



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra konstrukce pozemních staveb

Prostorová akustika v otevřených kancelářích

Room acoustics in open plan offices

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Elizaveta Fatyanova

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Bc. Jaroslav Vychytil, Ph.D.

Praha, 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fatlanova Jméno: Elizaveta Osobní číslo: 456880
 Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb (K124)
 Studijní program: Budovy a prostředí (N3649)
 Studijní obor: Budovy a prostředí (3608T006)

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Prostorová akustika v otevřených kancelářích
 Název diplomové práce anglicky: Room acoustics in open plan offices

Pokyny pro vypracování:

Vymezení pojmu otevřená kancelář. Základní teorie prostorové akustiky. Popis veličin potřebných pro hodnocení prostorové akustiky (např. doba dozvuku - T, hladina akustického tlaku pozadí - LB, srozumitelnost řeči - STI) v kancelářích včetně uvedení důležitých výpočtových vztahů. Význam pohltivosti a odrazivosti povrchů a jejich poloha vůči posluchači. Výběr vhodné (-ých) kanceláře (-í). Měření vybraných parametrů potřebných pro následné početní hodnocení akustičnosti daného prostoru. Popis možných úprav pro splnění požadavků kladených na srozumitelnost a vnímání řeči ve stavu plně vs. málo obsazené kanceláře.

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 3382-3 Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 3: Otevřené kanceláře. Praha: ÚNMZ, srpen 2012 / červenec 2022. [In english].

ČSN EN ISO 14257 Akustika - Měření a popis křivek rozložení zvuku v pracovních prostorech, pomocí parametrů, pro hodnocení jejich akustických vlastností. Praha : ČNI, srpen 2002

ČSN EN 60268-16, ed. 3. Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči. Praha : ČAS, červen 2021.

ČSN 73 0525 Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Všeobecné zásady. ČNI Praha, únor 1998.

ČSN 73 0527 Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Protory ve školách - Prostory pro veřejné účely. ČNI Praha, březen 2005.

S.AKU Akustický komfort In. SBToolCZ pro administrativní budovy, verze 2022. ČVUT v Praze, UCEEB a Fakulta stavební jako součást Národní platformy SBToolCZ. [on-line]. Dostupné z: <https://www.sbtool.cz>

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Bc. Jaroslav Vychytil, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 20. 9. 2022 Termín odevzdání diplomové práce: 9. 1. 2023
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[Redacted Signature]
 Podpis vedoucího práce

[Redacted Signature]
 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“.

20.09.2022
 Datum převzetí zadání

[Redacted Signature]
 Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Elizaveta Fatyanova

Název diplomové práce: Prostorová akustika v otevřených kancelářích

Základní část: Konstrukce pozemních staveb podíl: 100 %

Formulace úkolů: Vymezení otevřené kanceláře. Základní teorie prostorové akustiky. Veličiny potřebné pro hodnocení prostorové akustiky včetně důležitých výpočtových vztahů. Význam pohltivosti a odrazivosti povrchů a jejich poloha vůči posluchači. Výběr vhodné kanceláře. Měření vybraných parametrů potřebných pro početní hodnocení. Popis možných úprav pro zajištění srozumitelnosti a vnímání řeči v plně vs. málo obsazené kanceláři.

Podpis vedoucího DP:  Datum: 20.9.2022

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)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/200 sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V dne

.....
podpis

Poděkování

Chtěla bych velmi poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Bc. Jaroslavu Vychytilovi, Ph.D. za jeho vstřícnost, cenné rady, odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování této práce věnoval.

Rovněž děkuji firmě Dekprojekt s.r.o za půjčení měřicích přístrojů, použitých pro měření parametrů prostorové akustiky a také za umožnění provádění těchto měření v její kancelářských prostorech.

Anotace

Diplomová práce se zabývá prostorovou akustikou v kancelářích otevřeného typu. V rámci práce jsou prozkoumány existující požadavky na prostorovou akustiku v otevřených kancelářích, způsoby jejich výpočtů a měření. Pro zkušební měření prozkoumaných veličin jsou zvoleny dva kancelářské prostory. Tyto prostory jsou následně vymodelovány ve specializovaném výpočtovém softwaru a zkalibrovány pomocí naměřených hodnot. Pomocí výpočtových modelů jsou porovnány výsledky změřených a výpočtem stanovených veličin.

Klíčová slova

Otevřená kancelář, prostorová akustika, doba dozvuku, hladina akustického tlaku A, index přenosu řeči, akustická měření, akustické úpravy.

Annotation

The diploma thesis deals with room acoustics in open-plan offices. The existing requirements for room acoustics in open offices, methods of their calculations and measurements are examined within the work. Two office spaces are chosen for the test measurement of the studied parameters. These spaces are subsequently created in specialized computing software and calibrated using measured values. With the help of computational models, the results of measured and calculated quantities are compared.

Keywords

Open office, room acoustics, reverberation time, sound pressure level A, speech transmission index, acoustic measurements, acoustic modifications.

OBSAH

Úvod	9
1. Základy akustiky	10
1.1. Základní pojmy	10
1.2. Prostorová akustika	14
1.2.1. Geometrická akustika	14
1.2.2. Vlnová akustika	14
1.2.3. Statistická akustika	15
1.2.4. Konstrukce na pohlcování zvuku	16
1.3. Fyziologická akustika a psychoakustika	18
2. Specifika prostorové akustiky v otevřených kancelářích	19
2.1. Vliv prostorové akustiky na zaměstnance	19
2.2. Existující požadavky a specifikace hodnocených veličin	20
2.2.1. Certifikační systémy	20
2.2.1.1. Doba dozvuku	20
2.2.2. Norma ČSN EN ISO 3382-3	22
2.2.2.1. Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A	23
2.2.2.2. Hladina akustického tlaku A v 4 m	25
2.2.2.3. Vzdálenost komfortu	25
2.2.2.4. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřicích místech uvnitř akustických zón	26
2.2.2.5. Index přenosu řeči	27
2.2.2.6. Vzdálenost rušení	28
2.2.2.7. Změny ve vydání normy ČSN EN ISO 3382-3	28
3. Praktické stanovení jednotlivých parametrů prostorové akustiky	29
3.1. Popis zkoumaných prostorů	29
3.1.1. Kancelář č.1	29
3.1.2. Kancelář č.2	31
3.2. Doba dozvuku	33
3.2.1. Metoda měření	33
3.2.2. Postup měření	33
3.2.3. Výsledky měření	36
3.2.3.1. Naměřené hodnoty - kancelář č.1	36
3.2.3.2. Naměřené hodnoty - kancelář č.2	37
3.2.3.3. Nejistota měření	39

3.2.3.4. Dopočet na obsazený stav	40
3.2.4. Hodnocení stávajícího stavu	41
3.2.4.1 Hodnocení výsledků měření - kancelář č.1	41
3.2.4.2 Hodnocení výsledků měření - kancelář č.2	43
3.3. Parametry dle ČSN EN ISO 3382-3	45
3.3.1. Metody měření	45
3.3.2. Postup měření	45
3.3.3 Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A	50
3.3.3.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu	50
3.3.4. Hladina akustického tlaku A ve 4 m	51
3.3.4.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu	51
3.3.5. Vzdálenost komfortu	52
3.3.5.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu	52
3.3.6. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřicích místech uvnitř akustických zón	53
3.3.6.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu	53
3.3.7. Index Přenosu řeči	54
3.3.7.1. Výsledky měření	54
3.3.7.2. Hodnocení stávajícího stavu	55
3.3.8. Vzdálenost rušení	59
3.3.8.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu	59
3.4 Komplexní hodnocení změřených parametrů	60
3.4.1. Celkové hodnocení kanceláří	60
3.4.2. Vzájemný vliv jednotlivých parametrů	62
3.4.3. Porovnání vlivu geometrie jednotlivých kanceláří	65
3.4.4. Subjektivní hodnocení změřených hodnot	66
4. Teoretické zkoumání možností zlepšení prostorové akustiky	68
4.1. Tvorba a kalibrace výpočtových modelů	68
4.2. Výpočet a hodnocení parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN 3382-3	73
4.3. Výpočtové hodnocení vlivu hluku pozadí	76
Závěr	89
Zdroje	91

Úvod

Při optimalizaci prostorové akustiky se většinou řeší doba dozvuku prostoru. Jedná se o parametr, který popisuje vlastnost celého prostoru a který lze poměrně jednoduše stanovit měřením, pomocí výpočtového programu, či ručně dle pomocných výpočtových vztahů. Tato veličina se probírá již v bakalářském studiu a ověření tohoto parametru pro některé druhy prostorů je vyžadováno hygienickými stanicemi. Zároveň však existuje velké množství prostorů, u kterých doba dozvuku není vhodným a nebo dostačujícím parametrem pro popis prostorové akustiky. Jedním z příkladů takových prostorů jsou kanceláře otevřeného typu.

Ačkoli v současné době populárním trendem je využití možnosti práce z domova (hlavně v důsledku pandemie virové choroby covid-19), velká část lidí pořád pracuje v kancelářích. Kanceláře otevřeného typu mají z hlediska zaměstnavatelů a zaměstnanců určité výhody, mezi které patří například flexibilita prostoru, zjednodušení komunikace mezi pracovníky, snadnější kontrola zaměstnanců, rychlejší začlenění do kolektivu a další. Hlavním problémem takových prostorů však pořád zůstává hluk na pracovišti, který způsobuje snížení soustředění. Existuje množství různých průzkumů, které prokazují negativní vliv nízké kvality akustiky prostoru na výkonnost zaměstnanců. Kromě snížení efektivity pracovníků, nedostatek klidu na pracovišti může vést i ke zdravotním či psychickým potížím. V současné době pořád zůstává velké množství stávajících kancelářských prostorů s akustickým prostředním vyvolávajícím nespokojenost zaměstnanců. Při návrhu nových kanceláří také není vždycky kladen důraz na optimalizaci návrhu akustických úprav s ohledem na větší množství parametrů prostorové akustiky. Cílem této diplomové práce je tudíž zkoumání existujících parametrů prostorové akustiky kanceláří otevřeného typu.

Velkoprostorové otevřené kanceláře představují prostor, ve kterém je šíření zvuku důležité primárně na jednotlivých pracovních místech, které mohou být umístěny různým způsobem v celém prostoru. Některé certifikační systémy pro hodnocení budov z hlediska udržitelného rozvoje nabízejí i hodnocení doby dozvuku v otevřených kancelářích pro zajištění komfortu uživatelů, avšak tento parametr se vztahuje na celý prostor a nezahrnuje hodnocení akustiky na jednotlivých pracovních místech. Popisem parametrů prostorové akustiky v jednotlivých zónách a místech pobytu zaměstnanců v otevřených kancelářích se zabývá norma ČSN EN ISO 3382-3 [5], poprvé vydaná až v roce 2012.

Velkou částí této diplomové práce je zkoumání existujících parametrů pro hodnocení prostorové akustiky v kancelářích otevřeného typu, používaných v České republice. Do zkoumání spadá jak teoretické seznámení s uvedenými veličinami tak i zkoušení měření jednotlivých parametrů na vzorových kancelářích a porovnání změřených hodnot se hodnotami stanovenými výpočtem pomocí odborného programu na simulaci prostorové akustiky v uzavřených prostorech.

1. Základy akustiky

Akustika je rozsáhlý fyzikální obor, který zkoumá vznik, šíření a působení zvuku. V této kapitole budou představeny základní poznatky ze stavební akustiky, potřebné pro orientaci v této diplomové práci.

1.1. Základní pojmy

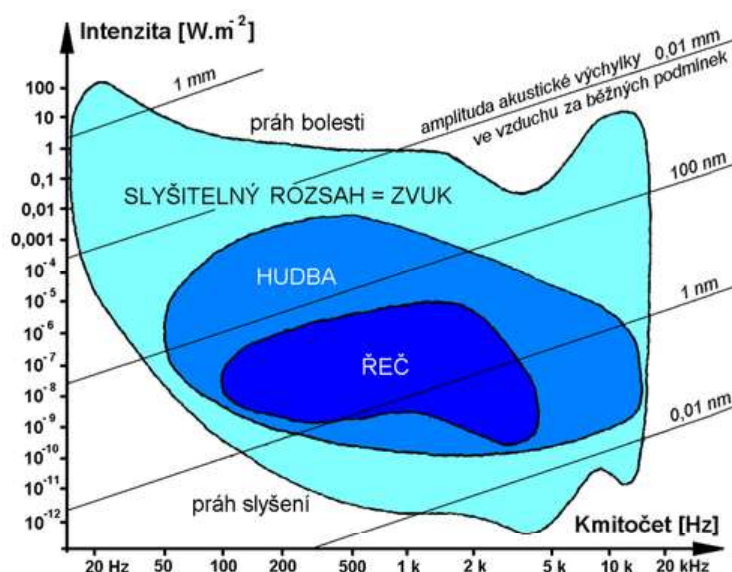
Zvuk je definován jako mechanické vlnění šířící se pružným prostředím. Jinak řečeno jedná se o vibraci částic kapalného, plynného či pevného prostředí. Ve všech těchto prostředích dochází k podélnému vlnění, v pevných látkách se však zvuk může šířit také příčným vlněním anebo kombinací příčného a podélného vlnění.

Charakter šíření akustického vlnění se popisuje pomocí vlnové délky λ [m], která je definována jako dráha, kterou urazí vlna během jednoho kmitu. Vlnová délka se dopočítá dle následujícího vztahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1}$$

kde: c je rychlost zvuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];
 f je kmitočet [Hz].

Kmitočet vyjadřuje rychlost opakování kmitavého pohybu počtem kmitů za sekundu. Pro lidské ucho je oblast slyšitelnosti je vymezená kmitočty od 16 Hz do 16 000 Hz. Při tom pro hodnocení akustického prostředí se většinou využívají kmitočty v rozsahu od 125 Hz do 4000 Hz. Je to dáno tím, že na nízkých kmitočtech do 63 Hz člověk vnímá zvuky s malou citlivostí, a od 8000 Hz je zvuk většinou i tak dobře tlumen prostředím. Slyšitelný rozsah kmitočtů a intenzit mechanického kmitání je pro názornost představen na následujícím obrázku.



Obr. 1: Slyšitelný rozsah kmitočtů a intenzit mechanického kmitání omezený prahem bolesti a přibližné rozsahy hudby a lidské řeči [13]

Intenzitou zvuku I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] (uvedenou na předchozím obrázku) se rozumí míra účinku vlnění a jím přenášeného akustického výkonu zvuku. Z toho vyplývají dva další důležité parametry prostorové akustiky, a to akustický výkon zvuku a akustický tlak.

Akustický tlak p [Pa] vyjadřuje rozdíl mezi barometrickým tlakem a skutečným tlakem, plynu při akustickém ději.

Akustický výkon W [W] popisuje míru přenosu energie při akustickém vlnění.

Vzhledem k tomu, že nejtišší zvuky, vnímané lidským uchem, nabývají hodnot akustického tlaku kolem 10^{-5} Pa a nejhlasitější hudba komfortní pro sluch nabývá až jednotek pascalů, a také kvůli logaritmické závislosti mezi vjemem a fyzikální veličinou, která jej způsobila, bylo zavedeno hladinové vyjádření jednotlivých veličin. [10]

Hladina akustické intenzity L_I [dB] je pak vyjádřena následujícím způsobem:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \quad (2)$$

kde: I je intenzita zvuku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$];

I_{ref} je referenční hodnota akustické intenzity [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], $I_{ref} = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Hladina akustického tlaku L_p [dB] je vyjádřena podobným způsobem:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} = 20 \log \frac{p}{p_{ref}} \quad (3)$$

kde: p je akustický tlak [Pa];

p_{ref} je referenční hodnota akustického tlaku [Pa], $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Hladina akustického výkonu L_W [dB] vyzářena zdrojem zvuku se pak uvádí dle vztahu:

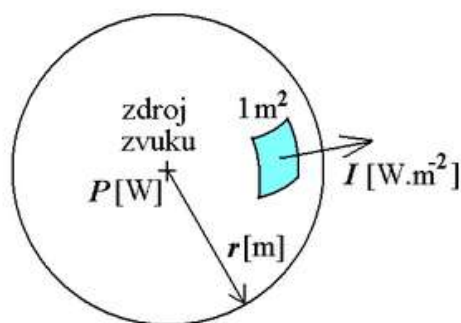
$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (4)$$

kde: P je akustický výkon [W];

P_{ref} je referenční hodnota akustického výkonu [W], $P_{ref} = 10^{-12}$ W.

Šíření zvuku v otevřeném prostoru - volné zvukové pole

Při snížení zvuku ve volném prostoru se akustický výkon P [W] s rostoucí vzdáleností r [m] od zdroje zvuku rozšiřuje na stále větší plochu S [m^2], čímž se snižuje intenzita I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]. Toto neplatí pro plošné zdroje zvuku [12].



Obr. 2: Šíření zvuku od bodového zdroje [14]

Od bodového zdroje se zvuk šíří v kulových vlnoplochách, kde $S = 4\pi r^2$. [K] Hladina akustického tlaku L [dB] v určité vzdálenosti se proto vypočítá dle následujícího vztahu:

$$L = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} \quad (5)$$

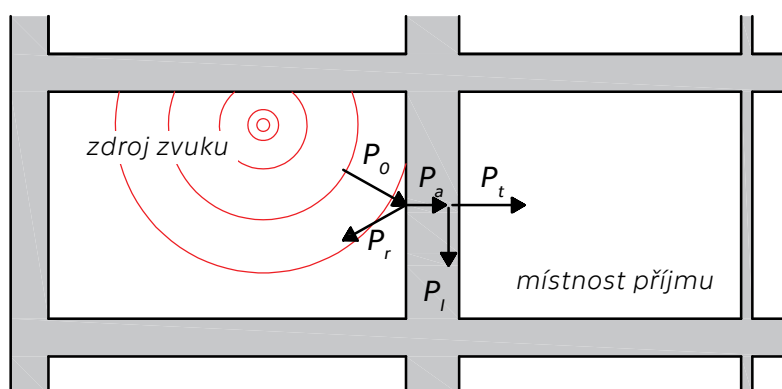
kde: L_w je hladina akustického výkonu [dB];
 Q je činitel směrovosti [-];
 r je vzdálenost od bodového zdroje [m].

Důležitým parametrem při šíření zvuku ve volném prostoru je útlum zvuku ohybem přes překážku. Intenzita zvuku se snižuje v závislosti na tvaru překážky, umístění zdroje zvuku, na místě sledování zvuku a na vlnové délce zvuku. K útlumu zvuku dochází, když rozměry překážky převyšují vlnovou délku. Dále na šíření zvuku ve volném poli mají vliv útlum zvuku ve vzduchu, útlum zvuku vlivem gradientu větru, útlum zvuku vlivem gradientu teploty a útlum vlivem sněhu.

Šíření zvuku v uzavřeném prostoru

Při šíření zvuku v uzavřeném prostoru dochází k vícenásobnému odrazu zvuku od okolních povrchů. Oproti šíření zvuku ve volném poli tento proces vede ke zvýšení hladiny akustického tlaku v prostoru.

Na následujícím obrázku je zobrazeno rozložení akustického výkonu při dopadu zvuku na povrch v prostoru. Část původního akustického výkonu P_o [W] se odrazí zpátky do místnosti P_r [W], další část P_a [W], která je absorbována konstrukcí, se rozdělí na zvuk pohlcený konstrukcí P_l [W] a zvuk o akustickém výkonu P_t [W] vyzářený do dalšího prostoru, odděleného předmětnou konstrukcí.



Obr. 3: Schéma šíření akustického výkonu při dopadu na dělicí konstrukci

Schopnost prvku pohlcovat dopadající akustický výkon se vyjadřuje pomocí činitele pohltivosti α [-], který je definován dle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{P_a}{P_o} \quad (6)$$

kde: P_a je část původního akustického výkonu absorbovaného konstrukcí [W];
 P_o je akustický výkon dopadající na konstrukci [W].

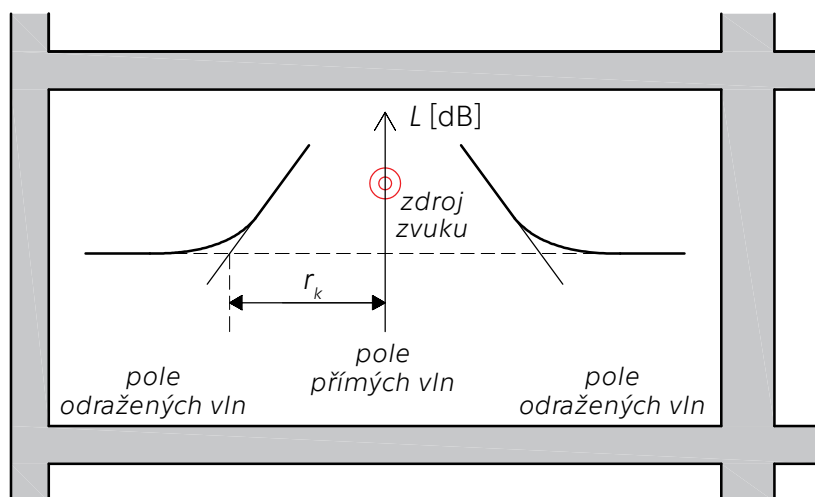
Tato veličina nabývá hodnot od 0 (100% odrazivá skladba) do 1 (100% pohltivá skladba) a je závislý na kmitočtu zvuku. Běžné konstrukce na pohlcování zvuku jsou popsány v kapitole 1.2.4.

Pole přímých a pole odražených vln

V uzavřeném prostoru při aktivním zdroji zvuku vzniká pole přímých a pole odražených vln. Rozhraničení jednotlivých zvukových polí je označeno dozvukovou vzdáleností r_k [m].

Pole přímých vln se nachází v bezprostředním okolí zdroje zvuku. Akustická energie v tomto poli se chová podle principu šíření zvuku ve volném prostoru. Hladina akustického tlaku v poli přímých vln je závislá na vzdálenosti od zdroje a uživatel prostoru je schopen rozpoznat směr šíření zvuku.

Pole odražených vln se nachází ve vzdálenějších částech prostoru od zdroje zvuku. V tomto poli je hladina akustického tlaku závislá na celkové pohltivosti místnosti a již není definovaná vzdáleností od zdroje zvuku. V poli odražených vln se předpokládá difúzní charakter zvukového pole.



Obr. 4: Schéma zobrazení polí přímých a odražených vln

1.2. Prostorová akustika

Prostorová akustika hodnotí akustickou situaci v uzavřených anebo v polouzavřených prostorech. Tato část stavební akustiky se převážně zabývá chováním zvuku v prostorech, ve kterých je podstatná srozumitelnost řeči či hudby. Zároveň řešení prostorové akustiky je také důležité v místech shromáždění osob, kde pomoci vhodných akustických úprav lze zamezit většímu rušení či jiným nepříznivým účinkům zvuku.

V uzavřených či polouzavřených prostorech kvůli většinou velkému množství dělicích ploch, odlišným vlastnostem materiálů v interiéru a jiným podmínkám prostoru zvuk se nešíří rovnoměrně. Zvuk na cestě k lidskému uchu urazí různé vzdálenosti, odrazí se od odlišných povrchů s různou intenzitou a přijde k cíli s určitým zpožděním. Optimální návrh prostorové akustiky se zabývá řešením těchto problémů, aby pobyt v prostoru zůstal i po delší dobu komfortní pro uživatele. Tři hlavní metody řešení prostorové akustiky jsou uvedeny v následujících kapitolách.

1.2.1. Geometrická akustika

Geometrická akustika řeší potřebné šíření zvuku v prostoru pomoci stavebně vhodného uspořádání odrazivých ploch v prostoru. Takový způsob řešení prostorové akustiky je převážně používán ve velkých prostorech, ve kterých je důležitá srozumitelnost řeči či hudby od vzdáleného zdroje zvuku.

Odražený zvuk urazí oproti přímo šířenému zvuku větší vzdálenost, a tak k posluchači může přijít s významným zpožděním. Větší časový rozdíl ve vnímání stejného vyzářeného signálu způsobuje horší srozumitelnost a zvyšuje náročnost koncentrace. Odrazy od velmi vzdálených ploch na druhou stranu nejsou z hlediska komfortu uživatelů podstatné, jelikož při větších vzdálenostech se intenzita zvuku snižuje a odražený zvuk pak lidským uchem není lidským uchem vnímán rušivě v důsledku maskování.

1.2.2. Vlnová akustika

Vlnová akustika se zabývá zajištěním difúznosti akustického pole, které je potřeba zabezpečit od nejnižšího kmitočtu pro zamezení vzniku stojatého vlnění. *„V důsledku odrazu zvuku od dvou navzájem rovnoběžných stěn dochází ke stojatému vlnění při kmitočtech, pro které se vzájemná vzdálenost stěn rovná celistvému násobku půlvlny.“* [12]. Vznik stojatého vlnění narušuje rovnoměrnost rozložení intenzity zvukového pole v prostoru, čímž vede ke zhoršení kvality a srozumitelnosti zvukového signálu.

Existuje několik převážně používaných opatření této metody řešení prostorové akustiky. Jedním z řešení je vhodná volba objemu prostoru, jelikož s větším objemem se zvyšuje i difúznost akustického pole. Dalším opatřením je vyhýbání se rovnoběžným odrazivým povrchům v prostoru a celistvým násobkům hlavních rozměrů místnosti. Také rovnoměrnost intenzity zvukového pole pomáhají zajistit pohltivé a difúzní obklady, které pohlcují či naopak rozptylují zvukovou vlnu.

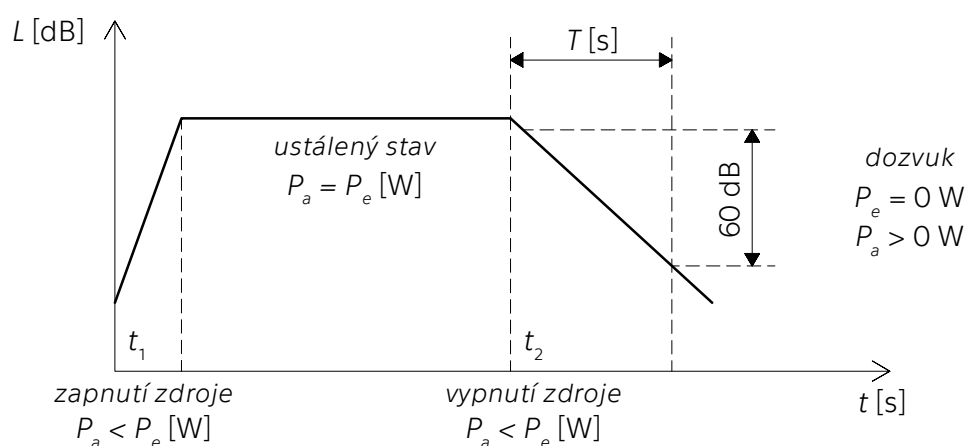
1.2.3. Statistická akustika

Statistická akustika uvažuje s difúzitou zvukového pole v celém řešeném prostoru. Parametrem této metody prostorové akustiky je doba dozvuku prostoru, která popisuje jeho energetickou bilanci a je závislá na pohltivosti jednotlivých materiálů v prostoru a celkovém množství zvukové energie.

„Doba dozvuku T [s] je definována jako doba potřebná k poklesu prostorově průměrné hustoty zvukové energie v uzavřeném prostoru o 60 dB po ukončení vyzařování zdroje zvuku“ [3]. Pro větší přehlednost na obrázku č. 5 je zobrazené schéma popisující závislost hladiny akustického tlaku v čase při stanovení doby dozvuku. V první fázi po zapnutí zdroje se zvyšuje hladina akustického tlaku v poli odražených vln uzavřeného prostoru. V další fázi nastane rovnovážný stav, ve kterém akustický výkon emitovaný zdrojem zvuku P_e [W] a akustický výkon pohlcovaný prostorem P_a [W] se srovnají. Tento rovnovážný stav zůstane do okamžiku vypnutí zdroje zvuku, které způsobí zrušení pole přímých vln a změnu bilanční rovnici ustáleného stavu na následující:

$$P_e - P_a = \frac{dE}{dt} \quad (7)$$

kde: P_e je akustický výkon vyzařovaný zdrojem [W];
 P_a je akustický výkon pohlcovaný konstrukcemi prostoru [W];
 $\frac{dE}{dt}$ je člen vyjadřující změnu celkové akustické energie v čase [W].



