



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

**Modelování akustických situací s ohledem na srozumitelnost  
evakuačního ozvučení v tunelech**

**Acoustic Modelling of Tunnels for Intelligibility Analysis**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

**Pavla Hudcová**  
**Praha 2018**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	<b>Hudcová</b>	Jméno: <b>Pavla</b>	Osobní číslo: <b>434703</b>
Fakulta/ústav:	<b>Fakulta elektrotechnická</b>		
Zadávací katedra/ústav:	<b>Katedra radioelektroniky</b>		
Studijní program:	<b>Komunikace, multimédia a elektronika</b>		
Studijní obor:	<b>Multimediální technika</b>		

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Modelování akustických situací s ohledem na srozumitelnost evakuačního ozvučení v tunelech**

Název bakalářské práce anglicky:

**Acoustic Modelling of Tunnels for Intelligibility Analysis**

Pokyny pro vypracování:

Rozeberte problematiku šíření zvukových vln v tunelech se zaměřením na hlasový informační signál a jeho srozumitelnost. V programu EASE simulujte situace odpovídající reálným situacím a navrhnete umístění reproduktorů pro zajištění potřebné srozumitelnosti.

Seznam doporučené literatury:

[1] Kolmer, F., Kyncl, J.: Prostorová akustika, SNTL/Alfa 1980  
[2] Škvor, Z.: Akustika a elektroakustika, Academia 2003

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Dr. Ing. Libor Husník, katedra radioelektroniky FEL**

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

\_\_\_\_\_

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2018**      Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

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

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

# PROHLÁŠENÍ

---

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

V Praze dne

---

Podpis autorky práce

## PODĚKOVÁNÍ

---

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce Dr. Ing. Liboru Husníkovi za cenné rady a pomoc při vypracování této práce. Zároveň bych chtěla poděkovat Ing. Jiřímu Rajmanovi, Ph. D. za možnost pracovat v programu EASE ve firmě Honeywell a za trpělivost a připomínky při vytváření akustické studie. Dále velmi oceňuji ochotu zaměstnanců firmy AVT Group, kteří mi byli oporou během seznamování se s programem EASE.

V neposlední řadě děkuji svému partnerovi a své rodině za podporu při psaní práce.



## ABSTRAKT

---

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou srozumitelnosti bezpečnostních hlášení v tunelu. Tunel je obtížné akustické prostředí, a to jak z hlediska doby dozvuku, tak úrovně hluku okolí. Evakuační rozhlas musí splňovat přísné požadavky, aby byl za jakékoliv situace srozumitelný. Cílem práce je vypracování akustické studie pro jeden z pražských pěších tunelů v programu EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers). V práci je uvedena teorie prostorové akustiky. Součástí vypracování studie je i orientační měření hodnot, na kterých je vypracování studie závislé, jako je např. vlhkost a hlučnost prostředí. Studie obsahuje porovnání některých používaných reproduktorů a je vypracována jak pro situaci bez jakýchkoliv úprav prostředí, tak pro situaci, během které by došlo k úpravě prostoru akustickým materiálem, který výrazně zlepší akustické podmínky v tunelu.

Klíčová slova: Akustická studie, prostorová akustika, pohlcování zvuku, činitel zvukové pohltivosti, doba dozvuku, srozumitelnost bezpečnostních hlášení, evakuační rozhlas, STI

## ABSTRACT

---

This bachelor thesis deals with the intelligibility of security announcements in the tunnels. The tunnel is a difficult acoustic space, both in terms of the reverberation time and the level of ambient noise. Voice evacuation system must fulfill strict requirements to make it intelligible in every situation. The goal of the work is to create an acoustic study for one of the Prague pedestrian tunnels in EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers). The thesis deals with theory of spatial acoustics. Part of the study comprises also an indicative measurement of the values on which is the study dependent such as humidity and background noise. The study includes a comparison of some of loudspeakers and is developed for both a situation without any space adjustment and a situation where the space will be adjusted by an acoustic material that will improve the acoustic conditions in the tunnel significantly.

Key words: Acoustic study, room acoustics, sound absorption, sound absorption coefficient, reverberation time, intelligibility of security announcements, Voice evacuation system, STI

# OBSAH

---

Úvod .....	13
1 Fyziologická akustika .....	15
1.1 Citlivost sluchového orgánu .....	15
1.2 Sluchové pole .....	16
1.3 Maskování .....	16
2 Zvuk ve volném prostoru.....	17
2.1 Bodový zdroj.....	17
2.2 Kulová vlna v poloprostoru .....	17
2.3 Útlum zvuku ve vzduchu .....	17
3 Zvuk v uzavřeném prostoru.....	18
3.1 Vlnová akustika.....	18
3.2 Geometrická akustika.....	19
3.2.1 Odraz zvuku od rovinných ploch .....	19
3.2.2 Odraz zvuku od křivých ploch.....	19
3.3 Statistická akustika .....	20
3.3.1 Dozvuk .....	20
3.3.2 Činitel zvukové pohltivosti .....	21
3.3.3 Výpočet hladiny akustického tlaku v dané vzdálenosti .....	21
4 Typy reproduktorů .....	22
4.1 Elektrodyamický přímovyzářující reproduktor.....	22
4.2 Elektrodyamický tlakový reproduktor.....	23
5 Zvukovody .....	24
5.1 Válcový zvukovod .....	24
5.2 Exponenciální zvukovod .....	24
5.3 Kuželový zvukovod .....	25
5.4 Reentrantní zvukovod .....	25
6 Parametry reproduktoru .....	26
6.1 Frekvenční charakteristika .....	26
6.2 Kmitočtový rozsah .....	26
6.3 Směrová charakteristika .....	26
6.4 Charakteristická citlivost .....	27
6.5 Jmenovitá impedance .....	27
6.6 Standardní účinnost .....	27
7 Měření hlasitosti.....	27



