výpočet doby dozvuku, model J, varianta ochoz

Příloha č. 20 – výpočet doby dozvuku, model J, varianta úprava