Obr. 5: Schéma k definici doby dozvuku

Hladina akustického tlaku v poli odražených vln se snižuje postupně vzhledem k časovému rozdílu dorazu jednotlivých zvukových vln do místa sledování předmětné veličiny. Popsanému jevu se říká dozvuk a teoreticky tento proces není časově omezen. Z tohoto důvodu se zkoumá doba, za kterou po vypnutí zdroje zvuku se hladina akustického tlaku sníží o 60 dB.

Jak bylo dříve řečeno doba dozvuku T_s [s] je závislá na objemu místnosti a celkové pohltivosti prostoru a je možné ji vypočítat dle následujícího vztahu (podle Sabine):

$$T_s = 0,163 \frac{V}{A} \quad (8)$$

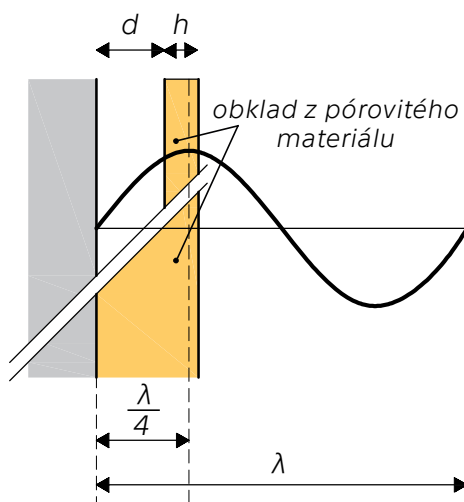
kde: V je objem prostoru [m^3];
 A je celková zvuková pohltivost místnosti [m^2].

1.2.4. Konstrukce na pohlcování zvuku

Potřebných akustických úprav zvukového pole často lze docílit pomocí materiálových úprav prostoru. Nejrozšířenější je použití zvukopohlcujících materiálů, avšak některé druhy prostorů vyžadují i prvky rozptylující zvuk. Níže bude představeno základní rozdělení těchto prvků a jejich principy pohlcování či rozptýlení zvuku.

a) Porézní konstrukce

Porézní pohlcovače fungují na principu přeměny akustické energie na jinou, většinou tepelnou. Tyto materiály mají systém pórů, který je navzájem propojen a otevřen do volného prostoru. Porézní konstrukce většinou tvoří desky minerálních nebo organických látek. Tyto konstrukce jsou nejvíce účinné při umístění pórovitého materiálu ve vzdálenosti alespoň $1/4$ vlnové délky zvuku λ [m] od pevného povrchu. Z tohoto důvodu uvedený materiál pohlcuje zvuk hlavně na vysokých kmitočtech, kde vlnová délka je menší.



Obr. 6: Obklad z pórovitého materiálu

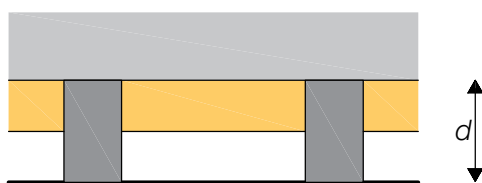
Činitel pohltivosti porézních konstrukcí je závislý na tloušťce pohlcovače h [m] a na odsazení materiálu od pevného povrchu d [m].

b) Kmitající membrány a desky

Kmitající membrána je tenká deska či fólie s malou ohybovou tuhosti umístěnou v nějaké vzdálenosti od pevného povrchu. Tyto konstrukce pohlcují zvuk převážně na nízkých kmitočtech v oblasti rezonančního kmitočtu f_r [Hz], který je závislý na plošné hmotnosti membrány a tloušťce vzduchové mezery.

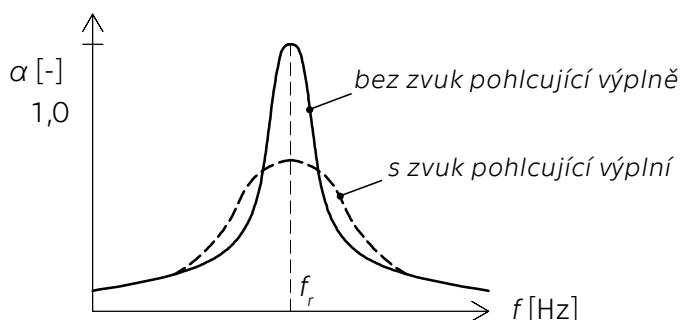
$$f_r = \frac{60}{\sqrt{m'd}} \quad (9)$$

kde: m' je plošná hmotnost kmitající membrány či desky [m^2];
 d je tloušťka vzduchové mezery [m].



Obr. 7: Schéma konstrukce kmitající membrány a desky

Jak je patrné z následujícího obrázku, při vložení porézního pohlcovače do vzduchové mezery konstrukce se zvětšuje kmitočtový rozsah pohlcování zvuku konstrukcí a zároveň se snižuje maximální hodnota činitele pohltivosti v oblasti rezonančního kmitočtu, což způsobuje rovnoměrnější průběh pohltivosti.

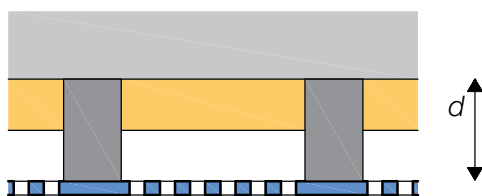


Obr. 8: Vliv zvuk pohlcující výplně v pohlcovači typu kmitající deska

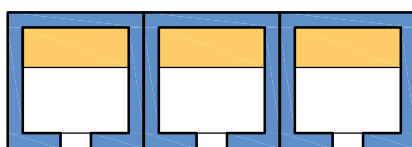
c) Dutinové rezonátory

„Pohlcování zvuku dutinovými rezonátory je založeno rovněž na principu rezonance. Při ní jsou kmitajícím prvkem částice vzduchu v otvoru spojujícím vzduchovou dutinu s vnějším prostředím.“ [12] Konstrukce také pohlcuje zvuk převážně v oblasti rezonančního kmitočtu, který v tomto případě je dán rozměry vzduchové mezery, tvarem a hustotou otvorů, spojujícího vzduchovou mezeru a okolní prostředí.

Materiálovým řešením mohou být jak tvárniceové rezonátory z keramických prvků, tak i děrované desky, nejčastěji tvořené dřevovláknitou či sádrokartonovou deskou anebo kovovým plechem.



Obr. 9: Schéma konstrukce s děrovanou deskou



Obr. 10: Schéma tvárniceového rezonátoru

1.3. Fyziologická akustika a psychoakustika

Fyziologická akustika zkoumá zpracování zvukového signálu sluchovým orgánem, který je prostřednictvím nervového systému spojen s mozkovou kůrou, kde působí sluchový vjem [11]. Z lékařského hlediska se fyziologická akustika zabývá jak funkcemi a poruchami sluchu, tak i vlivem zvuku na zdraví člověka. V kontextu negativního vlivu na člověka je vhodnější použití pojmu hluk. Státní zdravotní ústav definuje hluk, jako každý nechtěný zvuk (bez ohledu na jeho hlasitost), který má rušivý nebo obtěžující charakter, nebo který má škodlivé účinky na lidské zdraví. [15] Z definice vyplývá, že vyhodnocení hluku může být velmi individuální a závisí na specifické pohledu každé osoby.

Hluk je rozdělován na habituální a emoční hluk. Habituální hluk je běžný, známý hluk, který výrazně nepoškozuje lidské zdraví. Příkladem takového hluku je hluk v dopravních prostředcích, pouliční ruch, hluk v domácnosti a tak dále. Emoční hluk naopak je náhlý a nečekáný, může signalizovat nebezpečnou situaci (například zvuk sanitky). Popsané druhy hluku mají například vliv na vzestup krevního tlaku. Rozdíl spočívá v tom, že habituální hluk začíná působit od hladiny akustického tlaku A cca 65 dB, vliv emočního hluku na druhou stranu není hlasitostí hluku omezen. [11]

Negativní vliv hluku na zdraví člověka lze rozdělit do následujících kategorií:

- specifické účinky - poškození sluchového orgánu;
- nespecifické účinky - vliv na různé funkce organismu;
- akutní účinky - reakce organismu na stres (poškození sluchového aparátu, zvýšení krevního tlaku, zrychlení tepové frekvence, zvýšení hladiny adrenalinu, psychické účinky - deprese, agresivita, únava, atd.);
- chronické účinky - tzv. civilizační choroby (sluchové ztráty, vznik hypertenze, poškození srdce, pocit únavy, nespavost, snížení imunity apod.). [16]

Psychoakustika je definována jako obor akustiky, který studuje psychologické a fyziologické parametry vnímání zvuku člověkem. Tento obor má přímý vliv na stanovení požadavků na kvalitu akustického prostředí. Specifika vlivu subjektivního vnímání hluku v kancelářských prostorech je popsána v kapitole 2.1.

2. Specifika prostorové akustiky v otevřených kancelářích

Kancelář otevřeného typu (anglicky open plan office) představuje pracovní prostor, který je navržen pro umístění většího počtu osob, pracujících bez úplného oddělení pracovních míst. Kancelář otevřeného typu je z hlediska prostorové akustiky poměrně specifický prostor. Legislativně v České republice na prostorovou akustiku v kancelářích nejsou stanoveny závazné požadavky, avšak spousta lidí tráví v těchto prostorech třetinu dne a existuje velké množství průzkumů, které prokazují negativní vliv špatného stavu prostorové akustiky na psychickou pohodu a výkon zaměstnanců. Tato kapitola je věnována problematice vlivu prostorové akustiky na zaměstnance a popisu existujících požadavků pro zlepšení akustického komfortu.

2.1. Vliv prostorové akustiky na zaměstnance

Akustické prostředí v kancelářích otevřeného typu je rozšířeným problémem. Leesmanův index, zabývající se zkušenostmi zaměstnanců na pracovištích uvádí, že dle informací k září 2022 70,5 % zaměstnanců uvádí hluk na pracovišti jako velmi důležitý parametr, a zároveň pouze 32,8 % zaměstnanců jsou s kvalitou hluku na pracovišti spokojeni [17]. Leesmanův index také uvádí, že pracovníkům trvá v průměru 25 minut, než se po přerušení vrátí k původnímu úkolu a ještě dalších 8 minut potřebují na dosažení stejné úrovně koncentrace jako před tím. [18]

Ecophon se v souhrnu výzkumů [19] uvádí, že 67 % respondentů uvedlo negativní vliv hluku na jejich výkonnost a zároveň odhadují snížení pracovního výkonu o 6 %.

V normě ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] v citaci se uvádí model, který ukazuje na spojení mezi kognitivní výkonností a hodnotou indexu přenosu řeči. V normě je dále uvedeno, že pozdější prošetření experimentálních dat podpořilo tento model a poskytlo důkaz závislosti kvality provádění úloh se zapojením krátkodobé paměti na indexu přenosu řeči.

I z těchto několika průzkumů vyplývá důležitost vhodného řešení prostorové akustiky v otevřených kancelářích. Problémy s vhodným řešením prostorové akustiky jsou logicky spojeny s absencí vnitřních dělících konstrukcí, které by oddělovaly jednotlivá pracovní místa či zóny v kanceláři. Dalším problémem je to, že vyhovující akustické podmínky by bylo ideální zajistit zvláště pro každého zaměstnance, a tím pádem zvláště i pro každé pracovní místo. I přesto, že prvotní investiční náklady pro optimální akustické úpravy v kanceláři mohou být vysoké, díky reálnému vlivu na produktivitu zaměstnanců, který byl popsán ve výše zmíněných průzkumech a vzhledem k množství zaměstnanců v kancelářích otevřeného typu, se tato investice dlouhodobě vyplatí.

2.2 Existující požadavky a specifikace hodnocených veličin

Jednotlivé požadavky na akustický komfort v kancelářích otevřeného typu nejsou legislativně závazné. Avšak existují normy a certifikační nástroje, které dodávají možné prostředky pro hodnocení kancelářských prostorů z hlediska kvality návrhu prostorové akustiky. Nejpoužívanější v České republice jsou český certifikační nástroj SBToolCZ [20], který z hlediska prostorové akustiky uvádí požadavky na dobu dozvuku v kancelářských prostorech a norma ČSN EN ISO 3382-3 [5], která popisuje měření některých parametrů prostorové akustiky v otevřených kancelářích.

2.2.1 Certifikační systémy

Certifikační systémy pro hodnocení budov z hlediska udržitelného rozvoje také kladou požadavky na akustický komfort uživatelů. Nejrozšířenější v České republice jsou certifikace:

- britská certifikace BREEAM [21];
- americká certifikace LEED [22];
- mezinárodní certifikace WELL [23];
- česká certifikace SBToolCZ [20].

Certifikační nástroje v různých státech mají uvedené různé akustické parametry, které lze posoudit v kancelářských prostorech. Vzhledem k tomu, že seznam těchto parametrů se v jednotlivých certifikačních nástrojích liší a v českém nástroji certifikaci kvality budov SBToolCZ [19] jsou z hlediska prostorové akustiky uvedeny požadavky na dobu dozvuku, ze všech certifikačních systémů budou použity pouze limity na dobu dozvuku, pro možnost porovnání jednotlivých požadavků ve všech uvedených certifikačních systémech.

Pozn.: Různé certifikační nástroje vzhledem k odlišným národním standardům uvádí jiné označení doby dozvuku. Pro zjednodušení v předchozím textu bylo všude použito označení T [s].

2.2.1.1 Doba dozvuku

a) SBToolCZ

V českém nástroji pro certifikaci kvality budov SBToolCZ [20] se požadavky na akustický komfort pro administrativní budovy dělí na tři následující moduly:

- AKU.OA - Ochrana před hlukem;
- AKU.PA - Prostorová akustika;
- AKU.ZI - Zvuková izolace.

Modul ochrana před hlukem hodnotí splnění požadavků na maximální hodnotu ekvivalentní hladiny akustického tlaku A za osmihodinovou pracovní dobu pro ustálený a proměnný hluk. Modul zvuková izolace se zabývá splněním požadavků na váženou stavební neprůzvučnost a váženou stavební normovou hladinu akustického tlaku kročejového zvuku jednotlivých obvodových a dělicích konstrukcí.

Modul prostorová akustika nabízí možnost hodnocení doby dozvuku v kancelářích. SBToolCZ [20] určuje požadované limitní hodnoty na dobu dozvuku podle prostorů s podobnými účely definované v ČSN 73 0527 [10]. Vzhledem k tomu, že předmětem diplomové práce jsou otevřené kanceláře, které předpokládají větší plochu prostoru, z SBToolCZ [20] budou vytaženy přípustné rozmezí doby dozvuku pro kanceláře a jiné obdobné prostory o objemu alespoň 50 m³.

Horní a dolní meze přípustné doby dozvuku jsou stanoveny pro prostory určené k přednesu řeči:

$$\text{Horní mez - } T = 1,2 * T_s \quad (10)$$

$$\text{Dolní mez - } T = 0,8 * T_s \quad (11)$$

Střední mez přípustné doby dozvuku se stanoví v závislosti na objemu prostoru dle následujícího vztahu:

$$T_s = 0,27 * \log V \quad (12)$$

kde: V je objem prostoru [m³].

Dále SBTool [20] uvádí možnost hodnocení akustických úprav v kancelářích podle přítomnosti širokopásmového obkladu na stropě.

b) LEED

Americký certifikační nástroj LEED [23] mimo jiné druhy prostorů v kancelářích uvádí následující požadavek na dobu dozvuku v otevřených kancelářích bez systému pro maskování zvuku:

$$T < 0,8 \text{ s}$$

kteří platí pro kmitočty 500 Hz, 1000 Hz a 2000 Hz. Pro kmitočty 125, 250 a 4000 Hz tedy limity nejsou uvedeny.

c) BREEAM

Britský certifikační nástroj BREEAM [21] požaduje prokázání splnění požadavků na dobu dozvuku v rámci příslušných národních předpisů. V případě, že takové předpisy neobsahují požadavky na dobu dozvuku (v tomto případě na otevřené kanceláře), certifikace udává požadavek na dobu dozvuku v prostorech ve kterých je důležitá srozumitelnost řeči v závislosti na objemu místnosti. Pro objem cca 500 m³ (který nejvíc odpovídá kancelářským prostorům řešeným v této diplomové práci) je požadavek na dobu dozvuku následující:

$$T = 0,7 \text{ s}$$

Certifikace BREEAM [21] uvádí, že tento požadavek platí pro pásmo 500 Hz. (Informace o ostatních kmitočtech není na stránkách BREEAM [21] uvedena).

d) WELL

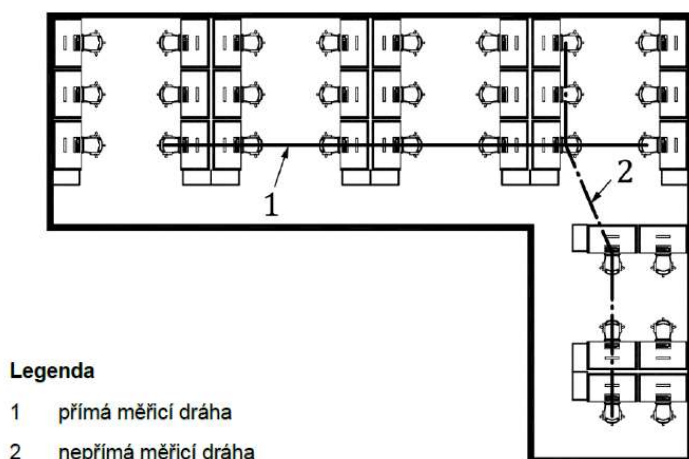
Mezinárodní Certifikační nástroj WELL [22] na svých webových stránkách udává, že pro otevřené kanceláře je maximální doba dozvuku definována jako $T = 0,5 \text{ s}$.

2.2.2 Norma ČSN EN ISO 3382-3

Parametry prostorové akustiky v kancelářích otevřeného typu a jejich měření popisuje norma ČSN EN ISO 3382-3 [5] (s aktuálním vydáním platným od prosince 2022). Norma popisuje následující jednočíselné hodnoty, které se uvádí pro hodnocení prostorové akustiky v jednotlivých zónách v kanceláři:

- Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A $D_{2,S}$ [dB];
- Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,5,4m}$ [dB];
- Vzdálenost komfortu r_c [m];
- Průměrná hodnota a směrodatná odchylka hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřících místech uvnitř akustických zón $L_{p,A,B}$ [dB];
- Index Přenosu řeči STI [-];
- Vzdálenost rušení r_d [m];
- Vzdálenost rušení r_d [m].

Celý kancelářský prostor se rozdělí na akustické zóny - oblasti, které mají podobné materiálové úpravy prostoru, geometrii a účel prostoru. V těchto zónách se určí měřicí dráhy, které představují sebou místa pobytu zaměstnanců v co nejvíce rovné přímce spojující tato jednotlivá místa.



Obr. 11: Příklad přímé a nepřímé měřicí dráhy v otevřené kanceláři, v níž se nacházejí pracovní místa a další nábytek [5]

Některé z uvedených jednočíselných veličin pro hodnocení prostorové akustiky v otevřených kancelářích se určují výpočtem pomocí naměřených parametrů, stanovených v každém místě měřicí dráhy zvolené akustické zóny. Potřebné parametry jsou následující:

- Vzdálenost ke všesměrovému zdroji zvuku bez ohledu na přepážky r [m];
- Ekvivalentní hladina neváženého akustického tlaku širokopásmového šumu vytvářením všesměrovým zdrojem zvuku $L_{p,oss}$ [dB];
- Ekvivalentní hladina neváženého akustického tlaku hluku pozadí $L_{p,B}$ [dB];
- Index Přenosu řeči STI [-].

Definice a výpočtové stanovení jednočíselných hodnot pro hodnocení prostorové akustiky v otevřených kancelářích je uvedeno v následujících podkapitolách.

2.2.2.1. Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A

Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A řeči se označuje jako $D_{2,S}$ [dB] a vyznačuje míru poklesu hladiny zvuku při zdvojnásobení vzdálenosti od všesměrového zdroje zvuku v decibelech. Tato veličina popisuje, „...jak rychle klesá hladina akustického tlaku A v otevřené kanceláři se vzrůstající vzdáleností od zdroje zvuku“. [5]

Hodnota $D_{2,S}$ [dB] se stanovuje metodou nejmenších čtverců dle následujícího vztahu:

$$D_{2,S} = -\log_{10}(2) \left(\frac{N \sum_{n=1}^N \left[L_{p,A,S,n} \log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right] - \left[\sum_{n=1}^N L_{p,A,S,n} \right] \left[\sum_{n=1}^N \log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right]}{N \sum_{n=1}^N \left[\log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right]^2 - \left[\sum_{n=1}^N \log_{10} \left(\frac{r_n}{r_0} \right) \right]^2} \right) \quad (13)$$

kde: N je celkový počet měřicích míst v rozsahu vzdálenosti od 2 m do 16 m [-];

r_n je vzdálenost od středového bodu všesměrového zdroje zvuku k n-tému měřicímu místu [m];

r_0 je konstantní referenční vzdálenost [dB]. $r_0 = 1$ m;

$L_{p,A,S,n}$ je celková hladina akustického tlaku A řeči v n-tém měřicím místě [dB].

Celková hladina akustického tlaku A řeči v n-tém měřicím místě se stanoví z jednotlivých hodnot hladin akustického tlaku normálního řečového úsilí $L_{p,S,n,i}$ [dB] v n-tem měřicím místě:

$$L_{p,A,S,n} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^z 10^{\frac{L_{p,S,n,i} + A_i}{10}} \right) \quad (14)$$

Hladina akustického tlaku normálního řečového úsilí $L_{p,S,n,i}$ [dB] v n-tem měřicím místě se stanoví dle následujícího vztahu:

$$L_{p,S,n,i} = L_{p,S,1m,ff,i} - D_{n,i} \quad (15)$$

kde: $L_{p,S,1m,ff,i}$ je je hladina akustického tlaku normální řeči (S) ve volném poli ve vzdálenosti 1 m od všesměrového zdroje hluku [dB];

$D_{n,i}$ je útlum širokopásmového šumu v uvažovaném n-tém místě ve vzdálenosti r_n [dB].

Tab. 1: Hladina neváženého akustického tlaku všesměrové řeči ve vzdálenosti 1,0 m od zdroje hluku ve volném poli a odpovídající hladina akustického výkonu řeči [5]

Parametr	Pásmo [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Hladina akustického výkonu řeči $L_{w,S}$ [dB]	60,9	65,3	69,0	63,0	55,8	49,8	44,5
Hladina akustického tlaku řeči všesměrová $L_{p,S,1m,ff}$ [dB]	49,9	54,3	58,0	52,0	44,8	38,8	33,5

Útlum širokopásmového šumu v uvažovaném n-tém místě $D_{n,i}$ se určí dvěma způsoby v závislosti na metodě měření. Konvenční metoda je založena na měřeních hladiny akustického tlaku vytvářené kalibrovaným všesměrovým zdrojem zvuku. Namísto konvenční metody lze také použít metodu impulzové odezvy. K určení impulzové odezvy může být jako signál použito sinusové rozmítání a sled maximální délky (MLS). V této kapitole budou zjednodušeně představeny obě dvě metody výpočtového stanovení útlumu $D_{n,i}$. Přesnější popis jednotlivých metod je uveden v normě ČSN EN ISO 3382-3 [5].

a) Konvenční metoda

Základem konvenční metody je měření hladiny akustického tlaku, vyzážené všesměrovým zdrojem zvuku, který produkuje širokopásmový šum. Hodnota hladiny akustického výkonu zdroje se určuje předem dle metod uvedených v ISO 3740 [8].

Kalibrovaný všesměrový zdroj hluku se umístí do zvolené polohy na konci měřicí dráhy a v N měřicích místech se změří hladina akustického tlaku. Útlum širokopásmového šumu $D_{n,i}$ [dB] v uvažovaném n -tém místě ve vzdálenosti r_n [m] se pak stanoví odečtením od hladiny akustického tlaku všesměrového zdroje zvuku, změřené ve vzdálenosti 1,0 m ve volném poli, korigované na hluk pozadí, naměřené hladiny akustického tlaku vyzařené všesměrovým zdrojem zvuku v jednotlivém n -tém místě měřené akustické zóny.

b) Alternativní metody určování míry prostorového poklesu

Alternativní metody v souladu s ISO 18233 [2] zahrnují stanovení impulzové odezvy pomocí sinusového rozmítání (sine sweep) a metody posloupnosti maximální délky (MLS).

„Při buzení se sinusovým rozmítáním se impulzová odezva získá konvolucí z naměřené odezvy na buzení. Exponenciální sinusové rozmítání, při kterém kmitočet exponenciálně vzrůstá s časem, se používá z důvodu, že podle tradiční metody odpovídá růžovému šumu.“ [5]

Tato metoda většinou vyžaduje připojení přes počítač k výpočtovému programu, který posílá na reproduktorovou soustavu budící signál. Kalibraci měřicího systému je možné provést v bezdozvukové a v dozvukové místnosti. Vzhledem k tomu, že budící signál závisí na více parametrech (například na nastaveních programu, počítače, zvukové karty, zesilovačů apod.) je vhodné provádět vícefázovou kalibraci.

Útlum širokopásmového šumu $D_{n,i}$ v uvažovaném n -tém místě se pak stanoví odečtením od předem zjištěné hladiny expozice akustickému tlaku ve vzdálenosti 10 m ve volném poli (která se určí na základě prostorově průměrné hladiny expozice akustickému tlaku a parametrů prostoru dozvukové místnosti) hladin expozice akustickému tlaku v n -tém místě měření.

V příloze C normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] jsou uvedeny obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý či špatný stav prostorové akustiky v kanceláři. Tyto hodnoty byly odvozeny ze 185 měření otevřených kanceláří a slouží jako informativní podklad pro interpretaci výsledků měření.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na špatný stav prostorové akustiky jsou:

- $D_{2,S} < 5$ dB.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý stav prostorové akustiky jsou:

- $D_{2,S} > 8$ dB.

Čím větší je hodnota míry prostorového poklesu, tím větší je útlum v hodnoceném prostoru.

2.2.2.2. Hladina akustického tlaku A v 4 m

Hladina akustického tlaku A řeči v decibelech ve vzdálenosti 4,0 m od středového bodu všesměrového zdroje zvuku $L_{p,A,S,4m}$ [dB] se určuje pomocí lineární regresní přímky z prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A řeči na základě měřicích míst v rozmezí od 2 m do 16 m od středového bodu všesměrového zdroje zvuku dle následující rovnice:

$$L_{p,A,S,4m} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{p,A,S,n} + D_{2,S} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log_2 \left(\frac{r_n}{4} \right) \quad (16)$$

kde: N je celkový počet měřicích míst v rozsahu vzdálenosti od 2 m do 16 m [-];
 $L_{p,A,S,n}$ je celková hladina akustického tlaku A řeči v n-tém měřicím místě [dB];
 $D_{2,S}$ je míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A řeči [dB];
 r_n je vzdálenost od středového bodu všesměrového zdroje zvuku k n-tému měřicímu místu [m].

Uvedený vztah je převzat z normy ČSN EN ISO 3382-3:2022 [6] vydané v červenci 2022, která ještě nebyla přeložená do českého jazyka. V aktuálním vydání ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] druhá část vzorce není vynásobená zlomkem $1/N$. Dle pomocných výpočtů bylo zjištěno, že důvěryhodné hodnoty vycházejí pouze dle výpočtu podle vydání normy ČSN EN ISO 3382-3 v červenci 2022 [6].

Z rovnice vyplývá, že $L_{p,A,S,4m}$ je závislá na celkovém počtu měřicích míst v rozsahu vzdálenosti od 2 m do 16 m, na celkové hladině akustického tlaku A řeči v n-tém měřicím místě $L_{p,A,S,n}$, na míře prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A řeči $D_{2,S}$ a na vzdálenosti od středového bodu všesměrového zdroje zvuku k n-tému měřicímu místu.

V příloze C normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] jsou uvedeny obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý či špatný stav prostorové akustiky v kanceláři. Tyto hodnoty byly odvozeny ze 185 měření otevřených kanceláří a slouží jako informativní podklad pro interpretaci výsledků měření.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na špatný stav prostorové akustiky jsou:

- $L_{p,A,S,4m} > 52$ dB.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý stav prostorové akustiky jsou:

- $L_{p,A,S,4m} < 48$ dB.