8	srozumitelnost řeči.....	28
8.1	Ztráta srozumitelnosti samohlásek .....	28
8.2	Speech Transmission Index (STI) .....	28
8.3	Rapid Speech Transmission Index (RASTI) .....	30
8.4	Speech Transmission Index for Public Adress (STI-PA) .....	31
9	Podmínky v tunelu.....	32
9.1	Špatná akustika .....	32
9.2	Hluk .....	32
9.3	Zkreslení způsobené reproduktorem.....	32
9.4	Nepříznivé vlivy .....	32
10	Žižkovský tunel .....	33
10.1	Modelování v programu Autodesk AutoCAD .....	34
10.2	Měření v tunelu.....	34
10.2.1	Měření hluku .....	34
10.2.2	Měření vlhkosti.....	35
10.2.3	Měření teploty.....	36
10.3	Modelování v programu EASE.....	37
10.3.1	Poslechové hladiny.....	37
10.3.2	Absorpční koeficienty stěn.....	37
10.3.3	Doba dozvuku.....	40
10.4	Výběr reproduktorů .....	41
10.4.1	Reproduktor DK 30/T - EN54.....	41
10.4.2	Reproduktor DK - MH 30/T PLUS - EN54.....	42
10.4.3	Reproduktor TH – 100 - EN54 .....	44
10.5	Simulace v ease .....	46
10.5.1	Simulace s reproduktorem DK – MH 30/T PLUS - EN54.....	46
10.5.2	Simulace s reproduktorem DK 30/T - EN54.....	50
10.5.3	Simulace s reproduktorem TH – 100 - EN54 .....	55
11	Závěr.....	59
12	Zdroje / použitá literatura .....	60

## SEZNAM OBRÁZKŮ

---

Obrázek 1 Příklady hladin hluku [35] .....	15
Obrázek 2 Závislost činitele útlumu na kmitočtu a relativní vlhkosti vzduchu pro teplotu +20 °C [4] .....	17
Obrázek 3 Konstrukce zvukového paprsku při odrazu od rovinné stěny [4].....	19
Obrázek 4 Konstrukce odrazu zvukových paprsků a čela vlny od vyduté stěny [4] .....	19
Obrázek 5 Grafické znázornění doby dozvuku [12].....	20
Obrázek 6 Řez elektrodynamickým přímo vyzařujícím reproduktorem [5] .....	22
Obrázek 7 Uspořádání elektrodynamického tlakového reproduktoru [5].....	23
Obrázek 8 Řez exponenciálním zvukovodem [5] .....	24
Obrázek 9 Řez kuželovým zvukovodem [5].....	25
Obrázek 10 Řez zvukovodem reentrantního reproduktoru [5].....	25
Obrázek 11 Závislost směrové charakteristiky na frekvenci [13] .....	26
Obrázek 12 Princip výpočtu STI [20].....	29
Obrázek 13 Výpočet STI zohledňuje všech 14 modulačních frekvencí a všech 7 oktávových pásem [22] .....	29
Obrázek 14 Porovnání hodnot STI a CIS [22].....	30
Obrázek 15 Výpočet RASTI zohledňuje 9 různých modulačních frekvencí v pásmech 2 oktáv [22] 30	
Obrázek 16 Metoda STI-PA, kde pásmo 125 Hz a 250Hz je zkombinováno a žlutě označené modulační kmitočty nejsou brány v úvahu [22] .....	31
Obrázek 17 Žižkovský tunel .....	33
Obrázek 18 Umístění žižkovského tunelu [28] .....	33
Obrázek 19 Model tunelu v programu AutoCAD .....	34
Obrázek 20 Přístroj pro měření hluku .....	34
Obrázek 21 Hladina intenzity zvuku měřená při průchodem Žižkovským tunelem.....	35
Obrázek 22 Relativní vlhkost vzduchu měřená při průchodu Žižkovským tunelem.....	35
Obrázek 23 Teplota vzduchu měřená při průchodu Žižkovským tunelem.....	36
Obrázek 24 Model tunelu importovaný do programu EASE .....	37
Obrázek 25 Absorpční koeficient betonu.....	38
Obrázek 26 Absorpční koeficient pro ABSORBER.....	38
Obrázek 27 Absorpční koeficient Fireproof Acoustic Panels [32] .....	38
Obrázek 28 Absorpční koeficient pro TECTUM109 .....	39
Obrázek 29 Spodní šedá část tunelu není nijak upravena, modrá část znázorňuje upravené podhledy materiálem TECTUM109 .....	39
Obrázek 30 Frekvenční průběh doby dozvuku RT v tunelu bez úpravy podhledů.....	40
Obrázek 31 Frekvenční průběh doby dozvuku RT v tunelu pro upravené podhledy.....	40
Obrázek 32 Reproduktor DK 30/T - EN54 [33] .....	41
Obrázek 33 Frekvenční charakteristika reproduktoru DK 30/T - EN54 [33].....	41
Obrázek 34 Vyzařovací charakteristika reproduktoru DK 30/T - EN54 [33].....	42
Obrázek 35 Reproduktor DK – MH 30/T PLUS – EN54 [33].....	42
Obrázek 36 Frekvenční charakteristika reproduktoru DK - MH 30/T PKUS - EN54 [33] .....	43
Obrázek 37 Vyzařovací charakteristika reproduktoru DK MK 30/T - EN54 pro horizontální (nahore) a vertikální (dole) směr [33] .....	43
Obrázek 38 Reproduktor TH – 100 – EN54 [33] .....	44
Obrázek 39 Úzce směrový profil reproduktoru eliminuje nežádoucí odrazy [25] .....	44
Obrázek 40 Frekvenční charakteristika reproduktoru TH – 100 – EN54 [33] .....	45
Obrázek 41 Vyzařovací charakteristika v horizontálním směru reproduktoru TH - 100 - EN54 [33]45	

Obrázek 42 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54 .....	46
Obrázek 43 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54 .....	47
Obrázek 44 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK – MH 30/T PLUS - EN54.....	47
Obrázek 45 Distribuční rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK - MH 30/T PUS - EN54.....	47
Obrázek 46 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI s upravenými pohledy, repro DK – MH 30/T – PLUS – EN54 .....	48
Obrázek 47 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI s upravenými pohledy, repro DK - MH 30/T – PLUS – EN54 .....	48
Obrázek 48 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu s upravenými pohledy, repro DK – MH 30/T – PLUS EN54.....	49
Obrázek 49 Distribuční rozdělení parametru Total SPL s upravenými pohledy, repro DK - MH 30/T – PLUS – EN54 .....	49
Obrázek 50 Frekvenční závislost parametru Total SPL, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54 .....	49
Obrázek 51 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T – EN54 .....	50
Obrázek 52 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T - EN54 .....	50
Obrázek 53 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T - EN54 .....	51
Obrázek 54 Distribuční rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T - EN54 .....	51
Obrázek 55 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na strop tunelu .....	52
Obrázek 56 Distribuční rozložení parametru Total SPL při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na strop tunelu .....	52
Obrázek 57 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na stěnu tunelu .....	53
Obrázek 58 Distribuční rozložení parametru Total SPL při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na stěnu tunelu .....	53
Obrázek 59 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 15 m na stěnu tunelu .....	54
Obrázek 60 Distribuční rozložení parametru Total SPL při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 15 m na stěnu tunelu .....	54
Obrázek 61 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI bez upravených pohledů, repro TH - 100 - EN54 .....	55
Obrázek 62 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54.....	55
Obrázek 63 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54 .....	56
Obrázek 64 Distribuční rozložení parametru Total SPL bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54 .....	56
Obrázek 65 Frekvenční závislost parametru Total SPL bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54 .....	56

Obrázek 66 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI s upravenými podhledy, repro TH – 100 - EN54 .....	57
Obrázek 67 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI s upravenými podhledy, repro TH – 100 - EN54 .....	57
Obrázek 68 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL s upravenými podhledy, repro TH – 100 - EN54 .....	58
Obrázek 69 Distribuční rozložení parametru Total SPL s upravenými podhledy, repro TH – 100 - EN54 .....	58
Obrázek 70 Frekvenční závislost parametru Total SPL s upravenými podhledy, repro TH – 100 - EN54 .....	58

## ÚVOD

---

Sociální, hygienická a ekologická vyspělost, tvoří základní předpoklady pro spokojený život v zastavěných oblastech. Podzemní prostor hraje v tomto ohledu důležitou roli, ať už se jedná o snížení znečištění nebo hluku, efektivní využití prostoru, hospodářský rozvoj, zachování životního prostředí, veřejného zdraví nebo bezpečnosti. V těchto oblastech nabízí podzemní výstavba řadu výhod.

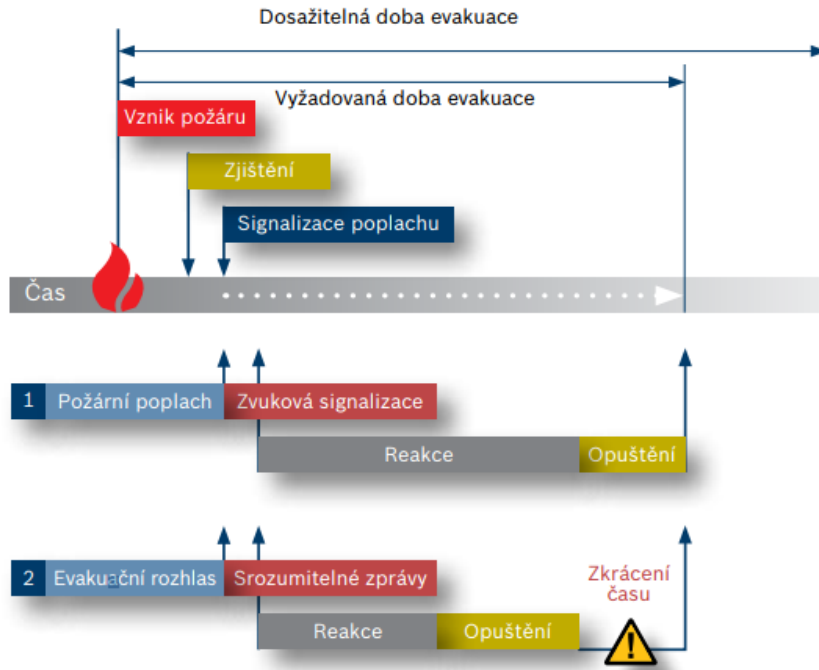
Tunely poskytují bezpečné, environmentálně šetrné, rychlé a nenápadné městské hromadné přepravní systémy. Městské silniční tunely odstraňují vozidla z povrchových ulic, dopravní hluk je tedy v městě snížen, vzduch je méně znečištěný a ulice na povrchu mohou být částečně využity k jiným účelům. Podzemní parkoviště a nákupní střediska v centrech měst poskytují prostor pro rekreační plochy a dětská hřiště nad zemí.

Dopravní tunely ale nejsou důležité jen pro města, často také slouží pro překročení přírodních překážek, jako jsou pohoří, řeky nebo dokonce úžiny.

Po několika dramatických nehodách v silničních tunelech v letech 1999 až 2001 se lidé začali více zajímat o bezpečnost v tunelech [1]. Od té doby bylo zahájeno mnoho iniciativ na národních, evropských a mezinárodních úrovních. Zajištění bezpečnosti v tunelu se stalo klíčové pro jeho používání.

Důležitou součástí zabezpečení v případě nebezpečí je evakuační rozhlas, se kterým se setkáváme na každém místě, kde se akumuluje větší množství lidí – ať už v obchodním domě, na letišti, ve firmě či právě v tunelu na silnici. Směrnice evropského parlamentu a rady 2004/54/ES ze dne 29. dubna 2004 o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě uvádí, že pro tunely delší, než 1000 m je třeba zajistit přenos rozhlasového vysílání pro záchranné služby [2]. V České republice se této problematice věnuje především norma ČSN EN 60849.

Aby měl evakuační rozhlas smysl, je potřeba, aby bezpečnostní hlášení bylo srozumitelné. Poskytování srozumitelných a pochopitelných zpráv totiž zkracuje dobu, kterou osoby nacházející se v nebezpečí potřebují k tomu, aby rozpoznaly, že nastala nouzová situace. Pokud je použita pouze požární signalizace, prodlužuje se doba, během které veřejnost pochopí, co se děje a dokáže na situaci adekvátně reagovat. Navíc u evakuačního rozhlasu mohou být udávány konkrétní pokyny k evakuaci např. od hasičského sboru.