2.2.2.3. Vzdálenost komfortu

„Vzdálenost komfortu je nejkratší vzdálenost od středového bodu všesměrového zdroje zvuku, v níž je hladina akustického tlaku A řeči nižší než 45 dB. Tato veličina popisuje účinek prostorového útlumu v kanceláři, aniž by byla věnována pozornost soukromí pro hovor, hladině hluku pozadí nebo maskovacímu zvuku.“ [5] Vzdálenost komfortu se vypočítá dle následující rovnice:

$$r_c = 2 \left(\frac{L_{p,A,S,4m} - 45 + 2 D_{2,S}}{D_{2,S}} \right) \quad (17)$$

kde: $L_{p,A,S,4m}$ je hladina akustického tlaku A řeči v decibelech ve vzdálenosti 4,0 m od středového bodu všesměrového zdroje zvuku [dB];

$D_{2,S}$ je míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A řeči [dB].

Z výše uvedeného vztahu je patrné, že tato veličina je závislá na míře prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A řeči $D_{2,S}$ a na hladině akustického tlaku A řeči v decibelech ve vzdálenosti 4,0 m (viz kapitoly 3.3.2.1. a 3.3.2.2.).

V příloze C normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] jsou uvedeny obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý či špatný stav prostorové akustiky v kanceláři. Tyto hodnoty byly odvozeny ze 185 měření otevřených kanceláří a slouží jako informativní podklad pro interpretaci výsledků měření.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na špatný stav prostorové akustiky jsou:

- $r_c > 11$ m.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý stav prostorové akustiky jsou:

- $r_c < 5$ m.

2.2.2.4. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka hladiny akustického tlaku A hluku pozadí

Průměrná hodnota hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřicích místech uvnitř akustických zón $L_{p,A,B}$ [dB] se zjišťuje na pracovních místech podél měřicí dráhy během pracovních hodin za nepřítomnosti osob. Tato hodnota je hlavně zapotřebí pro stanovení indexu přenosu řeči. Pro výpočet se používá průměrná hodnota hladiny akustického tlaku A hluku pozadí jelikož prostorové kolísání hladiny hluku pozadí může zvyšovat směrové závislé rozdíly vzdálenosti rušení.

V příloze C normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] jsou uvedeny obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý či špatný stav prostorové akustiky v kanceláři. Tyto hodnoty byly odvozeny ze 185 měření otevřených kanceláří a slouží jako informativní podklad pro interpretaci výsledků měření.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na špatný stav prostorové akustiky jsou:

- $L_{p,A,B} < 35$ dB, nebo $L_{p,A,B} > 48$ dB.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý stav prostorové akustiky jsou:

- $L_{p,A,B}$ je v rozmezí od 40 dB do 45 dB.

2.2.2.5. Index přenosu řeči (STI)

Index přenosu řeči popisuje kvalitu přenosu řeči od mluvčí osoby k posluchači. STI je bezrozměrná veličina, která nabývá hodnot od 0 do 1, kde 1 reprezentuje perfektní srozumitelnost řeči a značí absolutní nesrozumitelnost. V následující tabulce jsou uvedeny nejvíc používané interpretace jednotlivých rozmezí hodnot [9] a pravděpodobnost srozumitelnosti řeči pro rodilé mluvčí [24].

Tab. 2: Hodnocení indexu srozumitelnosti řeči [24]

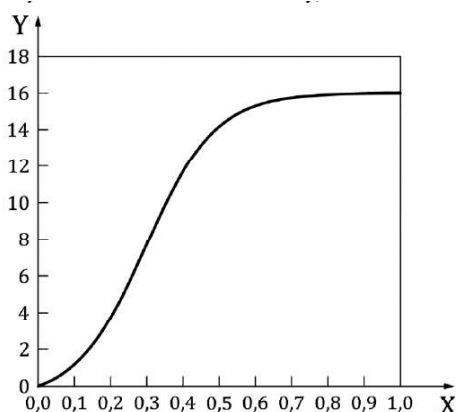
Hodnota STI	Hodnocení dle IEC 60268-16	Srozumitelnost slabik [%]	Srozumitelnost slov [%]	Srozumitelnost vět [%]
0,00 - 0,30	velmi špatný (bad)	0 - 34	0 - 67	0 - 89
0,30 - 0,45	špatný (poor)	34 - 48	67 - 78	89 - 92
0,45 - 0,60	vyhovující (fair)	48 - 67	78 - 87	92 - 95
0,60 - 0,75	dobrý (good)	67 - 90	87 - 94	95 - 96
0,75 - 1,00	výborný (excellent)	90 - 96	94 - 96	96 - 100

„V kancelářských prostorech se musí použít váhové činitele v oktákových pásmech α (váhový činitel STI) a β (činitel redundance) pro osoby mužského pohlaví.“ [5]. Rozdíl váhových činitelů je dán tím, že hladina akustického tlaku v oktákovém pásmu 125 Hz není k dispozici pro ženský hlas.

Tab. 3: Váhové činitele pro mužské pohlaví [9]

Pásmo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
α	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
β	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-

V ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] je uvedena citace modelu závislosti snížení kognitivní výkonnosti a STI. Dále v normě je zmíněno že, „pozdější prozkoumání experimentálních dat podpořilo tento model a poskytlo silný vědecký důkaz o tom, že provádění úloh se zapojením krátkodobé paměti je silně závislé na STI.“ [9]



Obr. 12: Účinek STI v případě nedůležité řeči na kognitivní výkonnost [9]

Vzhledem k tomu, že v kancelářských prostorech je naopak příznivá špatná srozumitelnost řeči na větších vzdálenostech a také v zavilostech na výzkumech popsáných v kapitole 2.1. bylo stanoveno, že nepříznivé účinky řeči v kanceláři náhlé se zmenšují když STI klesá pod 0,50. [5]

Index přenosu řeči se stanovuje v souladu s IEC 60268-16 [9], a jeho stanovení není předmětem normy ČSN EN ISO 3382-3 [5]. STI je možné změřit pomocí metody impulzové ozvěny. Postup měření je popsán v kapitole 3.3.2.

2.2.2.6. Vzdálenost rušení

„Vzdálenost rušení r_d je nejkratší vzdálenost od středového bodu všesměrového zdroje zvuku, v níž je STI nižší než 0,5. Tato veličina je prediktorem objektivního soukromí pro řeč v otevřené kanceláři a zohledňuje jak prostorový útlum tak o hladinu hluku pozadí.“ [5]

V příloze C normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] jsou uvedeny obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý či špatný stav prostorové akustiky v kanceláři. Tyto hodnoty byly odvozeny ze 185 měření otevřených kanceláří a slouží jako informativní podklad pro interpretaci výsledků měření.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na špatný stav prostorové akustiky jsou:

- $r_d > 11$ m.

Obvyklé jednočíselné hodnoty ukazující na dobrý stav prostorové akustiky jsou:

- $r_d < 5$ m.

2.2.2.7. Změny ve vydání normy ČSN EN ISO 3382-3

Aktuální vydání normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] je vydána v listopadu 2022 a nahrazuje původní vydání v českém jazyce ze srpna 2012 [7]. Oproti původnímu vydání v aktuální normě bylo provedeno několik menších a pár větších změn.

Jednou z nejvýznamnějších změn je odstranění veličiny *vzdálenost soukromí r_p* , která popisovala vzdálenost od všesměrového zdroje hluku, při které index přenosu řeči se sníží pod 0,20. V ČSN EN ISO 3382-3 [5] se uvádělo, že *„na tuto vzdálenost jsou koncentrace a soukromí pocítovány stejně jako mezi oddělenými kancelářemi.“ [5]*

Další významnou změnou je přidání nové hodnoty *vzdálenost komfortu r_c* (viz kapitola 2.2.2.3).

Dále ve vydání z roku 2022 byly upřesněny definice, podmínky měření, způsoby určování jednočíselných hodnot. Byla upřesněná výlučnost použití všesměrového zdroje zvuku při měření a bylo více popsána metoda impulzové odezvy.

Byla přidána nová příloha B a také doplněny příloha D a kapitola č. 6.

Poslední změnou je nově určování *STI* ve shodě s IEC 60268-16 [9] s využitím váhových činitelů α a β pro osoby mužského pohlaví.

3. Praktické stanovení jednotlivých parametrů prostorové akustiky

V této části diplomové práce bude popsáno zkoumaní parametrů prostorové akustiky uvedených v předchozích kapitolách pomocí měření ve dvou kancelářských prostorech otevřeného typu. Měření bylo provedeno ve dvou fázích. V první fázi byla stanovena doba dozvuku pro hodnocení požadavků uvedených v certifikačních nástrojích (označeno jako **měření A**) a v další fázi bylo provedeno měření parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] (označeno jako **měření B**). Popis jednotlivých prostorů, postupů měření a hodnocení výsledných hodnot jsou představeny v následujících podkapitolách.

3.1. Popis zkoumaných prostorů

Jedná se o dva velkoplošné otevřené kancelářské prostory. Prostory mají stejné akustické úpravy a podobný nábytek. V kancelářích je instalován celoplošný minerální podhled, nášlapnou vrstvu tvoří zátěžový koberec, stěny tvoří převážně sádkartonové konstrukce. Prostory byly v průběhu měření neobsazené. V obou prostorech jsou umístěny klimatizační jednotky vestavené do podhledové konstrukce.

Vzhledem k aktuálnímu rozšíření možnosti využití home office, budou vyhodnoceny dva stavy obsazenosti kancelářských prostorů a to se 100% obsazeností a s 50% obsazeností (tyká se pouze měření, určených ke stanovení parametrů, které se hodnotí při obsazeném prostoru).

3.1.1. Kancelář č.1.

Otevřená kancelář č. 1 je nepravidelného tvaru s podlahovou plochou 170 m² a objemem 460 m³. Všechna okna a dveře v průběhu měření byla uzavřena, okna měla roztažené žaluzie. Prostor má k dispozici 42 pracovních míst. V tomto kancelářském prostoru policové dílce na stolech dosahují výšky 1,5 m nad podlahou.



Obr. 13: Foto kanceláři č.1 [foto autora z měření]



Obr. 14: Schématický půdorys kanceláře č.1

Tab. 4: Vnitřní podmínky v prostoru kanceláře č.1 v závislosti na fázi měření

Parametr prostoru	Jednotka	Měření A	Měření B
Teplota vzduchu	°C	23	21
Vlhkost vzduchu	%	40	24
Atmosférický tlak	hPa	996	1032

3.1.2. Kancelář č.2.

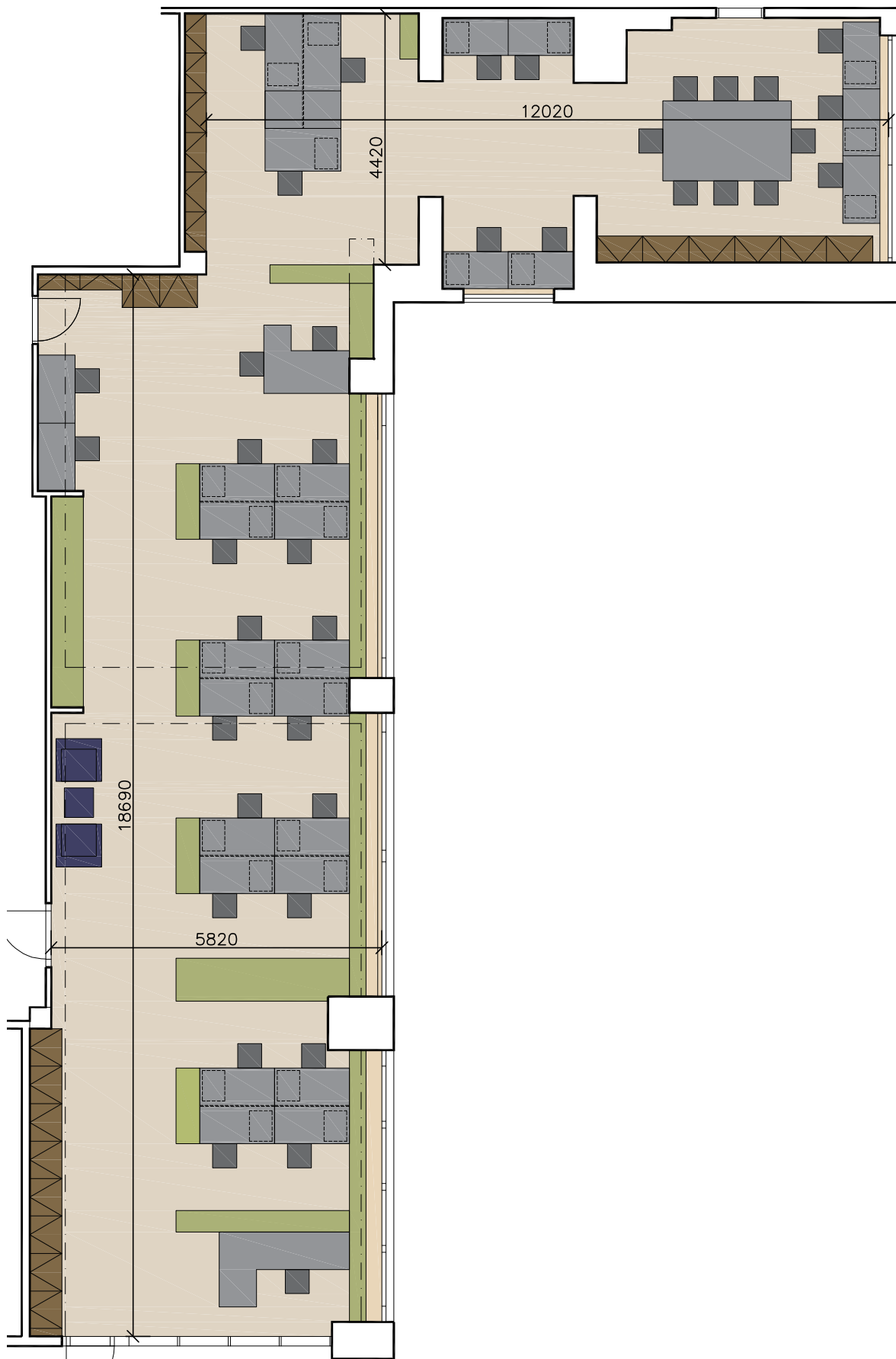
Otevřená kancelář č. 2 je nepravidelného tvaru s podlahovou plochou 210 m² a objemem 610 m³. Všechna okna a dveře v průběhu měření byla uzavřena, okna měla roztažené žaluzie. Prostor má k dispozici 30 pracovních míst. V tomto kancelářském prostoru policové dílce na stolech a větší skříně mezi pracovní místy dosahují výšky 1,15 m nad podlahou.



Obr. 15: Foto kanceláři č.2 [foto autora z měření]

Tab. 5: Vnitřní podmínky v prostoru kanceláře č.2 v závislosti na fázi měření

Parametr prostoru	Jednotka	Měření A	Měření B
Teplota vzduchu	°C	21	18
Vlhkost vzduchu	%	44	22
Atmosférický tlak	hPa	996	1033



Obr. 16: Schématický půdorys kanceláře č.2

3.2. Doba dozvuku

3.2.1. Metoda měření

Měření bylo provedeno metodou přerušovaného šumu. Základním principem této metody je vybudování prostoru širokopásmovým šumem pro zaznamenávání křivek dozvukového poklesu.

Reproduktorovou soustavou musí být vybudována dostatečná hladina akustického tlaku v prostoru, aby hladina hluku byla o požadovanou hodnotu vyšší, než hluk pozadí (pro měření doby dozvuku T_{20} , s vyhodnocovacím rozsahem 20 dB, tento rozdíl musí tvořit nejméně 35 dB).

Měření bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 3382-2 (73 0534) Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech [4].

Minimální počty míst zdrojů šumu a mikrofonů a počty poklesů v jednotlivých místech byly zvoleny dle požadavků na přesnou metodu měření [4].

V souladu se zvolenou přesnou metodou měření a s existujícími požadavky na dobu dozvuku ve zvolených certifikačních systémech kmitočtový rozsah bude zvolen od 125 Hz do 4000 Hz v oktávních pásmech.

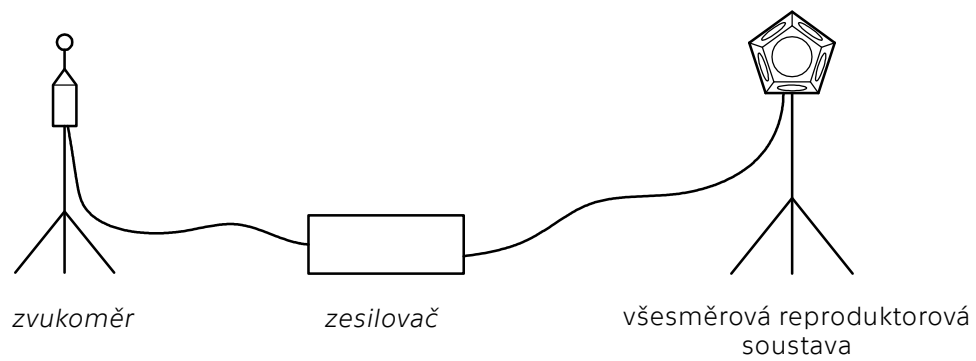
3.2.2. Postup měření

Jako zdroj šumu byla použita všesměrná reproduktorová soustava, budící signál byl vytvářen růžovým šumem. Počet míst měření byl volen v souladu s požadavky na přesnou metodu měření, byly použity 3 místa zdroje, pro každé místo zdroje 6 poloh mikrofonu, a v každé poloze mikrofonu byly měřeny dva poklesy. Místa zdroje zvuku a mikrofonu byla rozložena v celém půdorysu místnosti, v místech dle normy přípustných pro měření. Měřená byla doba dozvuku T_{20} , doba buzení signálu byla zvolena 4 s, mikrofon byl umístěn ve výšce 1,3 – 1,5 m nad podlahou kancelářských prostorů. V průběhu měření se v prostoru nacházela 1 osoba, která prováděla měření (autor diplomové práce).

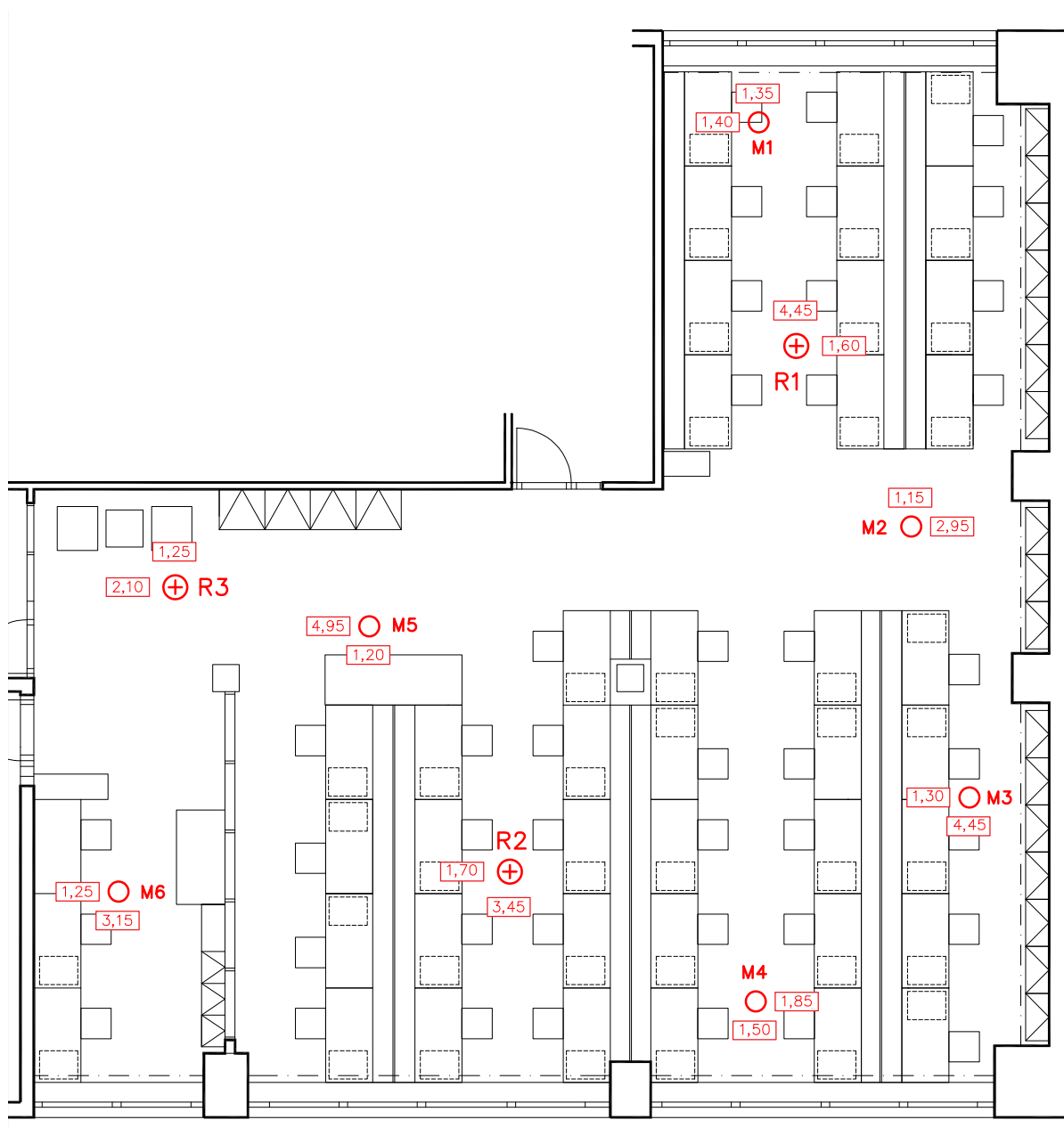
Pro měření doby dozvuku byla použita následující zařízení:

- Zvukoměr – spektrální analyzátor Norsonic Nor 140;
- Měřicí mikrofon Norsonic Nor 1225;
- Akustický kalibrátor Norsonic Nor 1251;
- Výkonový zesilovač Bittner Basic 800;
- Všesměrná reproduktorová soustava DH2 600W.

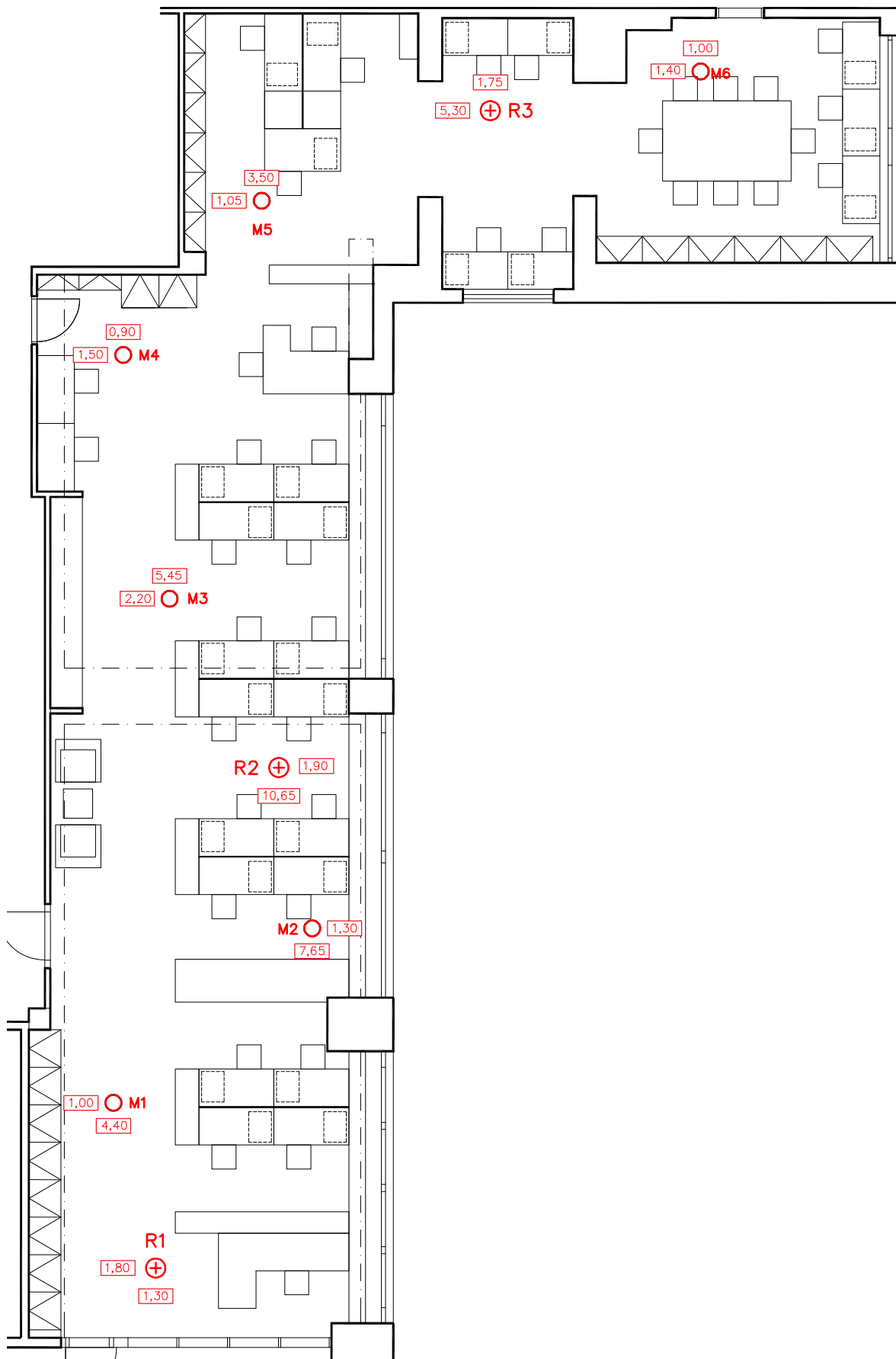
Zjednodušené schéma zapojení výše uvedených zařízení, umístění zvolených poloh zdrojů zvuku a mikrofonů v jednotlivých kancelářích je zobrazeno na následujících obrázcích.