Obrázek 1 Zkrácení doby reakce při použití evakuačního rozhlasu [3]

Každý prostor má jiné akustické vlastnosti v závislosti na jeho velikosti, tvaru a na materiálu, který tvoří stěny. Proto je třeba ke každému prostoru přistupovat při navrhování evakuačního systému individuálně a pro každý prostor vytvořit akustickou studii, která bude všechny parametry ovlivňující akustiku daného konkrétního prostoru zohledňovat. V tunelu navíc pracujeme s netypickým akustickým prostředím zatíženým velkým hlukem. Ve své bakalářské práci pracuji s programem EASE, který umožňuje modelování akustických studií a je tedy možné v něm navrhnout evakuační rozhlas pro tunel tak, aby byla zajištěna jeho srozumitelnost po instalaci.

Abychom byli schopni vytvořit kvalitní akustickou studii je třeba pochopit, jak funguje lidské vnímání zvuku a co jej ovlivňuje. Dále je třeba se seznámit se základy šíření zvuku ve volném i uzavřeném prostoru, se základními typy reproduktorů, které se pro dané účely používají a s jejich nejdůležitějšími parametry. Tomuto seznámení se věnuji v teoretické části práce.

Dále je část teoretické práce zaměřena na objektivní metody, které se používají pro měření srozumitelnosti zvuku.

Praktickou částí práce je vypracování akustické studie pro pěší Žižkovský tunel v programu EASE. Jedná se snad o neznámější a nejpoužívanější pěší tunel v Praze, který denně využívá mnoho lidí při cestě mezi Žižkovem a Karlínem. V tomto tunelu není evakuační rozhlas doposud nijak řešen, a proto se pro studii nabízí. V rámci studie jsou porovnávány tři venkovní reproduktory firmy ic audio. Studie je vypracována jak pro situaci bez jakýchkoliv úprav uvnitř tunelu, tak také pro situaci, ve které by došlo k úpravě pohledů akustickým materiálem.

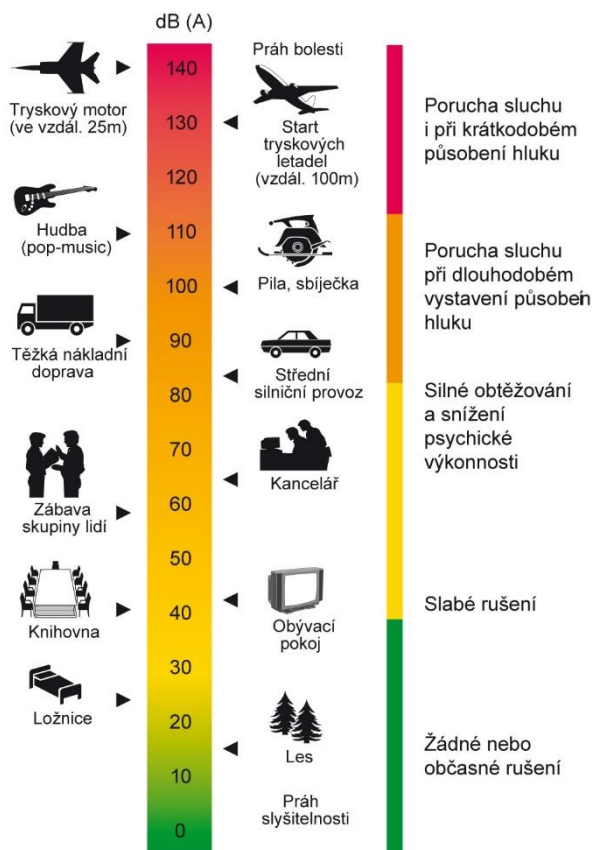
# 1 FYZIOLOGICKÁ AKUSTIKA

Abychom správně pochopili lidské vnímání zvuku, musíme se seznámit s funkcí lidského ucha. Sluch patří v tomto případě k zásadnímu smyslu, který je potřeba pro vnímání evakuačního rozhlasu. Lidské ucho se skládá ze tří částí – tvoří jej zevní ucho, střední a vnitřní ucho. Ve sluchovém orgánu se postupně přeměňují přijímané akustické kmity na mechanické a následně na nervové impulsy.

## 1.1 CITLIVOST SLUCHOVÉHO ORGÁNU

Díky sluchu můžeme tedy vnímat podélné kmitání molekul v okolním prostoru a interpretovat jej jako zvuk. Lidské ucho vnímá zvuky s frekvencí přibližně od 16Hz do 16kHz [4]. Tento rozsah je ale velmi individuální a mění se s věkem. Zatímco u dětí je horní hranice rozsahu až kolem 20kHz s přibývajícím věkem velmi rychle klesá. Každý jedinec má navíc jinou odolnost vůči poškození sluchu hlukem. Jde především o vrozenou vlastnost, na které se pak dále během života podílí další faktory, jako jsou např. infekční onemocnění [5]. Ve dnešní civilní společnosti má také velký vliv prostředí a hluk, ať už dopravní, pracovní a také chemizace a znečišťování ovzduší [5].

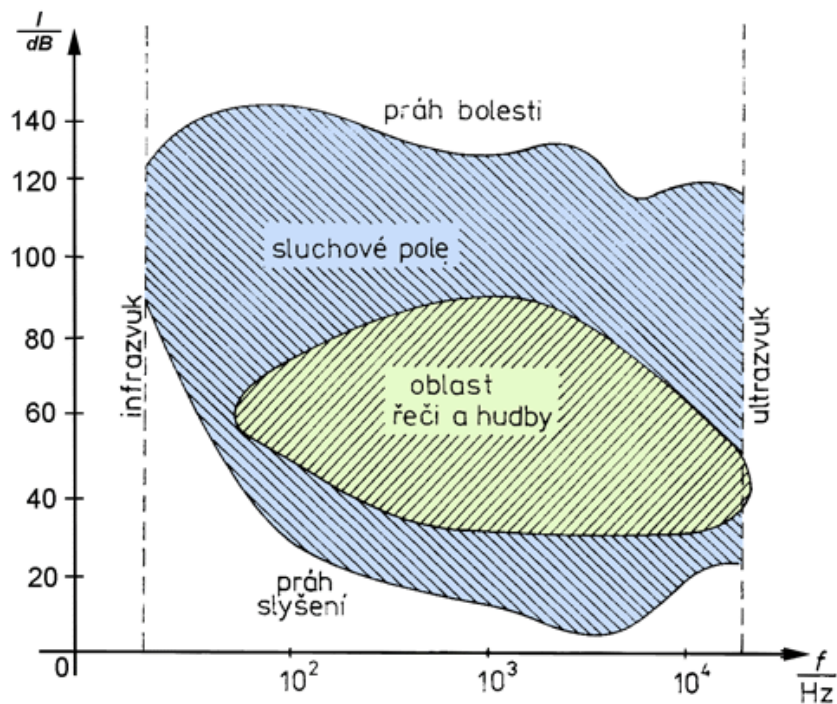
Při zpracování zvukových podnětů dochází k určitým zkreslení, zejména v převodní části sluchového orgánu a při převodu mechanického podnětu v nervový vzruch ve vnitřním uchu, dále při analýze a syntéze v mozkové kůře. K dalšímu zkreslení dochází eventuálním potlačováním nebo rušením jednoho děje dějem druhým, tzv. maskováním, nebo adaptací a únavou sluchového orgánu. Proto se obraz zvuku, který je podáván sluchovými orgány nekryje přesně s vlastnostmi akustického podnětu. Nicméně je možno nalézt k fyzikálním hodnotám odpovídající pojmy fyziologické [4].