Obr. 17: Zjednodušené schéma zapojení zařízení při měření doby dozvuku



Obr. 18: Poloha reproduktorů a míst měření doby dozvuku v kanceláři č. 1



Obr. 19: Poloha reproduktorů a míst měření doby dozvuku v kanceláři č. 1

3.2.3. Výsledky měření

3.2.3.1. Naměřené hodnoty - kancelář č.1

Náměry pro jednotlivé poklesy v oktávových kmitočtových pásmech pro otevřenou kancelář č.1 jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 6: Výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.1 - poloha reproduktoru R1

Pásmo			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
R1	M1	1	0,28	0,29	0,19	0,22	0,34	0,32
		2	0,34	0,26	0,15	0,21	0,35	0,32
		3	0,40	0,33	0,19	0,23	0,35	0,31
	M2	4	0,41	0,26	0,25	0,28	0,38	0,46
		5	0,51	0,27	0,23	0,30	0,37	0,48
		6	0,43	0,23	0,30	0,30	0,38	0,45
	M3	7	0,42	0,27	0,22	0,27	0,40	0,52
		8	0,40	0,36	0,22	0,30	0,41	0,50
		9	0,39	0,29	0,19	0,27	0,39	0,54
	M4	10	0,35	0,31	0,23	0,30	0,45	0,56
		11	0,40	0,25	0,22	0,36	0,46	0,55
		12	0,44	0,38	0,22	0,29	0,43	0,53
	M5	13	0,39	0,27	0,27	0,35	0,52	0,55
		14	0,47	0,39	0,26	0,38	0,49	0,57
		15	0,39	0,37	0,28	0,39	0,50	0,59
	M6	16	0,86	0,38	0,28	0,43	0,56	0,70
		17	0,82	0,49	0,23	0,39	0,53	0,69
		18	0,57	0,44	0,27	0,42	0,55	0,67

Tab. 7: Výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.1 - poloha reproduktoru R2

Pásmo			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
R2	M1	19	0,46	0,33	0,26	0,31	0,45	0,59
		20	0,37	0,31	0,30	0,32	0,47	0,56
		21	0,57	0,35	0,24	0,34	0,48	0,59
	M2	22	0,45	0,25	0,26	0,35	0,48	0,53
		23	0,40	0,39	0,25	0,39	0,51	0,57
		24	0,30	0,24	0,23	0,34	0,51	0,59
	M3	25	0,42	0,46	0,25	0,34	0,45	0,53
		26	0,39	0,31	0,26	0,37	0,48	0,59
		27	0,50	0,45	0,22	0,32	0,52	0,61
	M4	28	0,50	0,30	0,22	0,35	0,47	0,51
		29	0,59	0,30	0,30	0,34	0,51	0,53
		30	0,41	0,37	0,25	0,36	0,45	0,53
	M5	31	0,36	0,35	0,24	0,30	0,43	0,52
		32	0,16	0,31	0,26	0,32	0,42	0,53
		33	0,37	0,35	0,22	0,28	0,45	0,54

Pásmo		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
R2	M6	34	0,64	0,29	0,22	0,38	0,56	0,70
		35	0,56	0,34	0,33	0,80	0,72	0,71
		36	0,51	0,34	0,41	0,49	0,58	0,68

Tab. 8: Výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.1 - poloha reproduktoru R3

Pásmo		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
R3	M1	37	0,45	0,35	0,28	0,42	0,55	0,70
		38	0,39	0,41	0,32	0,41	0,57	0,70
		39	0,93	0,40	0,27	0,40	0,57	0,70
	M2	40	0,34	0,34	0,24	0,35	0,52	0,72
		41	0,39	0,46	0,27	0,37	0,56	0,73
		42	0,38	0,34	0,27	0,36	0,49	0,71
	M3	43	0,39	0,34	0,28	0,42	0,57	0,67
		44	0,49	0,27	0,25	0,46	0,60	0,68
		45	0,39	0,23	0,29	0,44	0,59	0,72
	M4	46	0,45	0,35	0,28	0,39	0,56	0,64
		47	0,49	0,36	0,30	0,36	0,60	0,64
		48	0,43	0,47	0,24	0,34	0,53	0,65
	M5	49	0,45	0,33	0,19	0,32	0,47	0,50
		50	0,37	0,23	0,15	0,28	0,43	0,56
		51	0,39	0,25	0,21	0,29	0,46	0,51
	M6	52	0,23	0,28	0,22	0,34	0,52	0,68
		53	0,36	0,35	0,19	0,38	0,51	0,66
		54	0,41	0,29	0,20	0,38	0,48	0,65

Průměrné výsledky měření v oktávoých kmitočtových pásmech jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 9: Průměrné výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.1

Pásmo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Průměrné hodnoty T [s]	0,44	0,33	0,25	0,35	0,49	0,58

3.2.3.2. Naměřené hodnoty - kancelář č.2

Náměry pro jednotlivé poklasy a průměrné výsledky měření v oktávoých kmitočtových pásmech pro otevřenou kancelář č.2 jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 10: Výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.2 - poloha reproduktoru R1

Pásmo		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
R1	M1	1	0,35	0,30	0,23	0,32	0,45	0,50
		2	0,36	0,32	0,30	0,33	0,50	0,55
		3	0,39	0,32	0,24	0,34	0,51	0,55
	M2	4	0,36	0,38	0,32	0,40	0,50	0,62

Pásmo			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
R1	M2	5	0,36	0,35	0,26	0,36	0,55	0,57
		6	0,38	0,36	0,26	0,37	0,49	0,63
	M3	7	0,45	0,36	0,33	0,40	0,59	0,65
		8	0,36	0,39	0,31	0,40	0,58	0,66
		9	0,28	0,36	0,30	0,42	0,57	0,66
	M4	10	0,58	0,35	0,31	0,42	0,57	0,67
		11	0,56	0,49	0,36	0,40	0,58	0,68
		12	0,43	0,38	0,30	0,42	0,56	0,66
	M5	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-
	M6	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-

Tab. 11: Výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.2 - poloha reproduktoru R2

Pásmo			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
R2	M1	13	0,31	0,31	0,27	0,37	0,55	0,61
		14	0,37	0,30	0,28	0,43	0,57	0,65
		15	0,45	0,37	0,30	0,37	0,55	0,62
	M2	16	0,26	0,36	0,26	0,43	0,50	0,56
		17	0,34	0,36	0,23	0,40	0,53	0,54
		18	0,24	0,40	0,22	0,35	0,53	0,54
	M3	19	0,36	0,28	0,27	0,36	0,51	0,54
		20	0,36	0,20	0,23	0,35	0,45	0,54
		21	0,33	0,24	0,25	0,38	0,45	0,57
	M4	22	0,29	0,25	0,30	0,38	0,56	0,68
		23	0,36	0,33	0,33	0,36	0,59	0,65
		24	0,35	0,27	0,26	0,36	0,54	0,67
	M5	25	0,43	0,23	0,24	0,43	0,61	0,74
		26	0,46	0,27	0,30	0,45	0,58	0,73
		27	0,40	0,31	0,26	0,42	0,63	0,74
	M6	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-

Tab. 12: Výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.2 - poloha reproduktoru R3

Pásmo			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
R3	M1	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-
	M2	28	0,48	0,47	0,29	0,49	0,61	0,68

Pásmo		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
R3	M2	29	0,47	0,48	0,31	0,42	0,58	0,63
		30	0,71	0,50	0,38	0,48	0,60	0,63
	M3	31	0,44	0,27	0,22	0,43	0,61	0,66
		32	0,30	0,36	0,28	0,42	0,58	0,64
		33	0,39	0,3	0,23	0,41	0,62	0,64
	M4	34	0,50	0,24	0,24	0,38	0,56	0,61
		35	0,44	0,27	0,23	0,38	0,54	0,59
		36	0,34	0,25	0,33	0,40	0,54	0,60
	M5	37	0,29	0,18	0,20	0,30	0,38	0,42
		38	0,28	0,25	0,28	0,27	0,35	0,43
		39	0,32	0,24	0,23	0,27	0,36	0,41
	M6	40	0,46	0,31	0,23	0,33	0,40	0,46
		41	0,36	0,33	0,22	0,29	0,42	0,47
		42	0,36	0,33	0,23	0,33	0,40	0,47

Počet míst měření v kanceláři č. 2 byl redukován vzhledem ke geometrii prostoru a větší vzdálenosti mezi polohami mikrofону a reproduktoru, umístěných v celé ploše prostoru. Pro vyhodnocení byla použita 3 místa zdroje šumu, a pro každé místo zdroje 4 až 5 poloh mikrofону. Dále v každé poloze mikrofону byly měřeny tři poklesy. Výše uvedený počet míst měření a 14 kombinací zdroj - mikrofón splňují požadavky na přesnou metodu měření metodou přerušovaného šumu dle ČSN EN ISO 3382-2 [4].

Průměrné výsledky měření v oktávních kmitočtových pásmech jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 13: Průměrné výsledky měření doby dozvuku v kanceláři č.2

Pásmo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Průměrné hodnoty T [s]	0,39	0,32	0,27	0,38	0,53	0,60

3.2.3.3. Nejistota měření

Nejistota měření $\sigma(T_{20})$ [dB] pro metodu přerušovaného šumu je dle odstavce 7 v normě ČSN EN ISO 3382-2 [5] vyjádřena vztahem:

$$\sigma(T_{20}) = 0,88 T_{20} \sqrt{\frac{1 + (1,90/n)}{N B T_{20}}} \quad (18)$$

kde: B je šířka pásma [Hz];

n je počet poklesů změřených v každém místě [-];

N je počet nezávislých měření (kombinací míst zdroje a příjmu) [-];

T_{20} je doba dozvuku v sekundách založená na vyhodnocovacím rozsahu 20 dB [s].

Pro oktávný filtr šířka pásma B se dopočítá následujícím způsobem:

$$B = 0,71 f_s \quad (19)$$

kde: f_s je střední kmitočet pásma filtru [Hz].

Podle těchto vztahů byly stanoveny hodnoty směrodatné odchyly $\sigma(T_{20})$ uvedené v následující tabulce. Rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k = 2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95%.

Tab. 14: Směrodatná odchylna měření v oktávních pásmech

	Pásmo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Kancelář č.1	$\sigma(T_{20})$	0,019	0,011	0,007	0,006	0,005	0,004
	U	0,037	0,023	0,014	0,012	0,010	0,008
Kancelář č.2	$\sigma(T_{20})$	0,019	0,012	0,008	0,007	0,006	0,004
	U	0,038	0,025	0,016	0,013	0,011	0,008

3.2.3.4. Dopočet na obsazený stav

Hodnocení doby dozvuku se vyhodnotí v obsazeném stavu. Uvažované hodnoty zvolených činitelů pohltivosti α_s [-] [12] jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 15: Parametry pohltivosti osob [12]

Pásmo	Činitel zvukové pohltivosti α_s v oktávních pásmech [Hz]					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Čalouněné křeslo obsazené zvuková pohltivost v m ² na jeden kus	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40

Pro hodnocení je uvažována 100 % a 50 % obsazenost prostorů, tj. 42 a 21 osob v kanceláři č.1 a 30 a 15 osob v kanceláři č. 2. Dopočet doby dozvuku pro obsazený prostor je proveden dle ČSN EN 12354-6 [1] podle následujícího vzorce:

$$T = \frac{55,3}{c_0} \frac{V(1 - \psi)}{A} = 0,16 \frac{V(1 - \psi)}{A} \quad (20)$$

kde: c_0 rychlost zvuku ve vzduchu [m s^{-1}], $c_0 = 345,6 \text{ m s}^{-1}$ [1];

V objem prázdné místnosti [m^3];

ψ poměrný objem objektů [-];

A celková ekvivalentní pohltivá plocha prostoru [m^2].

Tab. 16: Doba dozvuku obsazené kanceláře č.1

Pásmo	Střední kmitočty oktávného pásma					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Výsledky měření T [s]	0,44	0,33	0,25	0,35	0,49	0,58
Dopočetná doba dozvuku pro 50% obsazený prostor T [s]	0,43	0,32	0,24	0,33	0,46	0,54
Dopočetná doba dozvuku pro 100% obsazený prostor T [s]	0,41	0,31	0,24	0,32	0,44	0,51

Tab. 16: Doba dozvuku obsazené kanceláře č.2

Pásmo	Střední kmitočty oktávového pásma					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Výsledky měření T [s]	0,39	0,32	0,27	0,38	0,53	0,60
Dopočetná doba dozvuku pro 50% obsazený prostor T [s]	0,38	0,32	0,27	0,37	0,51	0,58
Dopočetná doba dozvuku pro 100% obsazený prostor T [s]	0,38	0,31	0,26	0,36	0,49	0,56

3.2.5. Hodnocení stávajícího stavu

3.2.5.1. Hodnocení výsledků měření - kancelář č.1

V následující tabulce je provedeno vyhodnocení doby dozvuku v kanceláři č. 1 ve vztahu k hodnotám požadovaného rozmezí dle kapitoly 2.2.1.1. pro různé certifikační nástroje.

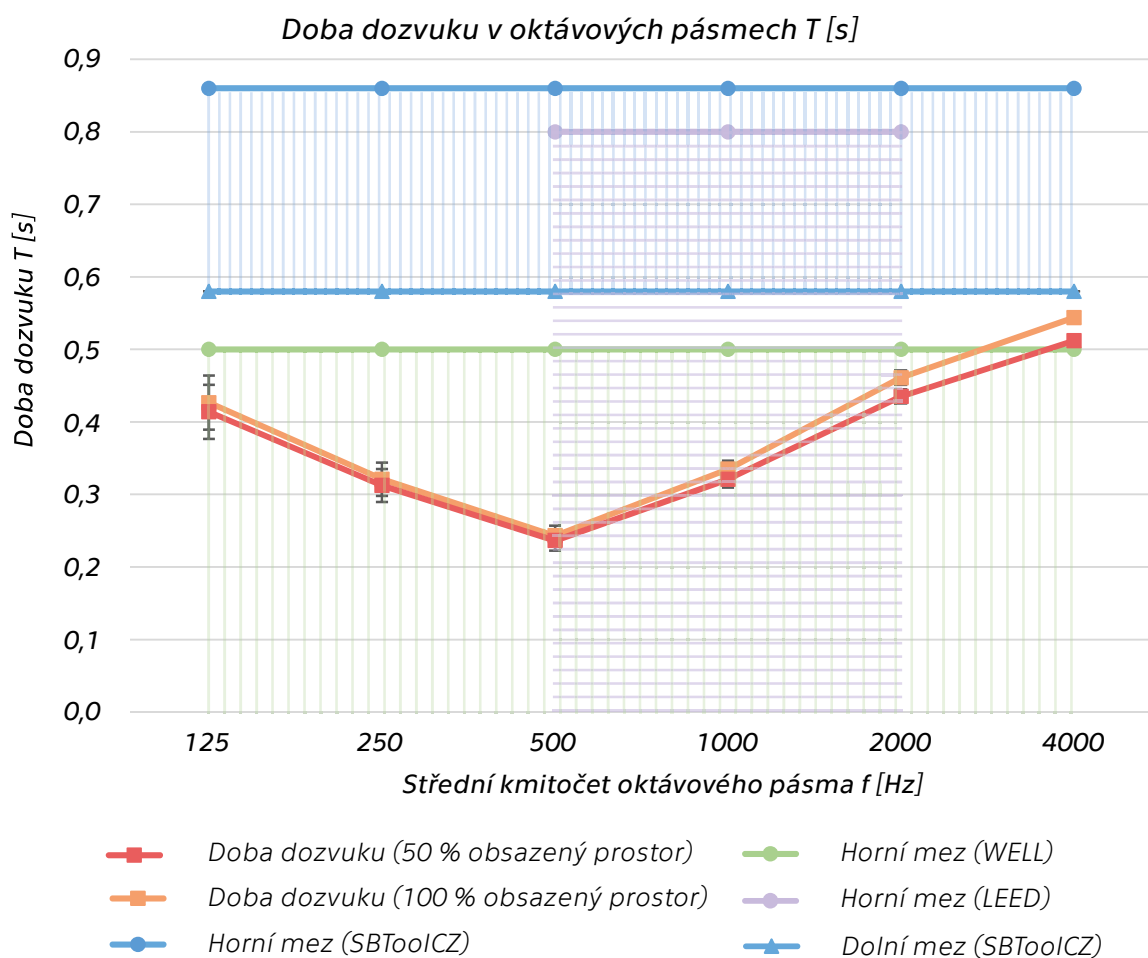
Tab. 17: Porovnání výsledků měření doby dozvuku s požadavky v kanceláři č.1

Pásmo		Střední kmitočty oktávového pásma						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Dopočetná doba dozvuku pro 50% obsazený prostor T [s]		0,43	0,32	0,24	0,33	0,46	0,54	
Dopočetná doba dozvuku pro 100% obsazený prostor T [s]		0,41	0,31	0,24	0,32	0,44	0,51	
Nejistota $\sigma(T_{20})$ [s]		0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Hodnocení dle SBTtoolCZ	Horní mez T_h [s]	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	
	Dolní mez T_d [s]	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	
	Hodnocení	obsazenost 50%	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí
		obsazenost 100%	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí
Hodnocení dle BREEAM	T [s]	-	-	0,70	-	-	-	
	Hodnocení	obsazenost 50%	-	-	Hodnota je menší o 0,46 s	-	-	
		obsazenost 100%	-	-		-	-	
Hodnocení dle LEED	Horní mez T_h [s]	-	-	0,80	0,80	0,80	-	
	Dolní mez T_d [s]	Metodika neuvádí						
	Hodnocení	obsazenost 50%	-	-	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	-
		obsazenost 100%	-	-	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	-

Pásmo		Střední kmitočty oktávového pásma						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Hodnocení dle WELL	Horní mez T_h [s]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	Dolní mez T_d [s]	Metodika neuvádí						
	Hodnocení	obsazenost 50%	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	Hraniční
		obsazenost 100%	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	Mimo rozmezí

Stanovená doba dozvuku v kanceláři č.1 splňuje požadavky uvedené v certifikačních nástrojích LEED [23] a BREEAM [21] ve všech oktávových pásmech. Hodnoty uvedené v certifikaci WELL [22] jsou splněny ve většině oktávových pásem, kromě oktávového pásma 4000 Hz pro 100% obsazenost prostoru. Získané hodnoty doby dozvuku v žádném z oktávových pásem nesplňují požadavky stanovené v certifikaci SBToolCZ [20] v obou předemtných kancelářských prostorech. Z výsledků je také patrné, že v tomto případě kvůli velkému rozměru prostoru a jeho vysoké pohltivosti procento obsazenosti kanceláři má téměř zanedbatelný vliv na výsledné hodnoty.

Porovnání výsledků měření s požadovanými rozmezími je pro názornost uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 20: Porovnání výsledků měření doby dozvuku s požadavky v kanceláři č.1

3.2.5.2 Hodnocení výsledků měření - kancelář č.2

V následující tabulce je provedeno vyhodnocení doby dozvuku v kanceláři č. 2 ve vztahu k hodnotám požadovaného rozmezí dle kapitoly 2.2.1.1. pro různé certifikační nástroje.

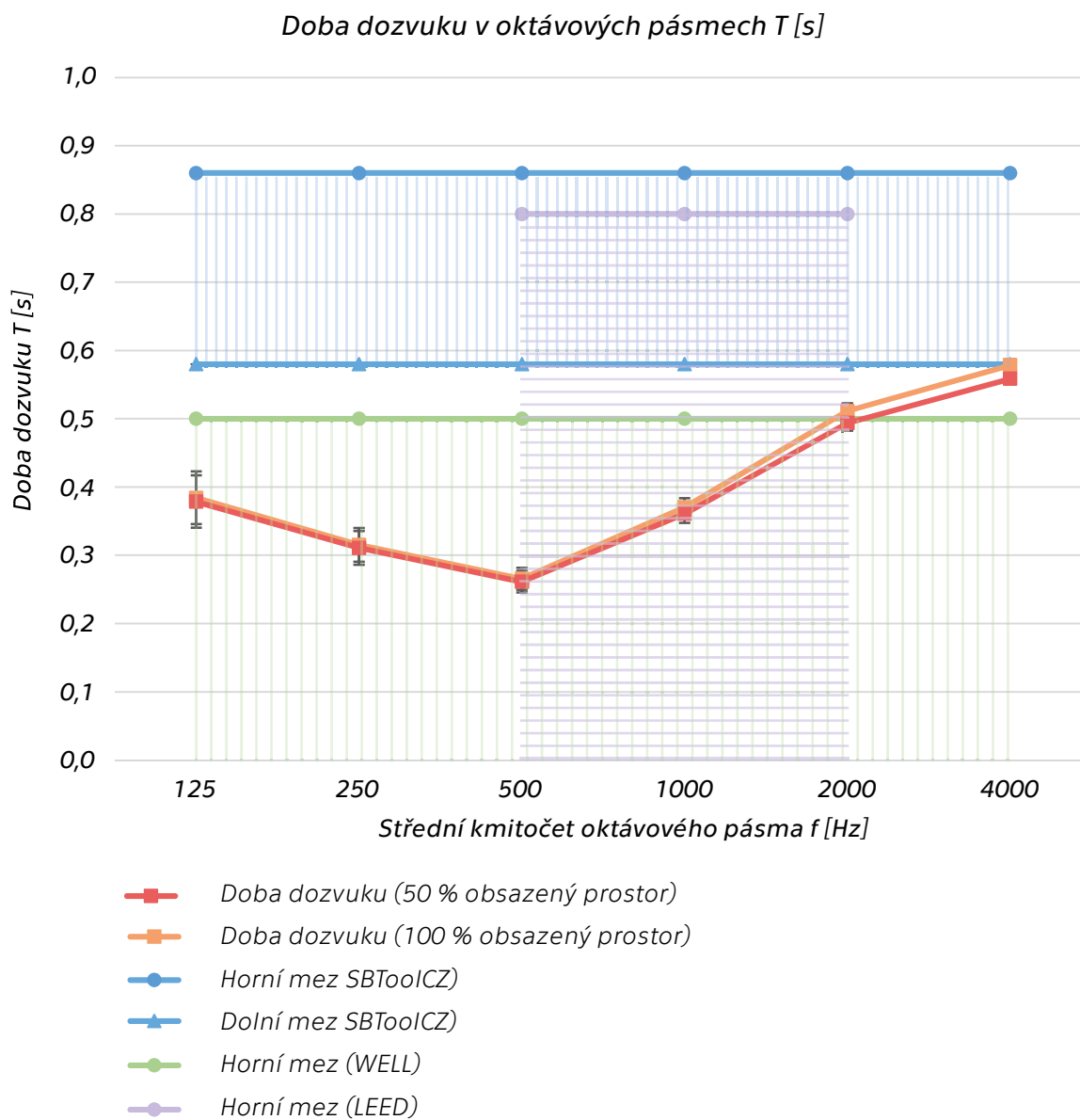
Tab. 18: Porovnání výsledků měření doby dozvuku s požadavky v kanceláři č.2

Pásmo		Střední kmitočty oktávového pásma						
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
Dopočtená doba dozvuku pro 50% obsazený prostor T [s]		0,38	0,32	0,27	0,37	0,51	0,58	
Dopočtená doba dozvuku pro 100% obsazený prostor T [s]		0,38	0,31	0,26	0,36	0,49	0,56	
Nejistota $\sigma(T_{20})$ [s]		0,02	0,01	0,01	0,01	0,001	0,01	
Hodnocení dle SBTToolCZ	Horní mez T_h [s]	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
	Dolní mez T_d [s]	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	
	Hodnocení	obsazenost 50%	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí
		obsazenost 100%	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí	Mimo rozmezí
Hodnocení dle BREEAM	T [s]	-	-	0,70	-	-	-	
	Hodnocení	obsazenost 50%	-	-	Hodnota je menší o 0,46 s	-	-	-
		obsazenost 100%	-	-		-	-	-
Hodnocení dle LEED	Horní mez T_h [s]	-	-	0,80	0,80	0,80	-	
	Dolní mez T_d [s]	Metodika neuvádí						
	Hodnocení	obsazenost 50%	-	-	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	-
		obsazenost 100%	-	-	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	-
Hodnocení dle WELL	Horní mez T_h [s]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	Dolní mez T_d [s]	Metodika neuvádí						
	Hodnocení	obsazenost 50%	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	Hraniční	Mimo rozmezí
		obsazenost 100%	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	V rozmezí	Mimo rozmezí

Stanovená doba dozvuku v kanceláři č.2 splňuje požadavky uvedené v certifikačních nástrojích LEED [23] a BREEAM [21] ve všech oktávových pásmech. Hodnoty uvedené v certifikaci WELL [22] jsou splněny ve většině oktávových pásem, kromě oktávového pásma 4000 Hz. Získané hodnoty doby dozvuku v žádném z oktávových pásem nesplňují požadavky stanovené v SBTToolCZ [20] v obou předmětných kancelářských prostorech.

Z výsledků je také patrné, že v tomto případě kvůli velkému rozměru prostoru a jeho vysoké pohltivosti procento obsazenosti kanceláří má téměř zanedbatelný vliv na výsledné hodnoty doby dozvuku.

Porovnání výsledků měření s požadovanými rozmezími je pro názornost uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 21: Porovnání výsledků měření doby dozvuku s požadavky v kanceláři č.2

3.3. Parametry dle ČSN EN ISO 3382-3

3.3.1. Metoda měření

Měření bylo provedeno metodou integrované impulzové odezvy. Základním principem této metody je vybuzení prostoru speciálním signálem, v tomto případě sinusovým rozmítáním (sine sweep), pomocí kterého bude zjištěná impulzová odezva prostoru. „*Matematicky se předpokládá, že impuls obsahuje všechny frekvence, proto impulsní odezva obsahuje úplné chování systému. Při sinusovém rozmítání jsou frekvence přehrávány vždy po jednom sinusovém tónu a ODEON to pak převádí na impulsní odezvu.*“ [25]

Měření bylo provedeno pomocí výpočtového software Odeon Auditorium [30]. Výpočtový program obsahuje integrovaný měřicí systém, který umožňuje změřit impulzovou odezvu a z ní dopočítat potřebné akustické parametry. V programu je integrován výpočet hodnot dle ČSN EN ISO 3382-3 [7]. Poslední verze programu byla vydána v prosinci 2021, z čehož vyplývá, že v Odeonu [30] ještě není zahrnutá nová veličina vzdálenost komfortu a jinak se počítá vzdálenost rušení. Výpočet ostatních parametrů je aktuální dle ČSN EN ISO 3382-3 [5].

Minimální počty míst zdroje šumu a mikrofону a počty poklesů v jednotlivých místech byly zvoleny dle požadavků ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5]. V obou zvolených kancelářích otevřeného typu jsou v celém prostoru stejné akustické a materiálové úpravy a stejný účel prostoru. Z tohoto důvodu každá kancelář představuje sebou jednu akustickou zónu. V každém prostoru tedy byly zvoleny dvě měřicí dráhy. Přesnější popis umístění mikrofónů a reproduktorové soustavy je popsán v následující podkapitole.

V souladu s ČSN EN ISO 3382-3 [5] kmitočtový rozsah byl zvolen od 125 Hz do 8000 Hz v oktávních pásmech.

3.3.2. Postup měření

Měření bylo provedeno metodou impulzové odezvy pomocí výpočtového programu Odeon [30]. Jako zdroj byla použita všesměrná reproduktorová soustava.

Počet míst měření byl volen v souladu s požadavky ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5]. V každém kancelářském prostoru byly zvoleny dvě co nejdelší měřicí dráhy. Všesměrový zdroj zvuku byl umístěn vždycky na jednom z konců měřicí dráhy v místech s předpokládaným největším vlivem na okolí (vzhledem k geometrii prostorů). Měřicí dráhy obsahují 6, 7, 8 nebo 10 bodů, které jsou umístěny na pracovních místech zaměstnanců. Mikrofon a reproduktorová soustava byly umístěny ve výšce 1,2 m nad podlahou kancelářských prostorů.

Před měřením parametrů prostorové akustiky bylo provedeno kalibrační měření pomocí výpočtového programu Odeon [30]. Kalibrační měření bylo provedeno v téměř prázdné místnosti s odrazivými vnitřními dělicími konstrukcemi. Pro měření byly použity 2 polohy reproduktoru a 3 polohy měřicího mikrofónu. V místnosti byla také změřena impulzová odezva ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje zvuku. Měření impulzové

odezvy ve stejné vzdálenosti bylo pak za účelem kalibrace provedeno i v předemných kancelářích. Jedná se postup při dvoukrokové kalibraci pomocí výpočtového programu Odeon [30]. Postup kalibrace a měření byl proveden dle pokynů v návodech z webových stránek software Odeon [26] [27].

V průběhu měření se v prostorech nacházela 1 osoba, která prováděla měření (autor diplomové práce).



Obr. 22: Foto z měření [foto autora z měření]

V ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] je uvedeno, že v průběhu měření zařízení pro vytápění, větrání a klimatizaci musí pracovat se stejným výkonem jako během typických pracovních hodin. Ve zvolených kancelářských prostorech je umístěno několik klimatizačních jednotek. Typickým pracovním provozem těchto jednotek je chlazení prostorů v letní době na teplotu průměrně 20 °C. V zimní době klimatizační jednotky nejsou za obvyklého provozu využívány.

V listopadu 2022 se prováděla první fáze měření, která zahrnovala měření doby dozvuku a zkušební měření některých parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5]. Jedním z těchto parametrů byla změřená hladina hluku akustického tlaku pozadí při typickém letním provozu klimatizačních jednotek v kanceláři č. 1 na první měřicí drazě. Provoz čtyř klimatizačních jednotek v kanceláři č. 1 byl nastaven na prostřední výkonný stupeň s chlazením vzduchu na teplotu 20 °C. Tyto hodnoty budou dodatečně využity v kapitole 4.3. jako orientační hodnota hladiny akustického tlaku A pozadí pro výpočtové stanovení parametrů prostorové akustiky otevřených kanceláří ve výpočtovém software Odeon [30].