Obrázek 1 Příklady hladin hluku [35]

## 1.2 SLUCHOVÉ POLE

Oblast sluchu zdola ohraničenou prahem slyšitelnosti a shora prahem bolesti nazýváme sluchovým polem. Práh slyšení představuje nejmenší intenzitu zvuku, kterou naše ucho dokáže zachytit. Práh bolesti je naopak intenzita, která začíná způsobovat bolest. Dále je sluchové pole ohraničené rozsahem slyšitelných frekvencí [5]. Ve sluchovém poli je označená část oblasti řeči a hudby. Křivka sluchového prahu je prohnutá směrem dolů, takže oblast největší citlivosti leží mezi tóny 3 – 4kHz [4]. Pro porozumění lidské řeči tento interval rozšiřujeme na přibližně 1 – 4kHz. V hlubokých a vysokých tónech pak citlivost rychle klesá.



Obrázek 2 Sluchové pole – grafické znázornění subjektivního vnímání závislosti hladiny intenzity zvuku na frekvenci [6]

## 1.3 MASKOVÁNÍ

Pokud přicházejí do sluchového orgánu dva zvuky současně, může dojít k tomu, že podráždění způsobené jedním z nich převládne natolik, že úplně potlačí nebo velmi zeslabí vjem druhého zvuku. Tomuto jevu říkáme maskování [4]. Zvuk, který způsobí překrytí druhého zvuku je zvuk maskující, potlačený zvuk je maskovaný. Maskování sluchových vjemů je způsobeno způsobem činnosti nervových buněk a vláken [7]. Podráždí-li se nervová buňka nebo vlákno přicházejícím vjemem, jsou po dobu několika milisekund neschopny přijmout další podráždění. Podmínkou maskování je, aby maskovaný i maskující zvuk zasáhly stejné nervové elementy [4].

Spojitý hluk obsahuje v určitém kmitočtovém oboru plynule všechny kmitočty a jeho účinek na sluchový orgán zasahuje současně širokou oblast. Spojitý hluk o rovnoměrném spektru (tzv. bílý hluk) maskuje nejvíce oblast uprostřed sluchového rozsahu s maximem u kmitočtu kolem 2 – 3kHz [4].



## 2 ZVUK VE VOLNÉM PROSTORU

Ve volném otevřeném prostoru je běžně slyšitelnost zvuku horší než v místnosti. To je způsobeno ohybem zvukové vlny a také tím, že se vzdáleností od zvukového zdroje klesá intenzita. Při šíření ve volném prostoru se totiž akustický výkon  $P(W)$  rozprostírá s rostoucí vzdáleností od zdroje  $r(m)$  na čím dál tím větší plochu  $S(m^2)$ . Tím se snižuje intenzita  $I (W/m^2)$  [8].

Existuje i případ, kdy se intenzita se vzdáleností od zdroje nemění – rovinné vlnoplochy. Ty se ale ve volném prostoru prakticky nevyskytují, protože zdroj je oproti volnému prostoru malý a rovinné vlny divergují na všechny strany. Pokud je posluchač ve velké vzdálenosti od zvukového zdroje, můžeme sice kulové vlnoplochy považovat za rovinné, ale intenzita zvuku je v takovém případě už zanedbatelná.

### 2.1 BODOVÝ ZDROJ

Nejjednodušším příkladem šíření vln ve volném prostoru je šíření zvuku od bodového zdroje. Můžeme si pro tento případ představit např. letadlo letící vysoko nad zemí. Zvuk se od letadla šíří radiálně a vlnoplochy jsou kulové. Potom [9]:

$$I = \frac{dP}{dS} = \frac{P}{4\pi l^2}$$

Kde:  $P$  je akustický výkon zdroje

$l$  je vzdálenost od zdroje (vycházíme pak ze vztahu  $S = 4\pi l^2$ )

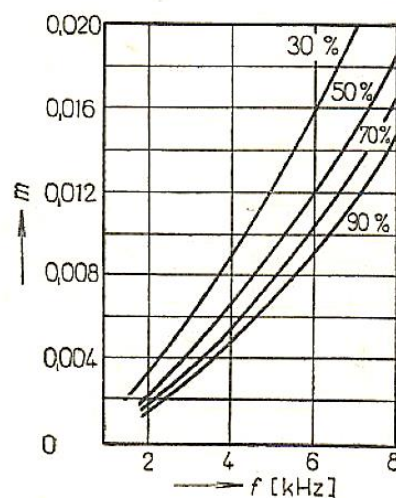
Pro takovýto bodový zdroj platí, že intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti od bodového zdroje.

### 2.2 KULOVÁ VLNA V POLOPROSTORU

Dalším příkladem šíření ve volném prostoru je šíření v polokulovém prostoru. Pro představu např. bodový zdroj zvuku, který je umístěn na velké rovné louce. V takovém případě se energie, která ze zdroje směřuje směrem k zemi odrazí nahoru a intenzita se tedy zdvojnásobí [8].