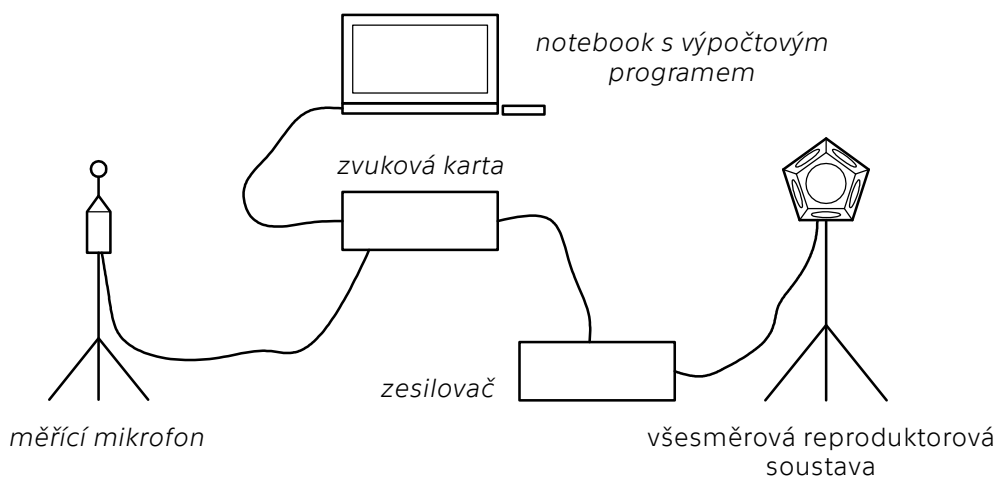
Při provedení druhé fáze měření v prosinci 2022 klimatizační jednotky v obou kancelářích nebyly funkční. Zastavení provozu jednotek způsobil výpadek, který zasáhl

větší množství prostorů. Ke dni odevzdání diplomové práce provoz jednotek pořád nebyl obnoven. Z tohoto důvodu měření bylo provedeno pouze pro typický zimní stav, kdy klimatizační jednotky nejsou využívány.

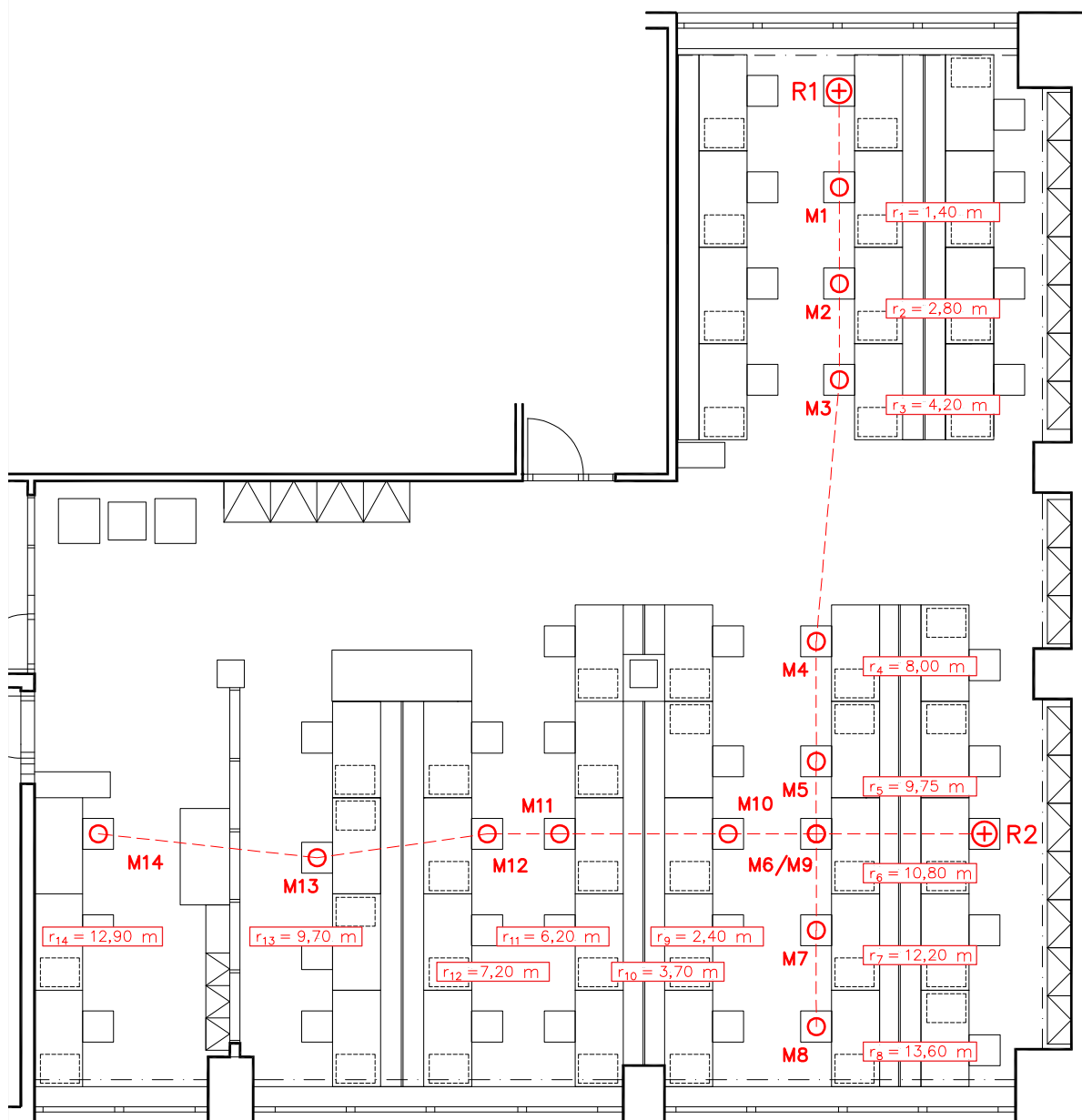
Pro měření parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] byla použita následující zařízení:

- Zvukoměr – spektrální analyzátor NTI Audio - XL2;
- Měřicí mikrofon NTI Audio - MC230;
- Akustický kalibrátor Larson-davis – CAL 200;
- Výkonový zesilovač Bittner Basic 800;
- Všesměrová reproduktorová soustava DH2 600W;
- zvuková karta Focusrite Solo 3d;
- notebook s výpočtovým programem Odeon [30].

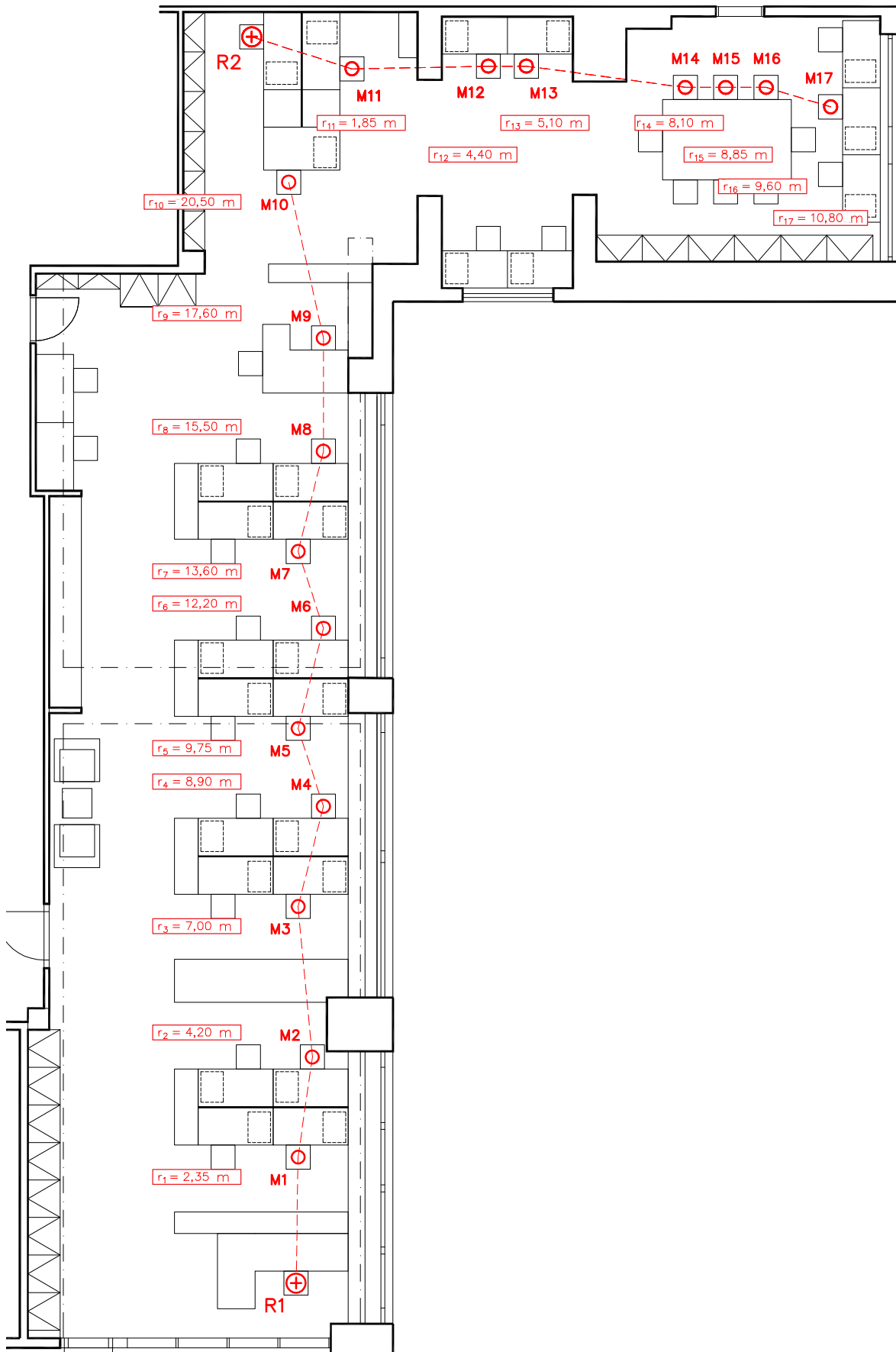
Zjednodušené schéma zapojení výše uvedených zařízení, umístění zvolených poloh zdroje hluku a mikrofonu v jednotlivých kancelářích je zobrazeno na následujících obrázcích.



Obr. 23: Zjednodušené schéma zapojení zařízení při měření parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN 3382:3 [5]



Obr. 24: Poloha reproduktorů a míst měření parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382:3 [5] v kanceláři č.1



Obr. 25: Poloha reproduktorů a míst měření parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382:3 [5] v kanceláři č.2

3.3.3 Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A

3.3.3.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu

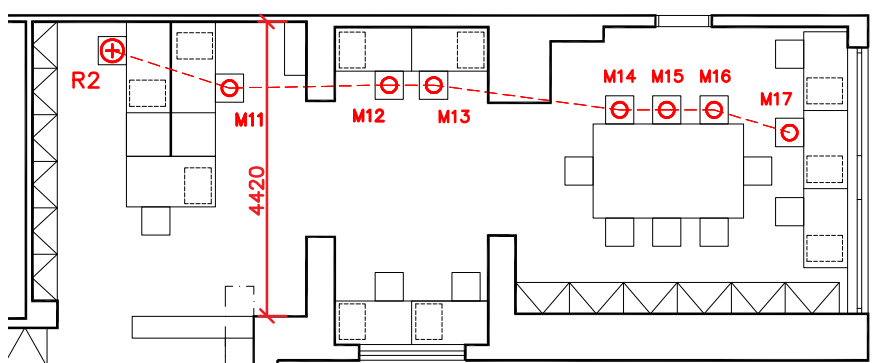
Výsledky dopočtu z měření míry prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A $D_{2,5}$ [dB] pro jednotlivé měřicí dráhy ve zkoumaných kancelářích jsou představeny v následující tabulce. V tabulce je také uvedeno hodnocení zjištěných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5].

Tab. 19: Výsledky měření a hodnocení míry prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A $D_{2,5}$ [dB] zjištěná pomocí měření	7,7	8,7	6,7	6,1
Obyčklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$D_{2,5} < 5$ dB (špatný stav prostorové akustiky) $D_{2,5} > 8$ dB (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky

Z výsledků je patrné, že většina hodnot ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky anebo se k těmto hodnotám blíží.

Jelikož větší hodnota míry prostorového poklesu představuje větší útlum v prostoru, nízká hodnota míry prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A na druhé měřicí dráze v kanceláři č. 2 může být způsobena geometrií této části prostoru. Jak je patrné z následujícího obrázku, tato část kanceláře je mnohem užší a obsahuje víc odrazivých svislých ploch, což nepříznivě ovlivňuje rychlost poklesu hladiny akustického tlaku.



Obr. 26: Schématické zobrazení měřicí dráhy 2 v kanceláři č. 2

3.3.4. Hladina akustického tlaku A ve 4 m

3.3.4.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu

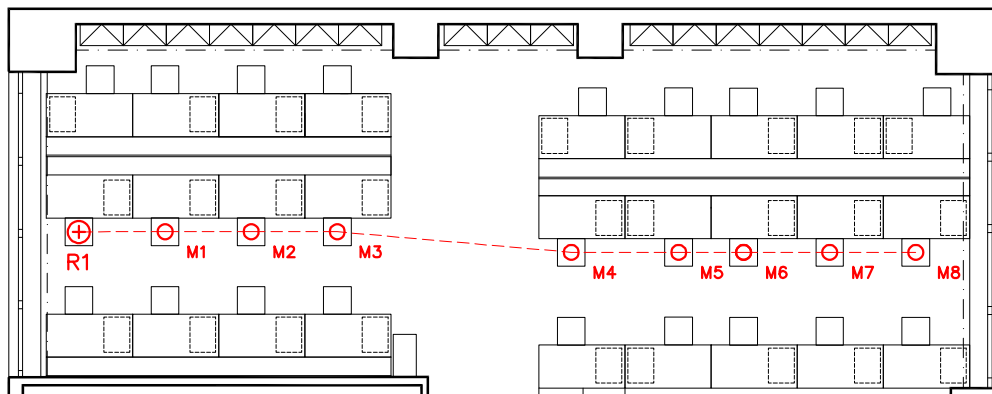
Výsledky dopočtu z měření hladiny akustického tlaku A řeči v decibelech ve vzdálenosti 4,0 m od středového bodu všesměrového zdroje zvuku $L_{p,A,S,4m}$ [dB] pro jednotlivé měřicí dráhy ve zkoumaných kancelářích jsou představeny v následující tabulce. V tabulce je také uvedeno hodnocení zjištěných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3 [5].

Tab. 20: Výsledky měření a hodnocení hladiny akustického tlaku A ve vzdálenosti 4 m

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,S,4m}$ [dB] zjištěna pomocí měření	52,8	45,8	49,2	48,4
Obyčklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$L_{p,A,S,4m} > 52$ dB (špatný stav prostorové akustiky) $L_{p,A,S,4m} < 48$ dB (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky

Z výsledků je patrné, že většina hodnot ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky anebo se k těmto hodnotám blíží.

Vysoká hodnota hladiny akustického tlaku A řeči v decibelech ve vzdálenosti 4,0 m od středového bodu všesměrového zdroje zvuku na první měřicí dráze v kanceláři č. 1 může být hlavně způsobena absencí jakýchkoliv svislých překážek v této části prostoru (jak oproti jiným měřicím drahám, tak i při individuálním hodnocení).



Obr. 27: Schématické zobrazení měřicí dráhy 1 v kanceláři č. 1

3.3.5. Vzdálenost komfortu

3.3.5.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu

Vzdálenost komfortu r_c [m] představuje nejkratší vzdálenost od středového bodu všesměrového zdroje zvuku, v níž je hladina akustického tlaku A řeči nižší než 45 dB. Vzhledem k tomu, že poslední verze používaného výpočtového programu Odeon [30] byla vydána v prosinci 2021, program ještě nezahrnuje novou veličinu r_c . Z tohoto důvodu vzdálenost komfortu byla dopočtena dle vzorce v kapitole 2.2.2.3. pomocí měření stanovených hodnot míry prostorového poklesu řeči a hladiny akustického tlaku ve 4 m.

Výsledky výpočtu vzdálenosti komfortu pro jednotlivé měřicí dráhy ve zkoumaných kancelářích jsou představeny v následující tabulce. V tabulce je také uvedeno hodnocení zjištěných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3 [5].

Tab. 21: Výsledky měření a hodnocení vzdálenosti komfortu

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Vzdálenosti komfortu r_c [m] zjištěná pomocí měření	8,1	4,3	6,2	6,1
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$r_c > 11$ m (špatný stav prostorové akustiky) $r_c < 5$ m (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky

Z výsledků je patrné, že většina hodnot ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky anebo se k těmto hodnotám blíží.

Větší hodnota vzdálenosti komfortu na první měřicí dráze v kanceláři č. 1 může být stejně jako vysoká hodnota hladiny akustického tlaku A ve vzdálenosti 4 m způsobena absencí jakýchkoliv svislých překážek v této části prostoru (viz obrázek č. 27).

3.3.6. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřicích místech uvnitř akustických zón

3.3.6.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu

Výsledky výpočtu průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřicích místech uvnitř akustických zón $L_{p,A,B}$ [dB] pro jednotlivé měřicí dráhy ve zkoumaných kancelářích na základě změřených hodnot jsou představeny v následující tabulce. V tabulce je také uvedeno hodnocení zjištěných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3 [5].

Tab. 22: Výsledky měření a hodnocení průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku A hluku pozadí

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Průměrná hodnota hladiny akustického tlaku A hluku pozadí $L_{p,A,B}$ [dB] zjištěná pomocí měření	26,4	25,5	30,3	34,3
Směrodatná odchylka s [dB] zjištěná pomocí výpočtu	2,9	2,2	2,2	1,3
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$L_{p,A,B} < 35$ dB nebo $L_{p,A,B} > 48$ dB (špatný stav prostorové akustiky) $L_{p,A,B}$ v rozmezí od 40 dB do 45 dB (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Z výsledků je patrné, že všechny hodnoty ukazují na špatný stav prostorové akustiky. Takové hodnocení a výsledky měření jsou způsobeny podmínkami měření podrobněji popsány v kapitole 3.3.2. Norma ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] vyžaduje měření parametrů prostorové akustiky při typickém provozu stacionárních zdrojů hluku v otevřených kancelářích. Vzhledem k trvalé poruše klimatizačních jednotek v hodnocených kancelářích naměřená hladina hluku pozadí odpovídá pouze typickému zimnímu provozu kanceláře a to bez chlazení vzduchu v prostoru. Hladina akustického tlaku A hluku pozadí je tak výrazně nižší, než by teoreticky byla při funkčních klimatizačních jednotkách při typickém letním provozu.

3.3.7. Index přenosu řeči

3.3.7.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu

Výsledky dopočtu z měření indexu přenosu řeči STI [-] pro jednotlivé body na měřicích dráhách ve zkoumaných kancelářích jsou představeny v následující tabulce. Dle aktuálního vydání ČSN EN ISO 3382-3 [5] v kancelářských prostorech se musí použít váhové činitele v oktávo- α pásmech α (váhový činitel STI) a β (činitel redundance) pro osoby mužského pohlaví [5]. Toto nové vydání ještě není zahrnuté do výpočtového programu [30], z tohoto důvodů a pro širší přehled o výsledcích měření budou použity následující konfigurace STI:

- STI A - bez korekce na pohlaví;
- STI B - s korekcí na ženské pohlaví;
- STI C - s korekcí na mužské pohlaví.

Tab. 23: Výsledky měření indexu přenosu řeči

Řešený prostor	Měřicí dráha	Měřicí bod	Index přenosu řeči		
			STI A	STI B	STI C
Kancelář č. 1	Měřicí dráha 1	bod M1	0,73	0,80	0,76
		bod M2	0,71	0,78	0,75
		bod M3	0,64	0,69	0,66
		bod M4	0,61	0,67	0,65
		bod M5	0,58	0,65	0,63
		bod M6	0,57	0,63	0,62
		bod M7	0,59	0,66	0,65
		bod M8	0,59	0,65	0,64
	Měřicí dráha 2	bod M9	0,66	0,72	0,70
		bod M10	0,60	0,65	0,64
		bod M11	0,53	0,58	0,58
		bod M12	0,56	0,61	0,61
		bod M13	0,53	0,59	0,59
		bod M14	0,42	0,48	0,48
Kancelář č. 2	Měřicí dráha 1	bod M1	0,60	0,64	0,63
		bod M2	0,59	0,64	0,63
		bod M3	0,51	0,56	0,58
		bod M4	0,49	0,54	0,56
		bod M5	0,45	0,50	0,53
		bod M6	0,38	0,42	0,44
		bod M7	0,38	0,42	0,45
		bod M8	0,37	0,42	0,44
		bod M9	0,32	0,35	0,38
		bod M10	0,27	0,34	0,37
	Měřicí dráha 2	bod M11	0,63	0,68	0,66
		bod M12	0,49	0,55	0,56
		bod M13	0,50	0,56	0,58
		bod M14	0,40	0,46	0,47
		bod M15	0,40	0,46	0,47
		bod M16	0,40	0,45	0,46
		bod M17	0,40	0,47	0,48

3.3.7.2. Hodnocení stávajícího stavu

Pro větší přehlednost jsou výsledky výpočtů STI s korekcí na mužské pohlaví, získané pomocí měření, vyneseny na schématické půdorysy jednotlivých kanceláří, které jsou uvedeny níže. Červenou a zelenou barvou jsou schématicky vyšrafovány zóny, ve kterých změřené hodnoty indexu přenosu řeči ukazují na špatný či dobrý stav prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3 [5]. Červená barva reprezentuje špatný stav prostorové akustiky a zelená naopak dobrý stav prostorové akustiky v kanceláři.



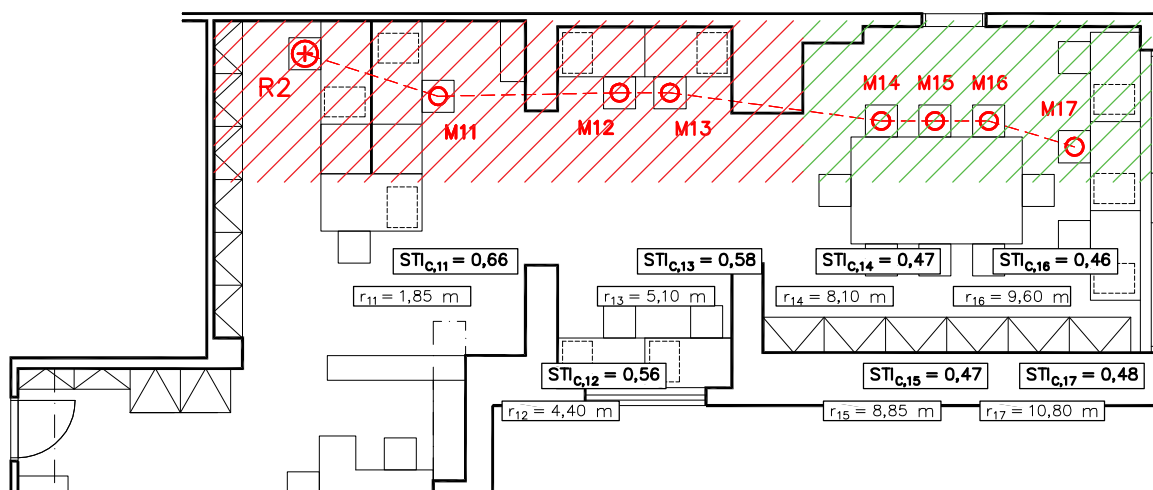
Obr. 28: Výsledky měření STI s korekcí na mužské pohlaví v kanceláři č. 1 na draze 1



Obr. 29: Výsledky měření STI s korekcí na mužské pohlaví v kanceláři č. 1 na draze 2



Obr. 30: Výsledky měření STI s korekcí na mužské pohlaví v kanceláři č. 2 na draze 1



Obr. 31: Výsledky měření STI s korekcí na mužské pohlaví v kanceláři č. 2 na draze 2

Ze zobrazení výsledků na obrázcích je patrné, že pouze menší části prostorů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky z hlediska indexu přenosu řeči dle ČSN EN ISO 3382-3 [5].

V kanceláři č. 1 na první měřicí dráze všechny hodnoty ukazují na špatný stav prostorové akustiky. Takové výsledky pravděpodobně jsou způsobeny absencí jakýchkoliv svislých překážek v této části prostoru. Na druhé měřicí dráze jediné měřicí místo, ve kterém výsledek STI ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky, je od zbytku dráhy oddělené prosklenou stěnou (od podlahy až po podhled).

V kanceláři č. 2 na první měřicí dráze zóna s hodnotami, které ukazují na dobrý stav prostorové akustiky, se nachází ve velké vzdálenosti od zdroje zvuku, kterou umožňuje geometrie prostoru. Na druhé měřicí dráze výsledky STI, ukazující na dobrý stav prostorové akustiky, jsou pravděpodobně způsobeny stíněním zvuku částmi stěn.

Výsledky výpočtu STI s korekcí pro mužské pohlaví pro jednotlivé měřicí dráhy ve zkoumaných kancelářích jsou také vyhodnoceny v následující tabulce.

Tab. 24: Výsledky měření a hodnocení indexu přenosu řeči

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$STI > 0,50$ (špatný stav prostorové akustiky)			
	$STI < 0,50$ (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnoty ve 100 % měřicích bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 83 % měřicích bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 50 % měřicích bodů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnoty ve 57 % měřicích bodů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky

3.3.8. Vzdálenost rušení

3.3.8.1. Výsledky měření a hodnocení stávajícího stavu

Výsledky dopočtu z měření vzdálenosti rušení r_D [m] pro jednotlivé měřicí dráhy ve zkoumaných kancelářích jsou představeny v následující tabulce. V tabulce je také uvedeno hodnocení zjištěných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5]. Aktuální verze programu Odeon [30] hodnotí prostorovou akustiku v kancelářích dle původního vydání ČSN EN ISO 3382-3 [7] bez použití váhových činitelů pro osoby mužského pohlaví. Kvůli tomu vzdálenost rušení ve výpočtovém programu je také odvozená od indexu přenosu řeči bez korekce na pohlaví. Pro výpočet dle nyní platné normy [5] vzdálenost rušení byla určena pomocí metody lineární regrese (grafické zobrazení stanovení vzdálenosti rušení z křivek prostorového poklesu je zobrazeno na obrázku č. 34).

Tab. 25: Výsledky měření a hodnocení vzdálenosti rušení

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Vzdálenosti rušení r_D [m] zjištěná pomocí měření	24,8	13,0	10,8	8,6
Obvyklé jednoosé hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$r_D > 11$ m (špatný stav prostorové akustiky) $r_D < 5$ m (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky

Z výsledků je patrné, že většina hodnot v kanceláři č.1 ukazují na špatný stav prostorové akustiky anebo se k těmto hodnotám blíží. V kanceláři č. 2 hodnoty vzdálenosti komfortu se blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky.

Vzdálenost komfortu přímo závisí na hodnotách indexu přenosu řeči. Interpretace výsledků STI je popsána v kapitole 3.3.7.2.

3.4 Komplexní hodnocení změřených parametrů

3.4.1. Celkové hodnocení kanceláří

V následujících tabulkách jsou uvedeny slovní hodnocení všech měření získaných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] a také změřené doby dozvuku v jednotlivých kancelářských prostorech.

Tab. 25: Hodnocení výsledků měření v kanceláři č. 1

Hodnocená veličina	Kancelář č. 1	
	Měřicí dráha 1	Měřicí dráha 2
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A $D_{2,5}$ [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobry stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobry stav prostorové akustiky
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,5,4m}$ [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatny stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobry stav prostorové akustiky
Vzdálenosti komfortu r_c [m], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatny stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobry stav prostorové akustiky
Průměrná hodnota hladiny akustického tlaku A hluku pozadí $L_{p,A,B}$ [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota ukazuje na špatny stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatny stav prostorové akustiky
Index přenosu řeči STI [-], zjištěný pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnoty ve 100 % měřicích bodů ukazují na špatny stav prostorové akustiky	Hodnoty v 83 % měřicích bodů ukazují na špatny stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_D [m], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota ukazuje na špatny stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatny stav prostorové akustiky
Doba dozvuku T [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle SBTToolCZ)	Hodnota nesplňuje certifikačním nástrojem stanovené rozmezí	Hodnota nesplňuje certifikačním nástrojem stanovené rozmezí

Z tabulky je patrné, že v kanceláři č. 1 na obou měřicích drahách většina hodnocených veličin buď ukazuje na špatný stav prostorové akustiky anebo nespadá do uvedených rozmezí, ale výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav

prostorové akustiky.

Většina parametrů ukazující na špatný stav prostorové akustiky jsou vztaženy k srozumitelnosti řeči anebo k době dozvuku prostoru.