### 2.3 ÚTLUM ZVUKU VE VZDUCHU

Při šíření zvuku prostředím dochází vlivem různých činitelů k částečnému úbytku zvukové energie. Činitel útlumu  $m$  závisí na relativní vlhkosti  $\varphi$  a kmitočtu [4]. Tato závislost je pro teplotu  $+20^\circ C$  znázorněna na následujícím obrázku. Rychlost zvuku se zvyšuje s teplotou [10].



Obrázek 2 Závislost činitele útlumu na kmitočtu a relativní vlhkosti vzduchu pro teplotu  $+20^\circ C$  [4]

### 3 ZVUK V UZAVŘENÉM PROSTORU

---

V uzavřeném prostoru je mluvené slovo daleko silnější a srozumitelnější než ve volném prostoru. Důvodem je to, že zvuk od zdroje se mnohonásobně odrazí od stěn a předmětů a vyplní celý prostor akustickou energií. Ztráty únikem do prostoru jsou tedy menší než v exteriéru. Pokud se místnost vyplní energií rovnoměrně, mluvíme o tzv. homogenním akustickém poli, kterému říkáme difúzní.

#### 3.1 VLNOVÁ AKUSTIKA

V prostoru se může šířit spousta vln současně a mohou mít i různý tvar (rovinný, kulový, obecný). Při řešení vlnové rovnice je tedy třeba k příslušným souřadícím a okrajovým podmínkám přihlížet. Úplné analytické řešení je možné pouze pro jednoduché případy, kdy je situace ještě přehledná.

Například používáme řešení vlnové rovnice pro pravoúhlý kvádr o délkách hran  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_z$  (jednoduchá místnost v domě) [11]:

$$f_N = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Kde:  $c$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu v m/s

$n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  jsou celá nezáporná čísla

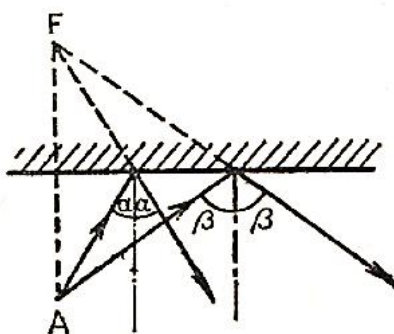
index  $u$  f značí trojici čísel  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$

$l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_z$  jsou rozměry prostoru v m

## 3.2 GEOMETRICKÁ AKUSTIKA

### 3.2.1 Odraz zvuku od rovinných ploch

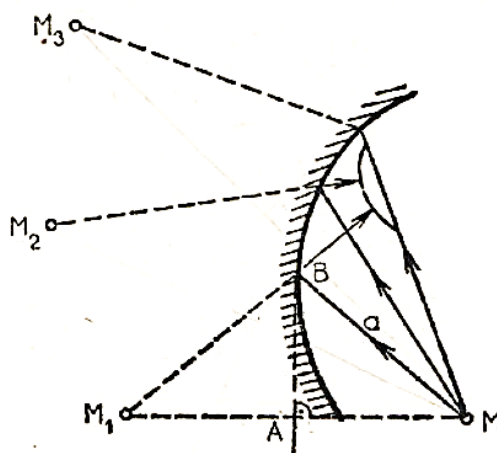
Způsob odrazu zvukových vln od rovinných ploch je naznačen na následujících obrázcích. Při konstrukci odrazů používáme tzv. zdánlivé zdroje, který je zrcadlovým zdrojem původního zdroje zvuku. Situace ale většinou není natolik jednoduchá, aby došlo k pouze jednomu odrazu zvuku. V místnostech dochází k mnohonásobným odrazům od stěn, v závislosti na pohltivosti materiálu, ze kterého je stěna vyrobena. Pro tyto mnohanásobné odrazy musíme použít zrcadlové odrazy vyšších řádů, jejichž konstrukce je čím dál tím více náročnější, a proto je vhodné použití moderních způsobů, které nabízí program EASE, který mnohačetné odrazy při simulaci zohlední.



Obrázek 3 Konstrukce zvukového paprsku při odrazu od rovinné stěny [4]

### 3.2.2 Odraz zvuku od křivých ploch

Z hlediska prostorové akustiky je rozdíl, zda se zvuk odráží od rovinné či vypuklé plochy. V tunelu se setkáváme jak s plochou rovinnou, tak s vydutou stěnou. Vyduté stěny zvukové vlny soustřeďují [4]. Takové stěny mohou při nevhodných rozměrech a zakřivení způsobit nežádoucí soustředění zvukové energie a tím zhoršit akustiku celého prostoru.



Obrázek 4 Konstrukce odrazu zvukových paprsků a čela vlny od vyduté stěny [4]

### 3.3 STATISTICKÁ AKUSTIKA

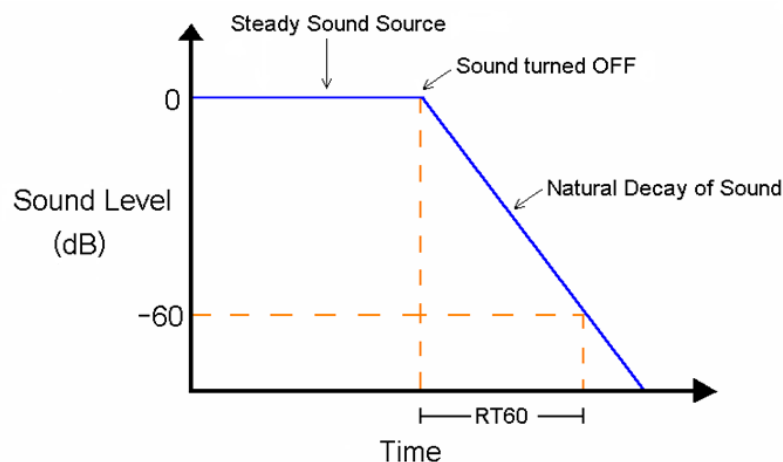
#### 3.3.1 Dozvuk

V ustáleném stavu je energie pohlcována stěnami neustále doplňována zdrojem zvuku. Jakmile zdroj zvuku vypneme, bude vlivem pohltivosti stěn energie zvukových vln ubývat, dokud nebude úplně pohlcena. Zvuk, který se šíří prostorem po vypnutí zdroje se nazývá dozvuk [8]. Doba, po kterou dozvuk existuje se nazývá dobou dozvuku.

Pro uzavřené místnosti je tento parametr při modelování akustických úprav velmi důležitý. Na základě tohoto parametru můžeme objektivně hodnotit akustické vlastnosti místnosti a jejich vliv na srozumitelnost mluveného slova.

##### 3.3.1.1 Doba dozvuku

Standardní doba dozvuku je definována jako doba, za kterou hustota energie nebo intenzita zvuku klesne na  $10^{-6}$  své původní hodnoty. Jedná se tedy o pokles hustoty energie v prostoru o 60dB [9].



Obrázek 5 Grafické znázornění doby dozvuku [12]

Univerzální hodnotu doby dozvuku není možné stanovit, protože vždy záleží na tom, k jakému účelu bude prostor využíván. Jiná hodnota doby dozvuku se jeví jako ideální pro velký koncertní sál než pro malou místnost určenou pro poslech lidské řeči.

K výpočtu doby dozvuku můžeme přistupovat několika možnými postupy.

##### 3.3.1.2 Doba dozvuku podle Sabina

W.C. Sabine předpokládal, že zvuková energie je stěnami pohlcována plynule [5].

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha S}$$

Kde:  $V$  je objem místnosti v  $m^3$ ,

$\alpha$  střední činitel pohltivosti (-),

$S$  celkový obsah ploch stěn ( $m^2$ )

Tento vztah se používá pouze pro prostory s malým činitelem pohltivosti  $\alpha$ , s rostoucí hodnotou činitele  $\alpha$  roste chyba. Teoreticky pro  $\alpha = 1$  by měla být doba dozvuku nulová, což ale podle Sabinova vztahu neplatí. Tento vztah tedy není vyhovující ve všech případech, a proto byl zaveden vzorec dle Eyringa.

### 3.3.1.3 Doba dozvuku podle Eyringa

Eyring předpokládal, že pohlcovaná energie klesá po skocích [5].

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

Kde: V je objem místnosti v m<sup>3</sup>,  
α střední činitel pohltivosti (-),  
S celkový obsah ploch stěn (m<sup>2</sup>)

V praxi se ale ukázalo, že ani tento předpoklad není úplně přesný a Eyringův vzorec nedává přesné výsledky při hodnotách činitele zvukové pohltivosti větších než 0,8 [5].

### 3.3.1.4 Doba dozvuku podle Millingtona

Jako nejvhodnější a nejpřesnější je použití vzorce doby dozvuku podle Millingtona. Ten totiž respektuje nejen vliv jednotlivých odrazů na úbytek intenzity zvuku (klesání po skocích), ale také to, že počet odrazů od jednotlivých stěn závisí na velikosti této stěny (její plochy) [5].

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

Kde: V objem místnosti v m<sup>3</sup>  
α<sub>i</sub> jsou jednotlivé příspěvky činitelů pohltivosti (-)  
S<sub>i</sub> obsah ploch materiálů pro odpovídající α<sub>i</sub> v m<sup>2</sup>

### 3.3.2 Činitel zvukové pohltivosti

Pokud nás zajímá zvuk v uzavřeném prostoru, je třeba zohlednit pohltivost stěn, které prostor obklopují. Tato pohltivost je závislá na použitém materiálu a během akustické studie prostoru je třeba tento parametr pro konkrétní materiál zohlednit.

Schopnost tělesa pohlcovat zvuk popisujeme hodnotou činitele pohltivosti α, který je definován takto [5]:

$$\alpha = \frac{I_{POH}}{I_{DOP}}$$

Kde: I<sub>POH</sub> je intenzita zvuku pohlcená akustickým materiálem  
I<sub>DOP</sub> je intenzita zvuku dopadající na tento materiál

Jedná se o bezrozměrné číslo, které nabývá hodnot od 0 do 1. U stěn, které pohlcují zvuk úplně se činitel pohltivosti rovná 1, zatímco u stěn, které zvuk dokonale odráží, mluvíme o činiteli pohltivosti rovném 0 [9].

### 3.3.3 Výpočet hladiny akustického tlaku v dané vzdálenosti

Vzorec pro výpočet hladiny akustického tlaku v dané vzdálenosti od zdroje (v přímém směru) [13]:

$$L = SPL_{(1,1)} + 10 \log P - 20 \log d$$

Kde: SPL<sub>(1,1)</sub> je citlivost reproduktoru při 1W, 1m  
P je jmenovitý příkon reproduktoru  
d je vzdálenost od zdroje

## 4 TYPY REPRODUKTORŮ

Při návrhu ozvučení prostoru je třeba zvolit správný typ reproduktoru. Žádný reproduktor neobsáhne kvalitně celé slyšitelné pásmo, protože např. pro kvalitní vyzáření hlubokých tonů musí mít membrána velké rozměry, velkou hmotnost a velkou poddajnost, zatímco pro vyzáření vysokých frekvencí musí mít naopak malé rozměry, malou hmotnost a velkou tuhost.

Reproduktory lze rozdělit například na přímovyzářující, kdy je energie vyzařována přímo membránou a nepřímovyzářující, kdy je zdroj akustického signálu spojen s vnějším prostředím zvukovodem [5].

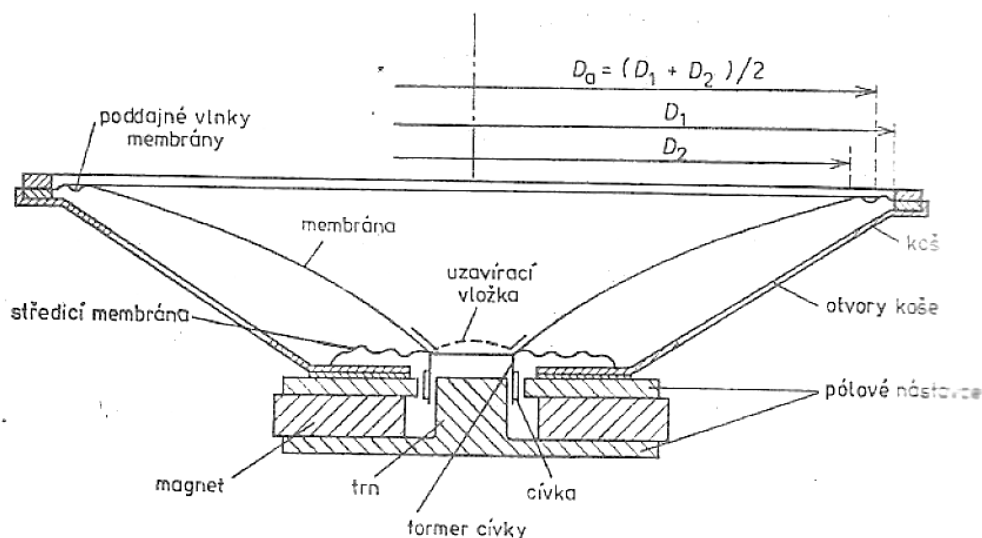
Reproduktory lze také rozdělit dle použitých elektromechanických měničů. V současné době se ale nejčastěji používají reproduktory elektrodynamické.