Tab. 26: Hodnocení výsledků měření v kanceláři č. 2

Hodnocená veličina	Kancelář č. 2	
	Měřicí dráha 1	Měřicí dráha 2
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A $D_{2,5}$ [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobry stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatny stav prostorové akustiky
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,5,4m}$ [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobry stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobry stav prostorové akustiky
Vzdálenosti komfortu r_c [m], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobry stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobry stav prostorové akustiky
Průměrná hodnota hladiny akustického tlaku A hluku pozadí $L_{p,A,B}$ [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota ukazuje na špatny stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatny stav prostorové akustiky
Index přenosu řeči STI [-], zjištěný pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnoty v 50 % měřicích bodů ukazují na dobry stav prostorové akustiky	Hodnoty ve 57 % měřicích bodů ukazují na dobry stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_D [m], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatny stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatny stav prostorové akustiky
Doba dozvuku T [dB], zjištěná pomocí měření (Hodnocení dle SBToolCZ)	Hodnota nesplňuje certifikačním nástrojem stanovené rozmezí	Hodnota nesplňuje certifikačním nástrojem stanovené rozmezí

Z tabulky je patrné, že v kanceláři č. 2 na obou měřicích drahách cca polovina hodnocených veličin buď ukazuje na špatný stav prostorové akustiky anebo nespadá do uvedených rozmezí, ale výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky.

3.4.2. Vzájemný vliv jednotlivých parametrů

Zkoumané parametry prostorové akustiky se navzájem přímo anebo nepřímo ovlivňují. Z výpočtových vztahů a definic jednotlivých veličin popsanych v kapitolách 2.2.2.1. až 2.2.2.6. je zřejmé, že vzdálenost rušení r_D přímo závisí na indexu přenosu řeči, vzdálenost komfortu r_c je závislá na hodnotách míry prostorového poklesu řeči $D_{2,5}$ a hladiny akustického tlaku A řeči ve 4 m $L_{p,A,S,4m}$ která také se dopočítá pomocí míry prostorového poklesu řeči.

Obecně hodnocené parametry prostorové akustiky v otevřených kancelářích je možné rozdělit do dvou skupin: parametry popisující změnu hladiny akustického tlaku a parametry popisující srozumitelnost řeči.

Parametry popisující změnu hladiny akustického tlaku

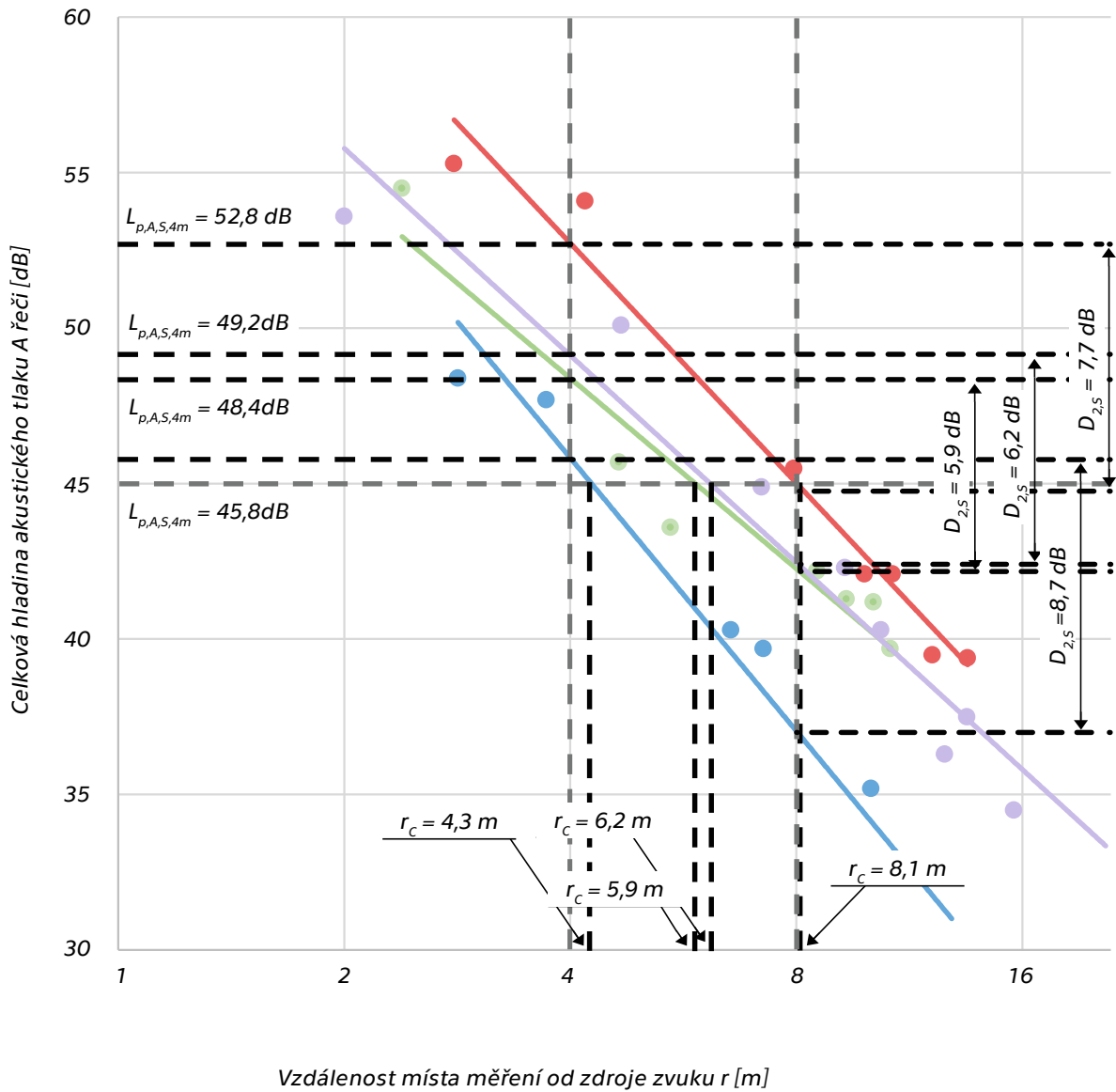
Do těchto parametrů v rámci diplomové práce byly zahrnuty následující veličiny:

- Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A $D_{2,5}$ [dB];
- Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,S,4m}$ [dB];
- Vzdálenost komfortu r_c [m];
- Doba dozvuku T [s].

Doba dozvuku byla zahrnutá do této skupiny jelikož také popisuje chování hladiny akustického tlaku v prostoru. Avšak tato hodnota oproti parametrům prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3 [5] není závislá na vyzařované hladině akustického výkonu řeči, ani na umístění pracovních míst.

Z výpočtových vztahů a i z výsledků měření se dá stanovit způsob vzájemného ovlivnění jednotlivých parametrů. Je například patrné, že vzdálenost komfortu se zkracuje při rostoucí hodnotě míry prostorového poklesu hladiny akustického tlaku a naopak se zvyšuje při nižší hodnotě hladiny akustického tlaku ve 4 m. Na následujícím obrázku je přestavena lineární regresní analýza, která dle ČSN EN ISO 3382-3 [5] zahrnuje měřicí místa v rozmezí od 2 m do 16 m od zdroje zvuku.

Závislost parametrů popisujících změnu hladiny akustického tlaku



- Kancelář č.1 první měřicí dráha
- Kancelář č.2 první měřicí dráha
- Kancelář č.1 druhá měřicí dráha
- Kancelář č.2 druhá měřicí dráha

Obr. 32: Závislost parametrů popisujících změnu hladiny akustického tlaku

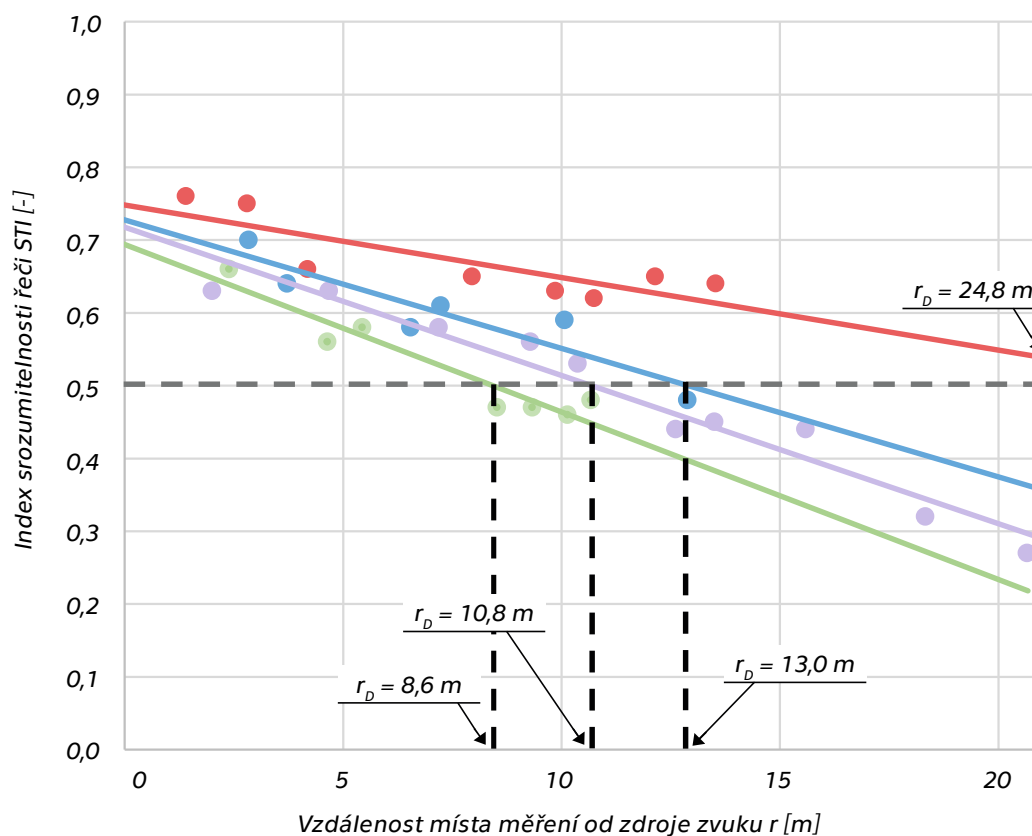
Parametry popisující srozumitelnost řeči

Do těchto parametrů v rámci diplomové práce byly zahrnuty následující veličiny:

- Index přenosu řeči STI [-];
- Průměrná hodnota a směrodatná odchylka hladiny akustického tlaku A hluku pozadí na měřicích místech uvnitř akustických zón $L_{p,A,B}$ [dB];
- Vzdálenost rušení r_D [m].

Z definic parametrů a i z výsledků měření se dá stanovit způsob vzájemného ovlivnění jednotlivých parametrů. Je například zřejmé, že vzdálenost rušení se zkracuje při klesající hodnotě indexu srozumitelnosti řeči. STI se zase zvyšuje při příliš nízké anebo příliš vysoké hodnotě hladiny akustického tlaku pozadí. Na následujícím obrázku je přestavena lineární regresní analýza, která dle ČSN EN ISO 3382-3 [5] zahrnuje měřicí místa, umístěné víc než 1 m od zdroje zvuku.

Závislost parametrů popisujících srozumitelnost řeči



- Kancelář č.1 první měřicí dráha
- Kancelář č.1 druhá měřicí dráha
- Kancelář č.2 první měřicí dráha
- Kancelář č.2 druhá měřicí dráha

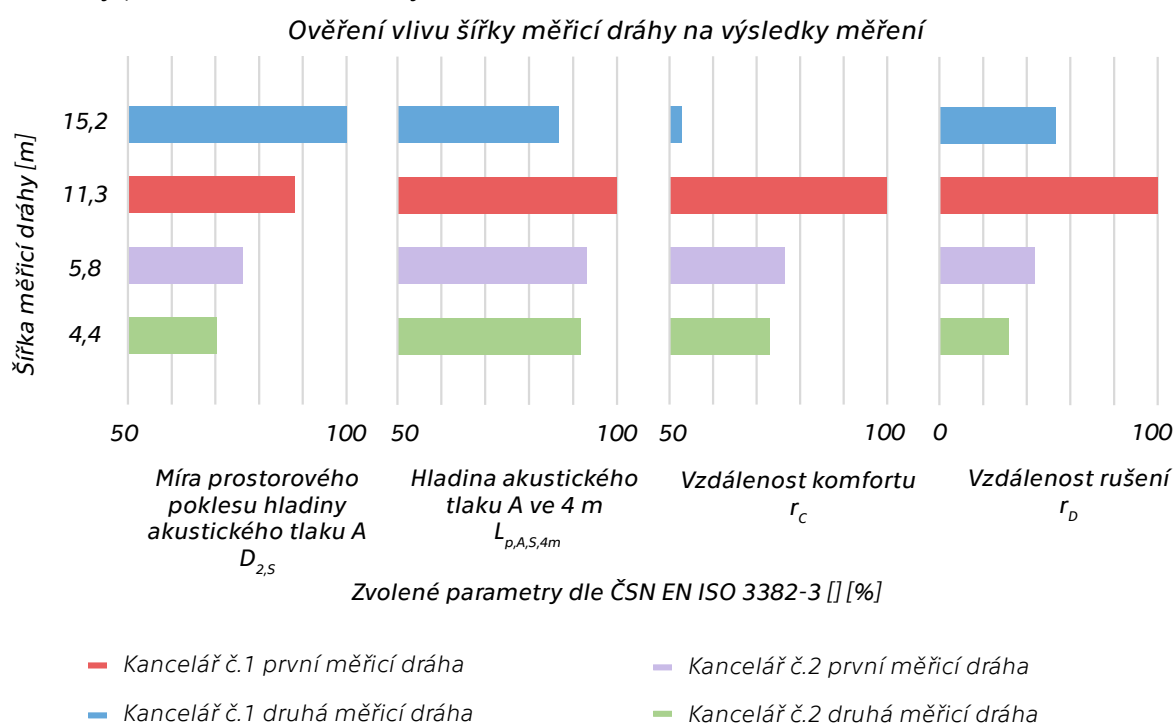
Obr. 33: Závislost parametrů popisujících srozumitelnost řeči

3.4.3. Porovnání vlivu geometrie jednotlivých kancelářů

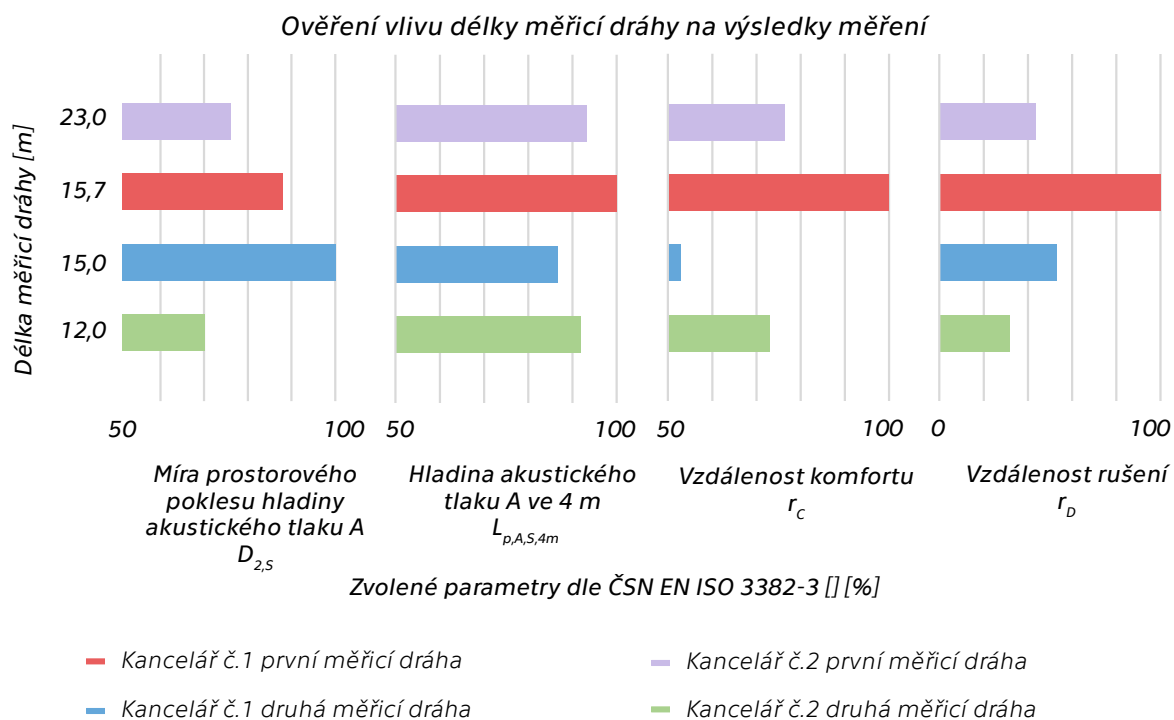
Geometrie jednotlivých akustických zón má velký vliv na výsledné veličiny prostorové akustiky. Vzhledem k tomu, že zvolené kancelářské prostory mají stejné materiálové úpravy v prostoru a podobný nábytek, je možné porovnat změřené parametry v závislosti na šířkách a délkách jednotlivých měřicích drah.

Na následujících obrázcích jsou představeny porovnání změřených hodnot v závislosti na šířce a délce měřicích drah. Pro větší přehlednost získané hodnoty byly převedeny na procenta, kde 100 % vždy představuje maximální z měření získaných hodnot jednotlivého parametru.

V případě složitější geometrie měřicí dráhy šířka a délka zóny byly uvažovány průměrné hodnoty přes celou zónu dráhy.



Obr. 34: Ověření vlivu šířky měřicí dráhy na výsledky měření



Obr. 35: Ověření vlivu délky měřicí dráhy na výsledky měření

Z výše uvedených obrázků lze vyhodnotit, že může existovat závislost mezi šířkou měřicí dráhy a výsledky měření jednotlivých parametrů prostorové akustiky. S rostoucí šířkou prostoru se zvolenou měřicí dráhou se s různou intenzitou zvětšují i hodnoty míry prostorového poklesu hladiny akustického tlaku, hodnoty hladiny akustického tlaku A v 4 m a hodnoty vzdálenosti rušení a komfortu. Zvýšení těchto hodnot pro různé parametry ukazuje jak na zlepšení tak i na zhoršení stavu prostorové akustiky. Zároveň tuto souvislost nepodporuje druhá měřicí dráha v kanceláři č. 1. To by mohlo být způsobeno tím, že pouze na této dráze mezi jednotlivými měřicími místy se nachází překážky převyšující výšku mikrofону a reproduktoru.

Z hodnot získaných pro ověření vlivu délky geometrie prostoru s měřicí dráhou nelze stanovit závislost mezi výsledky měření a délkou dráhy.

3.4.4. Subjektivní hodnocení změřených hodnot

Vzhledem k tomu, že jsem jednou ze zaměstnanců, kteří pracují v kanceláři č. 1 (a přesněji na místě M2 na měřicí dráze č. 1) pokusila jsem se vyhodnotit, jestli subjektivní vnímání změřených parametrů odpovídá naměřeným hodnotám a provedenému hodnocení výsledků.

Výsledné hodnoty v kanceláři č. 1 celkově ukazují na špatný stav prostorové akustiky. Jediným parametrem, kladně hodnocený dle ČSN EN ISO 3382-3 [5], je míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A. Z osobní zkušenosti můžu vyhodnotit, že výsledky měření odpovídají reálnému stavu při typickém provozu v zimním období. Dle vlastního pocitu kancelář č.1 je spíše přetlumená a bez provozu klimatizačních jednotek a za podmínky, že víc lidí nemluví najednou v různých částech kanceláře,

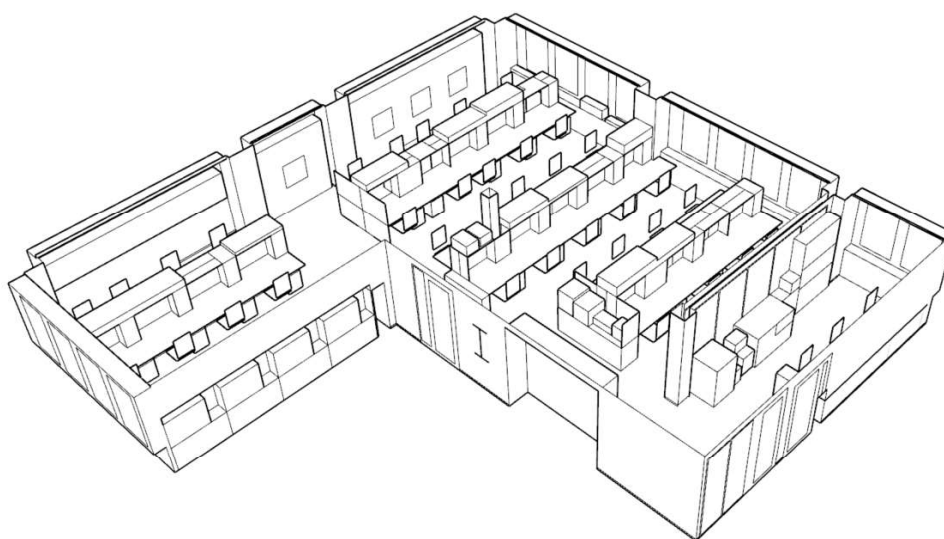
je velmi dobře slyšet téměř jakýkoliv jednotlivý rozhovor při normální hlasitosti řeči. Tomuto subjektivnímu vnímání také odpovídá zkrácená doba dozvuku oproti požadavků dle SBToolCZ [20] a vysoká hodnota míry prostorového poklesu řeči. Podle mého osobního názoru nejlépe situaci vystihují hodnoty indexu přenosu řeči. Výsledné hodnoty STI, které v jiném druhu prostoru by podle IEC 60268-16 [9] se hodnotily jako dobré až výborné po celé měřicí draze, znesnadňují soustředění při pracovní činnosti v této kanceláři.

Zároveň však musím také uvést, že i dle osobního hodnocení při typickém letním provozu, zahrnujícím provoz klimatizačních jednotek pro chlazení vzduchu, akustické vlastnosti prostoru se pocitově mírně zlepšují. Ověření vlivu zvýšení hladiny hluku pozadí vlivem provozu klimatizačních jednotek je výpočtově ověřeno pomocí programu Odeon [30] v následující kapitole.

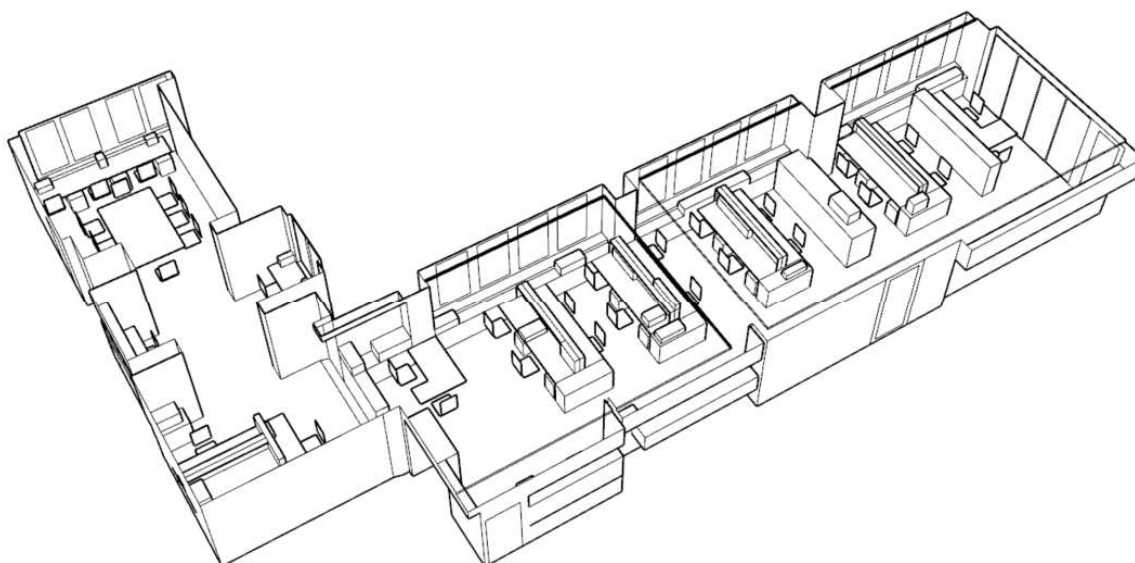
4. Teoretické zkoumání možností zlepšení prostorové akustiky

4.1. Tvorba a kalibrace výpočtových modelů

Zvolené kancelářské prostory byly nejdříve vymodelovány v programu SketchUp [31]. Tento program umožňuje vytvořit zjednodušený model prostoru s rozdělením potřebných povrchů pro následné přiřazení požadovaných vlastností materiálů. Veškerý nábytek byl vymodelován zjednodušeně kvůli doporučením programu Odeon [30], ve kterém se následně počítala prostorová akustika prostoru. Ukázky výpočtových modelů z programu SketchUp [31] jsou uvedeny na následujících obrázcích.

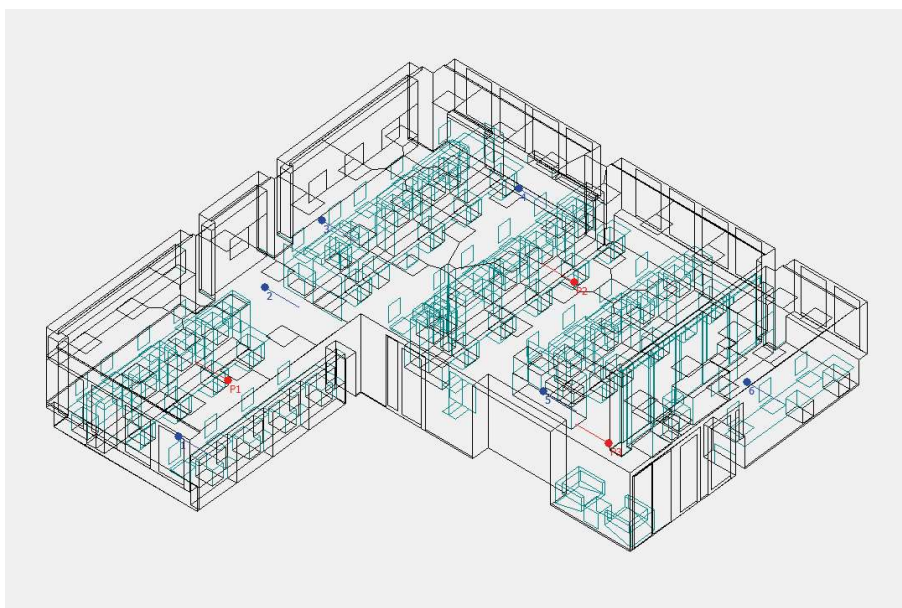


Obr. 36: Výpočtový model kanceláře č. 1 v programu SketchUp [31]

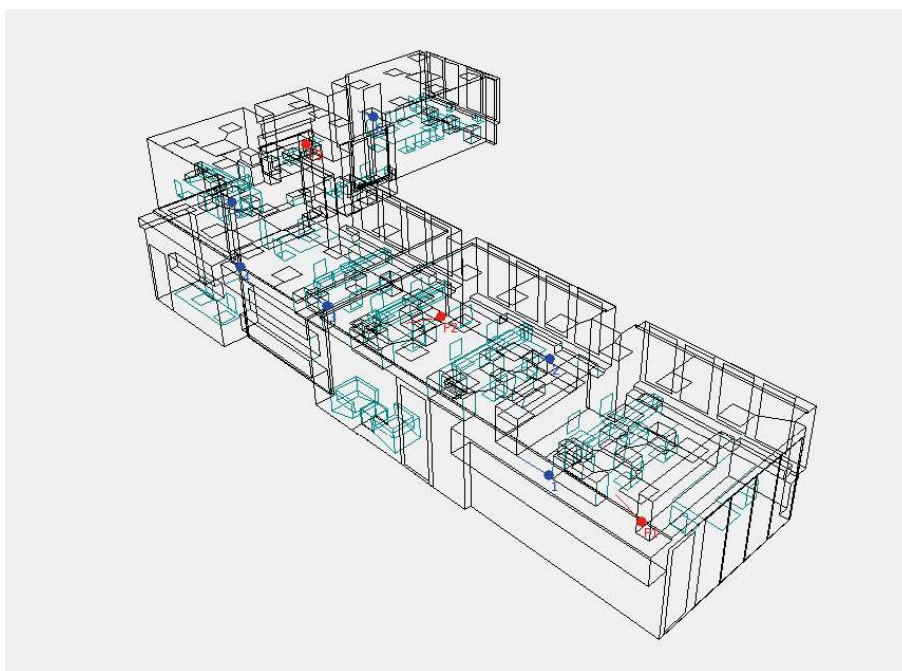


Obr. 37: Výpočtový model kanceláře č. 2 v programu SketchUp [31]

Následně vytvořené modely byly exportovány do výpočtového programu Odeon [30]. Tento program umožňuje přiřadit zvolené vlastností materiálů k jednotlivým povrchům v prostoru. Dopředu byl jistě znám pouze druh akustického podhledu v předemných kancelářích. Pohltivosti ostatních materiálů byly stanoveny pomocí kalibrace výpočtových modelů podle změřené doby dozvuku. Jednotlivé povrchy a přiřazené materiály jsou uvedeny v tabulce č. 27. Vlastnosti materiálů byly zvoleny podle existujících materiálů či dle pomocných výpočtů. Cílem kalibrace bylo stanovení optimálních hodnot činitelů pohltivosti materiálů v prostoru pro další práce s modely. Také se počítá s odchylkou oproti změřeným hodnotám doby dozvuku, jelikož vlastnosti materiálů musejí být vhodné pro oba dva prostory.



Obr. 38: Výpočtový model kanceláře č. 1 v programu Odeon [30] s umístěním poloh mikrofonu a zdroje zvuku pro kalibraci doby dozvuku



Obr. 39: Výpočtový model kanceláře č. 2 v programu Odeon [30] s umístěním poloh mikrofonu a zdroje zvuku pro kalibraci doby dozvuku

Tab. 27: Použité hodnoty činitele pohltivosti zvuku α [-]

Materiály		125	250	500	1000	2000	4000
Koberec	Materiál dypočtený dle kalibračního měření	0,05	0,10	0,25	0,25	0,25	0,15
Plast	Materiál dypočtený dle kalibračního měření	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Zasklené otvory	Okenní otvor zasklený [12]	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04
Kancelářské židle	Čalouněné křeslo [12]	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30
Kožená Křesla	Sedadla, kožené potahy [29]	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50
Odsazená deska	Materiál dypočtený dle kalibračního měření	0,30	0,25	0,20	0,10	0,03	0,02
Omítka	Databáze Odeonu [30] materiál č. 4002	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Podhled Ecophon Focus DS	podklady ze stránek Ecophon [28]	0,50	0,85	0,85	0,85	1,00	1,00
Stěny ze sádrokartonu	Databáze Odeonu [30] materiál č. 4044	0,14	0,12	0,11	0,06	0,02	0,02
Deska	Materiál dypočtený dle kalibračního měření	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Technické zařízení	Materiál dypočtený dle kalibračního měření	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
Kancelářské potřeby	Materiál dypočtený dle kalibračního měření	0,50	0,40	0,30	0,10	0,05	0,02

Poznámky:

Do materiálů „Plast“ spadají rámy okenních otvorů a prosklených příček v interiéru.

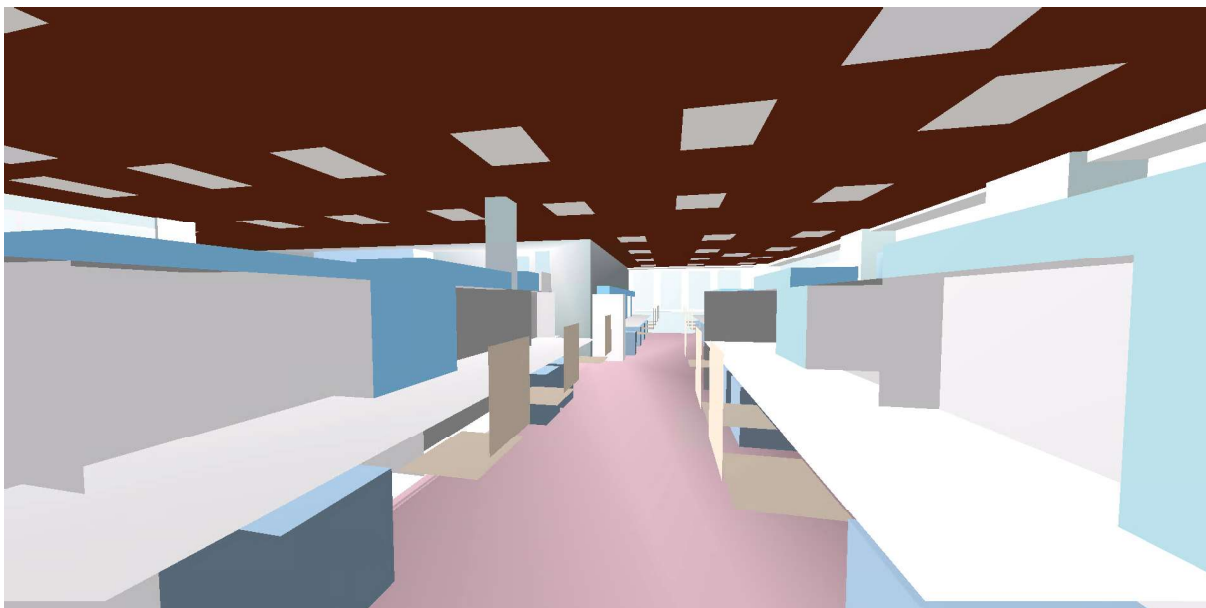
Materiál „Odsazená deska“ reprezentuje průměrnou hodnotu pro malé a velké skříně v prostoru a také pro konstrukci parapetu.

Do materiálu „Deska“ jsou zahrnuty veškeré desky tloušťky 10-30 mm, volně umístěné v prostoru, které tvoří stoly a police.

„Technická zařízení“ označují svítidla, klimatizační jednotky, tiskárny a další spotřebiče.

Kancelářské potřeby reprezentují veškeré papíry, desky a osobní věci, které zaměstnanci mají na pracovních místech.

Snížený činitel pohltivosti koberce na vysokých kmitočtových je vyžadován kvůli delším hodnotám doby dozvuku na vysokých kmitočtech, které byly získány měřením. Činitele pohltivosti podhledu jsou dodány výrobcem prvku a není pravděpodobné, že by se jejich vlastnosti změnily. Vliv pohltivosti kancelářských židlí a kožených křesel je oproti ploše koberce zanedbatelný. Všechny ostatní materiály mají minimální hodnoty činitele pohltivosti v oktávových pásmech 2000 a 4000 Hz. Snížený činitel pohltivosti koberce na vysokých kmitočtových může být také způsoben sešlápnutím a zašpiněním koberce během téměř každodenního používání v průběhu několika let



Obr. 40: Výpočtový model kanceláře č. 1 v programu Odeon [30] s barevným zobrazením pohltivosti ploch



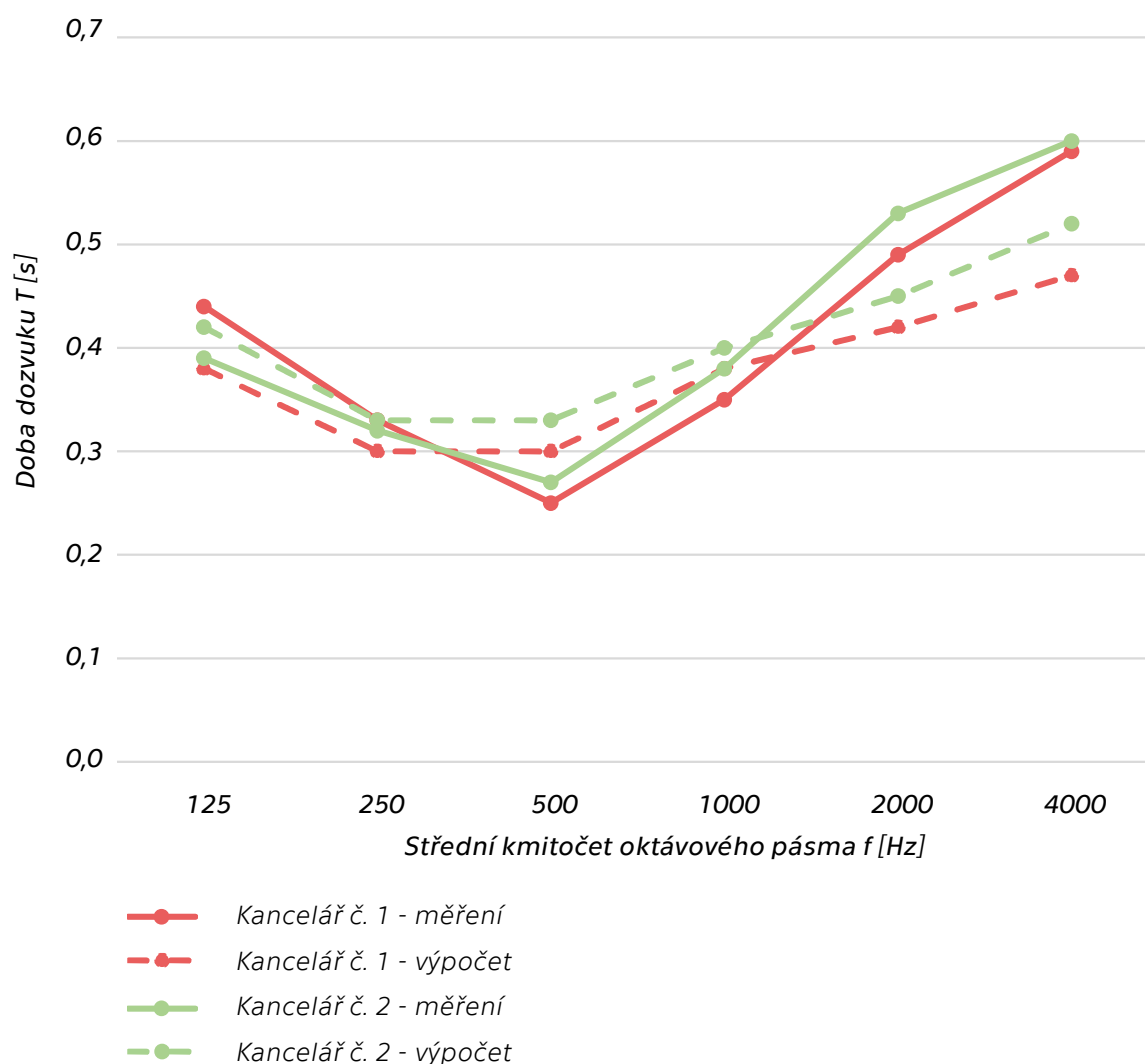
Obr. 41: Výpočtový model kanceláře č. 2 v programu Odeon [30] s barevným zobrazením pohltivosti ploch

Na následujícím obrázku je představeno porovnání výsledků měření a výpočtu doby dozvuku v předmětných kancelářských prostorech.

Tab. 28: Porovnání výsledků měření a výpočtů doby dozvuku T [s]

Pásmo		Střední kmitočty oktávového pásma					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Kancelář č. 1	Výsledky měření	0,44	0,33	0,25	0,35	0,49	0,59
	Výsledky výpočtu	0,38	0,30	0,30	0,38	0,42	0,47
Kancelář č. 2	Výsledky měření	0,39	0,32	0,30	0,38	0,42	0,47
	Výsledky výpočtu	0,42	0,33	0,33	0,40	0,45	0,52

Doba dozvuku v oktávových pásmech T [s]



Obr. 42: Porovnání výsledků měření a výpočtů doby dozvuku

Z porovnání výše uvedených hodnot je patrná odchylka vypočtené a změřené doby dozvuku. Odchylka tvoří průměrně cca 12 % a hlavně je způsobena rozdílem doby dozvuku na vysokých kmitočtech. Vzhledem k použitým činitelům pohltivosti (uvedené v tabulce č. 27) další úprava vlastností materiálů může vést k nespolehlivým hodnotám. Nepřesnost může být způsobena nemožností úplně přesného vymodelování již zastavených prostorů s velkým množstvím osobních věcí a absencí jakýchkoliv informací k některým povrchům.

4.2. Výpočet a hodnocení parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN 3382-3

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty prostorové akustiky vypočtené pomocí programu Odeon [30] anebo dodatečně stanovené na základě výpočtem zjištěných parametrů (například hodnoty vzdálenosti rušení a komfortu, které program dopočítává dle původního vydání normy [7] anebo vůbec nezahraňuje). V tabulkách jsou také uvedena hodnocení zjištěných parametrů dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5].

Tab.29: Výsledky výpočtů a hodnocení míry prostorového poklesu hladiny akustického tlaku A

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku $A_{D_{2,5}}$ [dB] zjištěná pomocí výpočtu	5,7	9,1	5,8	4,7
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$D_{2,5} < 5$ dB (špatný stav prostorové akustiky) $D_{2,5} > 8$ dB (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Tab.30: Výsledky výpočtů a hodnocení vzdálenosti komfortu

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Vzdálenosti komfortu r_c [m] zjištěná pomocí výpočtu	11,0	4,7	9,0	5,0
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$r_c > 11$ m (špatný stav prostorové akustiky) $r_c < 5$ m (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky

Tab.31 : Výsledky výpočtů a hodnocení hladiny akustického tlaku A ve vzdálenosti 4 m

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,S,4m}$ [dB] zjištěná pomocí výpočtu	53,3	47,1	41,8	46,5
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$L_{p,A,S,4m} > 52$ dB (špatný stav prostorové akustiky) $L_{p,A,S,4m} < 48$ dB (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky

Tab.32 : Výsledky výpočtů a hodnocení vzdálenosti rušení

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Vzdálenosti rušení r_D [m] zjištěná pomocí výpočtu	28,0	12,5	20,2	17,8
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$r_D > 11$ m (špatný stav prostorové akustiky) $r_D < 5$ m (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Tab. 33: Výsledky výpočtů indexu přenosu řeči

Řešený prostor	Měřicí dráha	Bod výpočtu	STI C
Kancelář č. 1	Měřicí dráha 1	bod M1	0,89
		bod M2	0,89
		bod M3	0,81
		bod M4	0,78
		bod M5	0,73
		bod M6	0,75
		bod M7	0,73
		bod M8	0,73
	Měřicí dráha 2	bod M9	0,81
		bod M10	0,80
		bod M11	0,61
		bod M12	0,63
		bod M13	0,61
		bod M14	0,50
Kancelář č. 2	Měřicí dráha 1	bod M1	0,78
		bod M2	0,75
		bod M3	0,68
		bod M4	0,66
		bod M5	0,66
		bod M6	0,55
		bod M7	0,64
		bod M8	0,50
		bod M9	0,50
		bod M10	0,56
	Měřicí dráha 2	bod M11	0,79
		bod M12	0,67
		bod M13	0,68
		bod M14	0,63
		bod M15	0,63
		bod M16	0,63
		bod M17	0,64

Tab. 34: Výsledky výpočtů a hodnocení indexu přenosu řeči

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Obvyklé jednotělné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$STI > 0,50$ (špatný stav prostorové akustiky)			
	$STI < 0,50$ (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 83 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 80 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky

4.3. Porovnání vypočtených a změřených hodnot

V následujících tabulkách je provedeno porovnání změřených a výpočtem stanovených hodnot parametrů prostorové akustiky a porovnání jejich slovního hodnocení dle normy ČSN EN ISO 3382-3 [5] pro jednotlivé měřicí dráhy v kancelářích. Do porovnání nebyla zahrnuta průměrná hodnota hladiny akustického tlaku A hluku pozadí, jelikož pro výpočet v programu [30] tato hodnota se zadává ručně na základě parametrů získaných měřením.

Tab.35 : Porovnání výsledků měření a výsledků výpočtu na měřicí dráze č.1 v kanceláři č. 1

Hodnocená veličina	Kancelář č. 1 první měřicí dráha	
	Měření	Výpočet
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku $D_{2,5}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	7,7	5,7
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{pA,5,4m}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	52,8	53,3
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti komfortu r_c [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	8,1	11,0
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky
Index přenosu řeči STI [-], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnoty ve 100 % měřicích bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_D [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	24,8	28,0
	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Z tabulky je patrné, že i přesto že vypočtené hodnoty se liší od výsledků měření slovní hodnocení téměř ve všech případech zachovává tendenci ukazovat nebo blížit se k hodnotám, ukáznujícím na stejný stav prostorové akustiky. Jedinou výjimkou je míra prostorového poklesu řeči. Větší rozdíl v hodnotách vzdálenosti rušení a vzdálenosti

komfortu je také možné vysvětlit směrodatnou odchylkou reprodukovatelnosti měření. ČSN EN ISO 3382-3 [5] v příloze D uvádí přesnost určování jednočíselných veličin pomocí měření. Pro vzdálenosti rušení a komfortu směrodatná odchylka reprodukovatelnosti nabývá až $\pm 16\%$ pro r_D a $\pm 21\%$ pro r_C [5].

Tab. 36: Porovnání výsledků měření a výsledků výpočtu na měřicí dráze č.2 v kanceláři č. 1

Hodnocená veličina	Kancelář č. 1 druhá měřicí dráha	
	Měření	Výpočet
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku $A_{D_{2,5}}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	8,7	9,1
	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,S,4m}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	45,8	47,1
	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky
Vzdálenosti komfortu r_C [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	4,3	4,7
	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky
Index přenosu řeči STI [-], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnoty v 83 % měřicích bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 83 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_D [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	13,0	12,5
	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Z tabulky je patrné, že vypočtené hodnoty se téměř neliší od výsledků měření a slovní hodnocení ve všech případech zachovává tendenci ukazovat na stejný stav prostorové akustiky.

Tab. 37: Porovnání výsledků měření a výsledků výpočtu na měřicí dráze č.1 v kanceláři č. 2

Hodnocená veličina	Kancelář č. 2 první měřicí dráha	
	Měření	Výpočet
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku $A_{D_{2,5}}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	6,7	5,8
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,5,4m}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	49,2	51,8
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti komfortu r_c [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	6,2	9,0
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky
Index přenosu řeči STI [-], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnoty v 50 % měřicích bodů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnoty v 80 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_d [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	10,8	20,2
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Z tabulky je patrné, že vypočtené hodnoty se liší od výsledků měření a to jak podle rozdílu jednotlivých veličin, tak i podle slovního hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3 [5]. Zároveň hodnoty, které při měření nespádaly do uvedených rozmezí, ale výsledek se blížil k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky při výpočtu naopak se blížil k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky.

Největší rozdíly vykazují hodnoty vzdálenosti rušení, kde vypočtená hodnota je téměř dvojnásobná oproti změřené veličině. To je způsobeno odlišnými hodnotami indexu přenosu řeči, které jsou porovnány v jedné z následujících tabulek. Když rozdíl v ostatních parametrech není příliš velký a může být odůvodněn odchylkou simulovaného prostoru od výpočtového modelu, rozdíl ve vzdálenosti rušení je minimálně zavádějící a v praxi by bylo doporučeno provést opakované měření.

Tab. 38: Porovnání výsledků měření a výsledků výpočtu na měřicí dráze č.2 v kanceláři č. 2

Hodnocená veličina	Kancelář č. 2 druhá měřicí dráha	
	Měření	Výpočet
Míra prostorového poklesu hladiny akustického tlaku $A_{D_{2,5}}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	6,1	4,8
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky
Hladina akustického tlaku A v 4,0 m $L_{p,A,5,4m}$ [dB], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	48,4	46,5
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na dobrý stav prostorové akustiky
Vzdálenosti komfortu r_c [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	5,9	5,0
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky
Index přenosu řeči STI [-], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	Hodnoty v 57 % měřicích bodů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_d [m], (Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022)	7,6	17,8
	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky

Z tabulky je patrné, že ačkoliv vypočtené hodnoty se liší od výsledků měření slovní hodnocení téměř ve všech případech zachovává tendenci ukazovat nebo blížit se k hodnotám ukazujícím na stejný stav prostorové akustiky (oproti změřenému stavu).

Výjimkou jsou, stejně jako na první měřicí dráze ve stejné kanceláři č. 2, hodnoty indexu přenosu řeči a vzdálenosti rušení. Porovnání hodnot indexu přenosu řeči je uvedeno v následující tabulce.

Tab.39: Porovnání výsledků měření a výpočtu indexu přenosu řeči

Řešený prostor	Měřicí dráha	Bod výpočtu	STI C	
			měření	výpočet
Kancelář č. 1	Měřicí dráha 1	bod M1	0,76	0,89
		bod M2	0,75	0,89
		bod M3	0,66	0,81
		bod M4	0,65	0,78
		bod M5	0,63	0,73
		bod M6	0,62	0,75
		bod M7	0,65	0,73
		bod M8	0,64	0,73
	Měřicí dráha 2	bod M9	0,70	0,81
		bod M10	0,64	0,80
		bod M11	0,58	0,61
		bod M12	0,61	0,63
		bod M13	0,59	0,61
		bod M14	0,48	0,50
Kancelář č. 2	Měřicí dráha 1	bod M1	0,63	0,78
		bod M2	0,63	0,75
		bod M3	0,58	0,68
		bod M4	0,56	0,66
		bod M5	0,53	0,66
		bod M6	0,44	0,55
		bod M7	0,45	0,64
		bod M8	0,44	0,50
		bod M9	0,38	0,50
		bod M10	0,37	0,56
	Měřicí dráha 2	bod M11	0,66	0,79
		bod M12	0,56	0,67
		bod M13	0,58	0,68
		bod M14	0,47	0,63
		bod M15	0,47	0,63
		bod M16	0,46	0,63
		bod M17	0,48	0,64

Z uvedeného porovnání vyplývá, že výsledky STI jsou mnohem vyšší (a tím pádem horší v případě kanceláří otevřeného typu) pro výpočtový stav. Největší rozdíl je ve většině případů v místech sledování umístěných nejbliž ke zdroji zvuku. V případě, že na měřicí dráze je víc svislých překážek, které jsou vyšší než místa sledování a zdroje zvuku se vzdálenosti rozdíl se mezi naměřenými hodnotami a výsledky měření vyrovná (například jako na druhé měřicí dráze v kanceláři č. 1).

Pro shrnutí lze uvést, že hodnoty popisující změnu akustického tlaku v prostoru stanovené měřením a výpočtem se výrazně neliší a téměř vždycky zachovávají tendenci ukazovat na stejný stav prostorové akustiky v prostoru. Parametry popisující srozumitelnost řeči naopak se výrazně liší kvůli velkému rozdílu hodnot STI. Výrazným rozdílem hodnot STI, opakovanými měřeními se zaměřením na tento parametr a obecně větším zkoumáním způsobu stanovení a hodnocení indexu srozumitelnosti řeči bych se ráda zabývala v dalších odborných pracích.

4.3. Výpočtové hodnocení vlivu hluku pozadí

Norma ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5] vyžaduje měření parametrů prostorové akustiky při typickém provozu stacionárních zdrojů hluku v otevřených kancelářích. Vzhledem k trvalé poruše klimatizačních jednotek v hodnocených kancelářích naměřená hladina hluku pozadí odpovídá pouze typickému zimnímu provozu kanceláře a to bez chlazení vzduchu v prostoru. Hladina akustického tlaku A hluku pozadí je tak výrazně nižší, než by teoreticky byla při funkčních klimatizačních jednotkách.

První fáze měření v listopadu 2022 zahrnovala měření doby dozvuku a zkušební měření některých parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 [5]. Jedním z těchto parametrů byla hladina hluku akustického tlaku pozadí při typickém letním provozu klimatizačních jednotek v kanceláři č. 1 na první měřicí dráze. Provoz čtyř klimatizačních jednotek v kanceláři č. 1 byl nastaven na prostřední výkonný stupeň s chlazením vzduchu na teplotu 20 °C. Tato měření získána hodnota bude použita jako orientační hodnota hladiny akustického tlaku A pozadí pro všechny měřicí dráhy pro výpočtové stanovení parametrů prostorové akustiky pro orientační typický letní provoz.

ČSN EN ISO 3382-3 [5] uvádí, že hladina akustického tlaku A řeči ve vzdálenosti 4,0 m od středového bodu všesměrového zdroje zvuku $L_{p,A,5,4m}$ [dB] se používá pro stanovení indexu přenosu řeči a tím pádem i vzdálenosti rušení. V následujících tabulkách a na obrázcích je uvedeno porovnání těchto hodnot při orientačním letním provozu s vyšší hladinou akustického tlaku pozadí.

Tab. 40: Porovnání výsledků výpočtu STI pro typický letní a zimní provoz v kanceláři č. 1

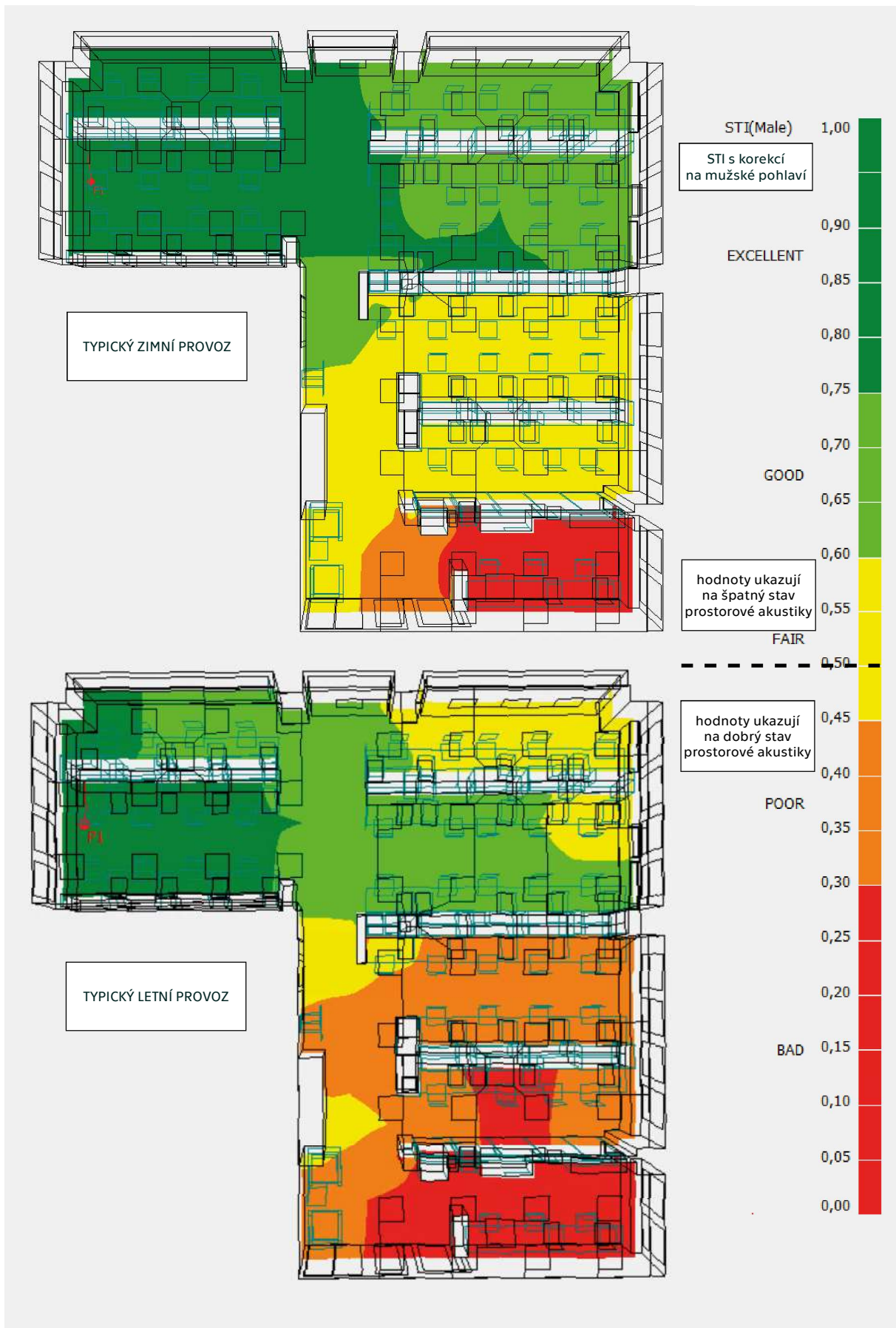
Řešený prostor	Měřicí dráha	Bod výpočtu	STI C	
			typický zimní provoz	typický zimní provoz
Kancelář č. 1	Měřicí dráha 1		$L_{p,A,B} = 26,4 \text{ dB}$	$L_{p,A,B} = 45,0 \text{ dB}$
		bod M1	0,89	0,86
		bod M2	0,89	0,81
		bod M3	0,81	0,81
		bod M4	0,78	0,70
		bod M5	0,73	0,64
		bod M6	0,75	0,67
		bod M7	0,73	0,66
	bod M8	0,73	0,60	
	Měřicí dráha 2		$L_{p,A,B} = 25,5 \text{ dB}$	$L_{p,A,B} = 45,0 \text{ dB}$
		bod M9	0,81	0,77
		bod M10	0,80	0,75
		bod M11	0,61	0,45
		bod M12	0,63	0,45
bod M13		0,61	0,41	
	bod M14	0,50	0,25	

Tab. 41: Porovnání výsledků výpočtu STI pro typický letní a zimní provoz v kanceláři č. 2

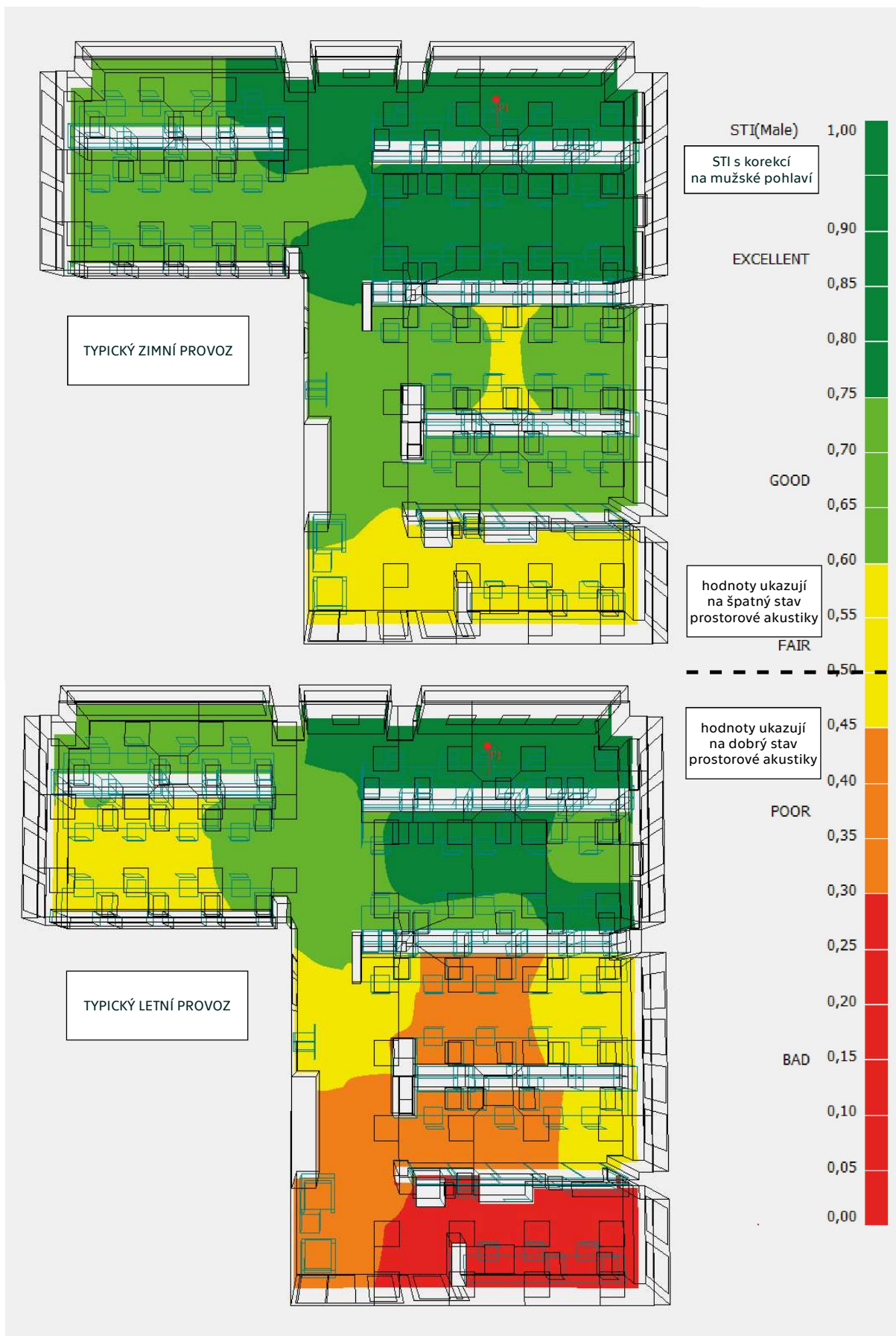
Řešený prostor	Měřicí dráha	Bod výpočtu	STI C	
			typický zimní provoz	typický zimní provoz
Kancelář č. 2	Měřicí dráha 1		$L_{p,A,B} = 30,3 \text{ dB}$	$L_{p,A,B} = 45,0 \text{ dB}$
		bod M1	0,78	0,78
		bod M2	0,75	0,73
		bod M3	0,68	0,62
		bod M4	0,66	0,59
		bod M5	0,66	0,58
		bod M6	0,55	0,49
		bod M7	0,64	0,50
		bod M8	0,50	0,50
		bod M9	0,50	0,39
	bod M10	0,56	0,32	
	Měřicí dráha 2		$L_{p,A,B} = 34,3 \text{ dB}$	$L_{p,A,B} = 45,0 \text{ dB}$
		bod M11	0,79	0,78
		bod M12	0,67	0,60
		bod M13	0,68	0,64
		bod M14	0,63	0,50
		bod M15	0,63	0,49
bod M16		0,63	0,51	
bod M17	0,64	0,59		

Tab. 42: Porovnání hodnocení výpočtu STI pro typický zimní provoz a pro orientační typický letní provoz

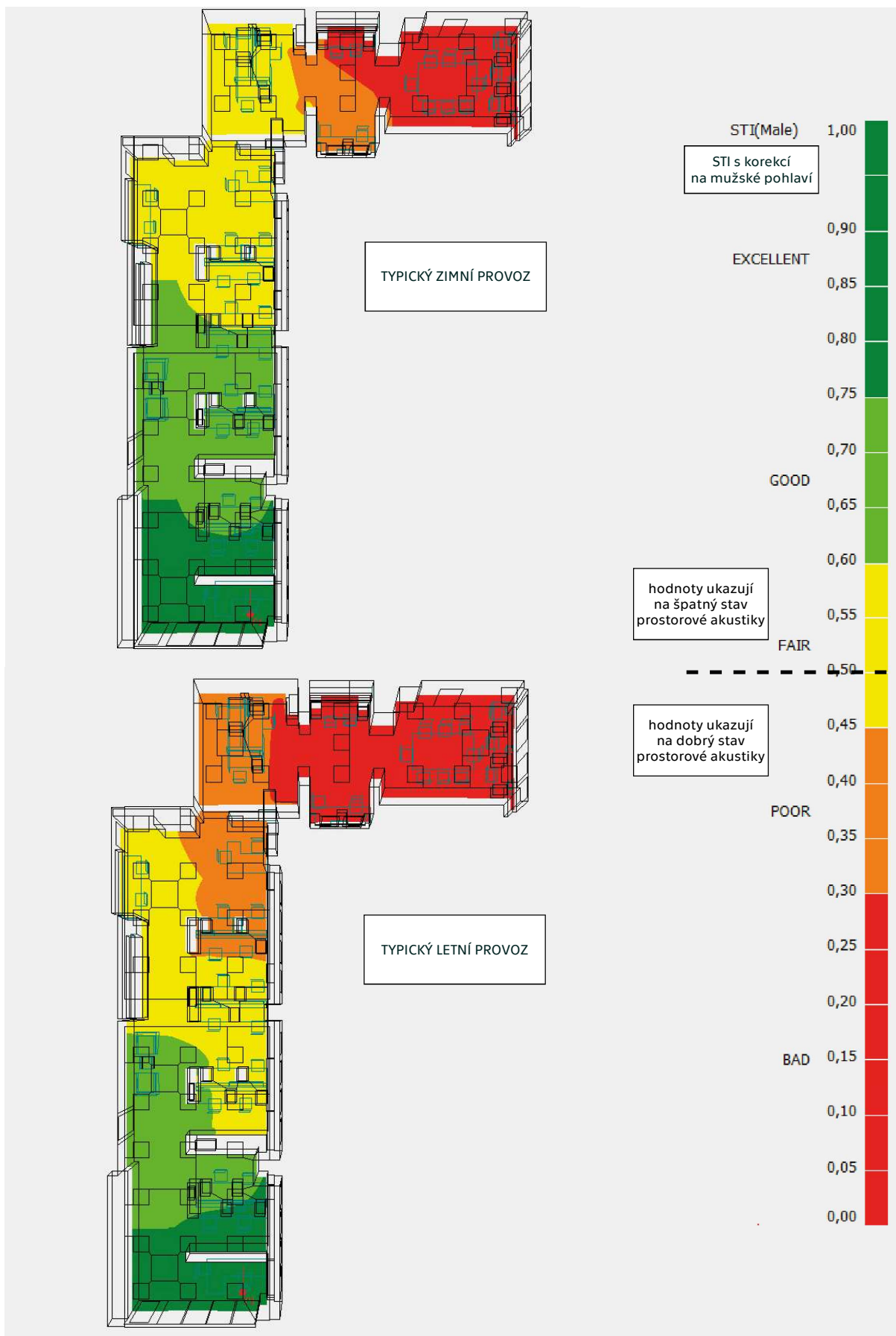
	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$STI > 0,50$ (špatný stav prostorové akustiky) $STI < 0,50$ (dobrý stav prostorové akustiky)			
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 pro typický zimní provoz	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 83 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 80 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky
Hodnocení dle ČSN EN ISO 3382-3:2022 pro orientační typický letní provoz	Hodnoty ve 100 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky	Hodnoty v 67 % výpočtových bodů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnoty v 50 % výpočtových bodů ukazují na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnoty v 71 % výpočtových bodů ukazují na špatný stav prostorové akustiky



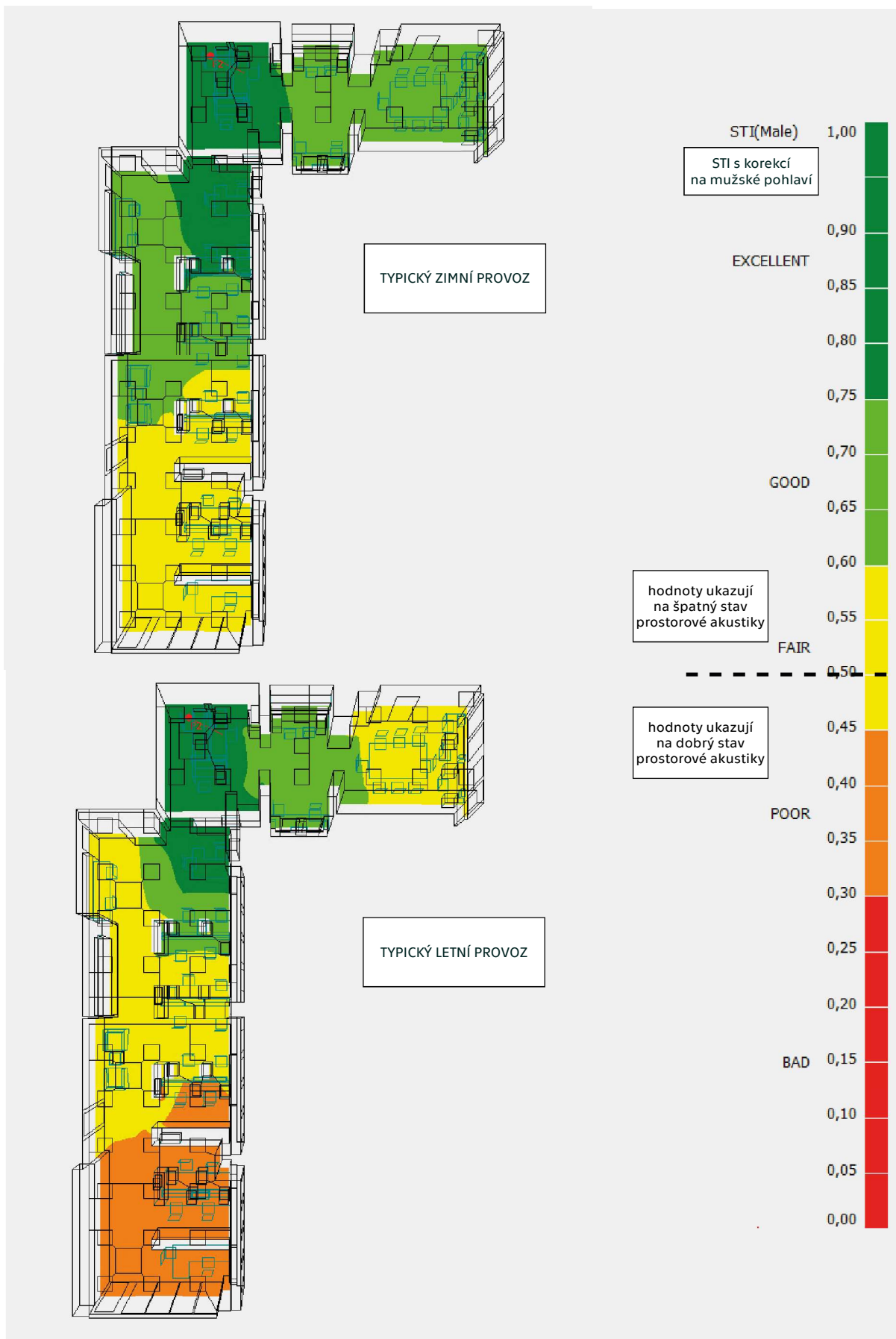
Obr. 43: Rozložení STI v kanceláři č. 1 při zapnutí zdroje zvuku na první měřicí draze



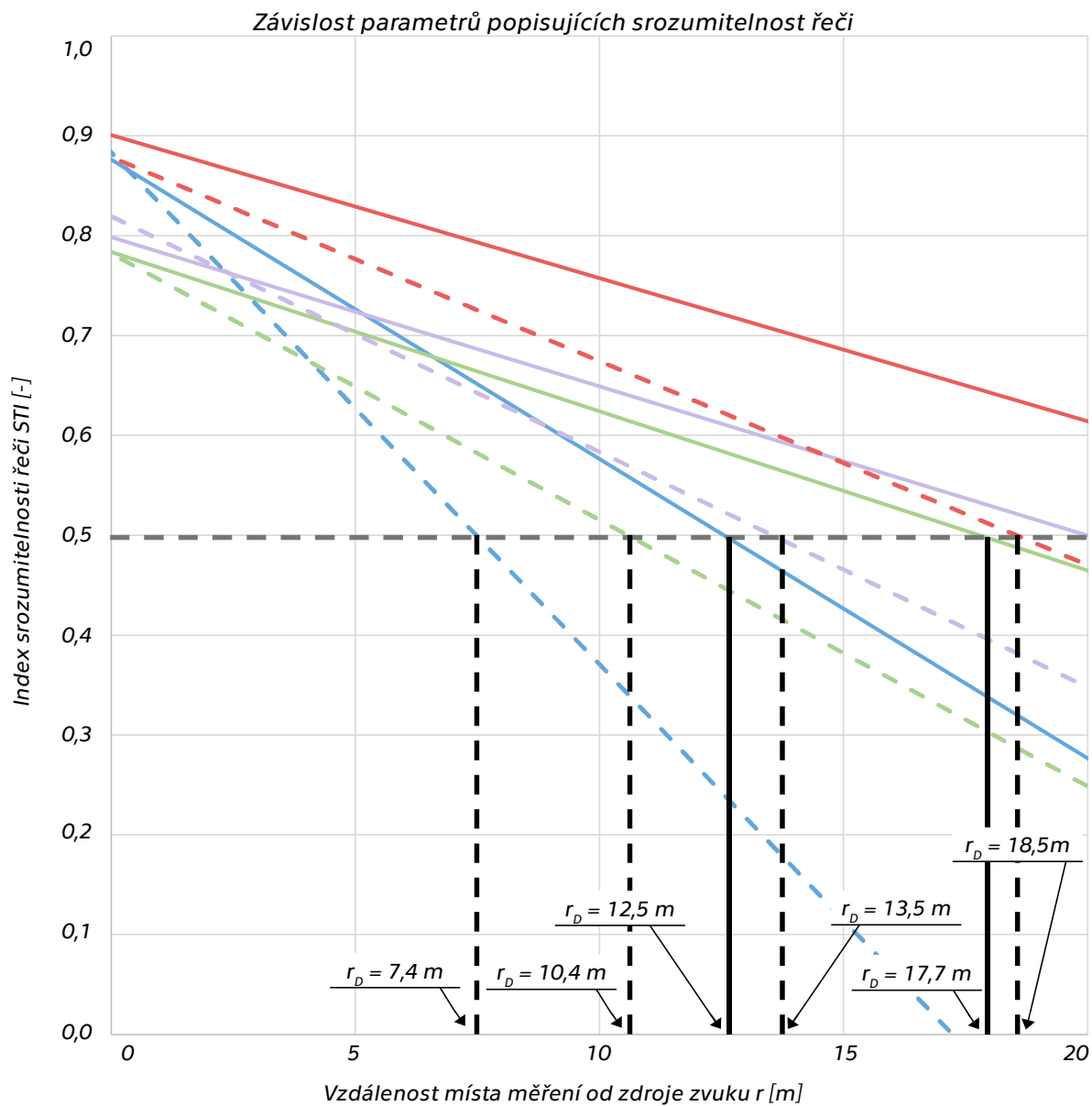
Obr. 44: Rozložení STI v kanceláři č. 1 při zapnutí zdroje zvuku na druhé měřící draze



Obr. 45: Rozložení STI v kanceláři č. 2 při zapnutí zdroje zvuku na první měřicí draze



Obr. 46: Rozložení STI v kanceláři č. 2 při zapnutí zdroje zvuku na druhé měřicí dráze



Obr. 47: Určování vzdálenosti rušení simulovaných stavů

Tab. 43: Výsledky výpočtu a hodnocení vzdálenosti rušení

	Kancelář č. 1		Kancelář č. 2	
	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2	měřicí dráha 1	měřicí dráha 2
Obvyklé jednočíselné hodnoty dle ČSN EN ISO 3382-3:2022	$r_D > 11 \text{ m}$ (špatný stav prostorové akustiky) $r_D < 5 \text{ m}$ (dobrý stav prostorové akustiky)			
Vzdálenosti rušení r_D [m] zjištěná pomocí výpočtu pro typický zimní provoz	28,0	12,5	20,2	17,8
	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky
Vzdálenosti rušení r_D [m] zjištěná pomocí výpočtu pro orientační typický letní provoz	18,5	7,4	13,5	10,4
	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na dobrý stav prostorové akustiky	Hodnota ukazuje na špatný stav prostorové akustiky	Hodnota nespadá do uvedených rozmezí. Výsledek se víc blíží k hodnotám ukazujícím na špatný stav prostorové akustiky

Z výsledků je patrné, že při předpokládaném typickém letním provozu s chlazením vzduchu hodnoty STI a vzdálenosti rušení se výrazně snižují, což vede ke zlepšení stavu prostorové akustiky v kanceláři. Ačkoliv vzdálenost komfortu při letním provozu na žádné z měřicích drah přímo neukazuje na dobrý stav prostorové akustiky ve všech zónách dochází ke zmenšení vzdálenosti rušení cca o 5 až 10 m. Lze tedy konstatovat, že provoz mírně hlučných zařízení pro větrání, vytápění či chlazení kanceláře může výrazně zlepšit prostorovou akustiku místnosti.

Vzhledem k rozdílům výsledných hodnot lze také usoudit, že v případě, kdy dopředu je známo, že stacionární zdroje hluku v interiéru otevřené kanceláře nebudou v provozu celou pracovní dobu anebo celoročně je vhodné aspoň ověřit akustický stav prostoru bez těchto zařízení, jelikož je pravděpodobné, že se bude velmi lišit od stavu s provozem stacionárních zdrojů hluku.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo komplexní seznámení s parametry prostorové akustiky v kancelářích otevřeného typu. Primárním směrodatným podkladem bylo nové vydání normy ČSN ISO EN 3382-3 [5], která definuje způsoby měření těchto veličin.

Diplomovou práci lze v celku rozdělit na tři základní části. Na teoretickou část, ve které jsem se zabývala zkoumáním existujících požadavků a způsobů měření jednotlivých veličin. Druhá část, dle osobního pocitu největší a nejzásadnější, se týkala praktického vyzkoušení měření jednotlivých parametrů a jejich jak individuální, tak i celkové hodnocení. Měření se prováděly ve dvou kancelářských prostorech otevřeného typu ve dvou fázích. V první fázi probíhalo měření doby dozvuku, požadavky na kterou nejsou v České republice závazné, ale vybrané certifikační nástroje je také uvádí. V druhé fázi již probíhalo měření parametrů prostorové akustiky uvedených v normě ČSN EN ISO 3382-3 [5]. Jako doplnění k měřením pro ověření možností výpočtového programu v třetí části diplomové práce byla provedena výpočtová simulace zvolených prostorů. Modelování pomohlo porovnat měřený a simulovaný stav a také ověřit vliv hluku pozadí na prostorovou akustiku v kancelářích otevřeného typu.

Porovnání výpočtem stanovených a změřených hodnot prokázalo, že parametry prostorové akustiky, popisující změnu hladiny akustického tlaku v prostoru, se navzájem jen mírně liší. Kromě toho vzhledem ke způsobu hodnocení parametrů prostorové akustiky dle ČSN EN ISO 3382-3 [5] s hodnotami ukazujícími buď na dobrý nebo na špatný stav prostorové akustiky výsledné slovní hodnocení parametrů popisujících změnu hladiny akustického tlaku v prostoru jak při měření tak i při simulaci téměř vždycky ukazuje na stejný stav akustiky prostoru. Parametry prostorové akustiky popisující srozumitelnost řeči v prostoru se dost liší při porovnání změřených a výpočtem stanovených hodnot. ČSN EN ISO 3382-3 [5] v informativní příloze D uvádí, že směrodatná odchylka reprodukovatelnosti vzdálenosti rušení (která reprezentuje vzdálenost od zdroje zvuku, ve které index srozumitelnosti řeči klesá pod hodnotu 0,5, což ukazuje na dobrý stav akustiky prostoru) tvoří až $\pm 21\%$, avšak velký rozdíl hodnot mezi změřeným a simulovaným stavem nechává prostor na budoucí zkoumání tohoto parametrů a způsobů jeho měření. Vzhledem k tomu, že index srozumitelnosti řeči není v praxi velmi často hodnocen (také se jedná se o poměrně novou veličinu) a přitom představuje velice důležitý parametr pro velké množství druhů prostoru zkoumáním STI bych se ráda zabývala ve své budoucí profesní činnosti.

Velký rozsah diplomové práce, spojený se zkoumáním neznámých parametrů, různých způsobů měření a vzájemných závislostí odlišných veličin také ponechal prostor pro zkoumání možností optimalizace návrhu pohltivých úprav v kancelářích otevřeného typu z hlediska parametrů prostorové akustiky podle ČSN EN ISO 3382-3 [5], které dle zkoumání svým objemem je minimálně odpovídající rozsahu této diplomové práce.

Provedené měření navíc umožnilo porovnat subjektivní vnímání prostorové akustiky v kanceláři č. 1. Výsledky měření podporují subjektivní vjem prostoru jako „spíše přetlumeného“ a potvrzují, že nejčastější akustické úpravy ve formě širokopásmového obkladu stropu nejsou vždycky nejvhodnější pro prostor, ve kterém se nachází větší množství osob.

Výsledky měření také prokázaly, že v tak velkých prostorech přítomnost 20 až 50 osob nemá téměř žádný vliv na výsledné hodnoty doby dozvuku, hlavně oproti plochám jiných všepohlcujících objektů. Ostatní parametry prostorové akustiky se hodnotí pro obsazený prostor.

ZDROJE

- [1] ČSN EN 12354-6: *Stavební akustika - Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků – Část 6: Zvuková pohltivost v uzavřených prostorech*. Praha: ČNI. Červen 2004.
- [2] ČSN EN ISO 18233 : *Akustika - Aplikace nových akustických metod měření stavebních konstrukcí, v budovách a v místnostech*. Praha: ČNI. Listopad 2006.
- [3] ČSN EN ISO 3382-1: *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: ÚNMZ. Prosinec 2009.
- [4] ČSN EN ISO 3382-2: *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: ÚNMZ. Únor 2009.
- [5] ČSN EN ISO 3382-3: *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 3: Otevřené kanceláře*. Praha: ÚNMZ. Listopad 2022.
- [6] ČSN EN ISO 3382-3: *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 3: Otevřené kanceláře*. Praha: ÚNMZ. Červenec 2022.
- [7] ČSN EN ISO 3382-3: *Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 3: Otevřené kanceláře*. Praha: ÚNMZ. Srpen 2012.
- [8] ČSN EN ISO 3740: *Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku - Pokyny pro použití základních norem*. Praha: ÚNMZ. Duben 2021.
- [9] ČSN EN IEC 60268-16: *Elektroakustická zařízení - Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*. Praha: ÚNMZ. Červen 2021.
- [10] ČSN 73 0527: *Akustika - Projektování v oboru prostorové akustiky - Prostory pro kulturní účely - Prostory ve školách - Prostory pro veřejné účely*. Praha: ČNI. Březen 2005.
- [11] JIŘÍČEK, Ondřej: *Úvod do akustiky*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1. Počet stran: 146.
- [12] KAŇKA, Jan; NOVÁČEK, J.: *Stavební fyzika 3 – Akustika pozemních staveb*. Praha: ČVUT, 2015. ISBN 978-80-01-05674-5. Počet stran: 130.
- [13] *TZB-info [online]*: [cit. 2022-12-15]. Dostupné na <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/214-fyziologicke-vymezeni-zvuku>
- [14] *TZB-info [online]*: [cit. 2022-12-15]. Dostupné na <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/222-sireni-zvuku-ve-volnem-prostoru-volne-zvukove-pole>
- [15] *Státní zdravotní ústav [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://szu.cz/tema/zivotni-prostredi/hluk>
- [16] *Ministerstvo zdravotnictví České republiky [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://www.mzcr.cz/nepriznive-ucinky-hluku-na-cloveka/>
- [17] *Leesman index [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://www.leesmanindex.com/wp-content/uploads/2022/11/Leesman-Impact-Code-Office-30.09.22.pdf>

- [18] *Leesman index [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://www.leesmanindex.com/media/Leesman-EwX-P2-Second-Digital-Edition.pdf>
- [19] *Ecophon [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://www.ecophon.com/contentassets/87171641048f438689fa42a06c33c973/>
- [20] *SBToolCZ [online]*: [cit. 2022-11-23]. Dostupné na <https://www.sbtool.cz/kriterium/s-aku-akusticky-komfort-ab-vk-1/>
- [21] *BREAM [online]*: [cit. 2022-11-23]. Dostupné na https://files.bregroup.com/breem/technicalmanuals/BREEAMInt2016SchemeDocument/#05_health/hea_05.htm#hea05_Reverberation_times_for_speech_and_music_rooms
- [22] *WELL [online]*: [cit. 2022-11-23]. Dostupné na <https://standard.wellcertified.com/comfort/reverberation-time>
- [23] *LEED [online]*: [cit. 2022-11-23]. Dostupné na <https://www.usgbc.org/credits/new-construction-data-centers-new-construction-hospitality-new-construction-warehouse-and--1?return=/credits/New%20Construction/v4.1>
- [24] *Wikipedia [online]*: [cit. 2022-11-23]. Dostupné na https://en.wikipedia.org/wiki/Speech_transmission_index
- [25] *Odeon [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://odeon.dk/download/Version17/OdeonManual.pdf>
- [26] *Odeon [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na https://odeon.dk/pdf/Application_note_ISO-3382-3_Offices.pdf
- [27] *Odeon [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na https://odeon.dk/pdf/Application_note_ISO-3382-3_Offices_Measurements.pdf
- [28] *Ecophon [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na <https://www.ecophon.com/contentassets/87171641048f438689fa42a06c33c973/>
- [29] *Acoustic.ua [online]*: [cit. 2022-12-28]. Dostupné na https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf
- [30] Program Odeon 15.16 Auditorium pro výpočet a měření prostorové akustiky [software]
- [31] Program SketchUp pro tvorbu 3D modelů [software]
- [32] Program AutoCAD pro tvorbu pomocných výkresů [software]