### 4.1 ELEKTRODYNAMICKÝ PŘÍMOVYZAŘUJÍCÍ REPRODUKTOR

Nazývá se přímovyzářující proto, že membrána je vázána s vnějším vzduchem přímo, bez pomocných zařízení. Membrána, která má obvykle tvar přibližně kuželové, ale nerozvinutelné plochy, bývá zhotovena ze speciálně připraveného impregnovaného papíru. Tento papír musí mít při malé měrné hmotnosti dostatečně velké vnitřní tření omezující vznik nežádoucích parazitních kmitů. Existují i reproduktory s membránami zhotovenými z tuhých lehčených materiálů [5].

Membrána je po obvodě opatřena poddajným okrajem, který dovoluje její axiální pohyb a současně udržuje membránu v centrální poloze. V místě nejmenšího průměru své střední části je na membránu přitmelena kmitající cívka. V místě spojení membrány a kmitající cívky je umístěno středící zařízení, udržující osu kmitacího systému ve stálé poloze [5].

Drát kmitací cívky je umístěn v magnetickém poli vyvolaném permanentním magnetem a správně nasměrovanými pólovými nástavci. Na tuto cívku, kterou protéká proud, působí síla  $F = Bli$  - vzhledem k orientaci vektorů  $F$ ,  $B$ ,  $I$  je součin maximální [5]. Tato síla se pak přenáší na membránu a způsobuje její pohyb.



Obrázek 6 Řez elektrodynamickým přímovyzářujícím reproduktorem [5]

## 4.2 ELEKTRODYNAMICKÝ TLAKOVÝ REPRODUKTOR

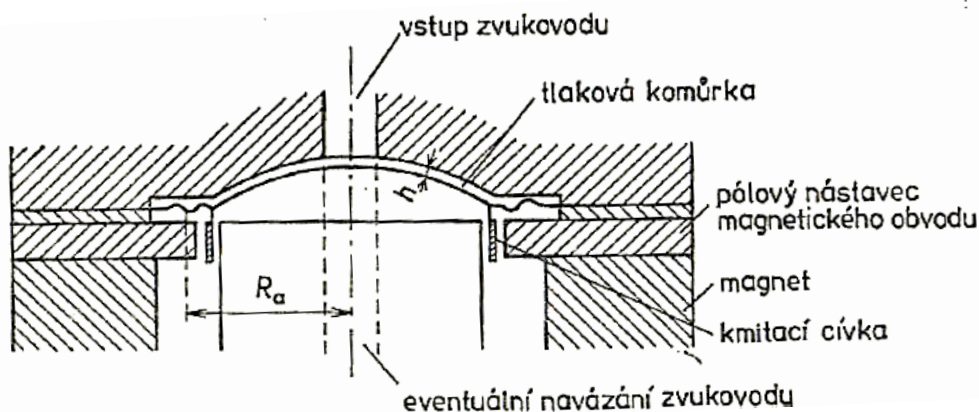
Tlakové reproduktory patří mezi reproduktory s nepřímým vyzařováním, membrána totiž nevyzařuje přímo do prostředí, ale je s ním spojena zvukovodem. Hrdlo zvukovodu je přitom obvykle značně menší než aktivní plocha membrány. Tím dochází k transformaci, která má příznivý vliv na velikost reálného odporu zatěžujícího membránu a na účinnost. Mezi membránou a začátkem zvukovodu je tzv. tlaková komůrka (proto se těmto reproduktorům říká tlakové) [5]. Vzduch v ní uzavřený tlumí pohyb membrány, takže tlakový reproduktor může mít větší příkon než reproduktor přímo vyzařující. Na druhou stranu mají tyto reproduktory menší vyzařovací úhel, je tedy třeba zvážit vhodnost jejich použití dle požadavků – např. pro hudební ozvučení nejsou tyto reproduktory vhodné.

Změny tlaku se z komůrky přenášejí jedním otvorem nebo několika otvory do zvukovodu a jím se plynule přenášejí do okolního prostoru.

Je-li vstupní průřez zvukovodu  $S_1$  menší, než plocha membrány  $S$  a pokud pomineme ztráty v transformaci, membrána vyzáří při rychlosti  $v$  výkon [5]:

$$P = c_0 \rho \frac{S^2}{S_1} v^2$$

pokud se velikost měrné impedance zvukovodu blíží jedné.



Obrázek 7 Uspořádání elektrodynamickeho tlakoveho reproduktoru [5]

## 5 ZVUKOVODY

U elektrostatických zařízení se používají zvukovody pro různé účely. Jsou to trubice s tuhými stěnami, z jedné strany do nich akustický signál vstupuje, z druhé vystupuje. Zvukovody mají různý tvar i průřez. Nejčastěji se zvukovody používají pro přizpůsobení akustické impedance membrány na prostředí, do kterého má být akustický signál vyzářen [5].

Tvar a rozměry zvukovodu značně ovlivňují kmitočtový průběh tlakového reproduktoru především u nízkých kmitočtů. Základní rozdělení zvukovodů je podle vztahu, který určuje, jak se mění průřez zvukovodu v závislosti na vzdálenosti od hrdla zvukovodu k ústí zvukovodu [14].

### 5.1 VÁLCOVÝ ZVUKOVOD

Válcový zvukovod se používá pro přenos akustické energie bez změny impedance. Nekonečně dlouhý válcový zvukovod má vstupní akustickou impedanci [5]:

$$Z = \frac{c_0 \rho}{S} = \frac{415}{S}$$

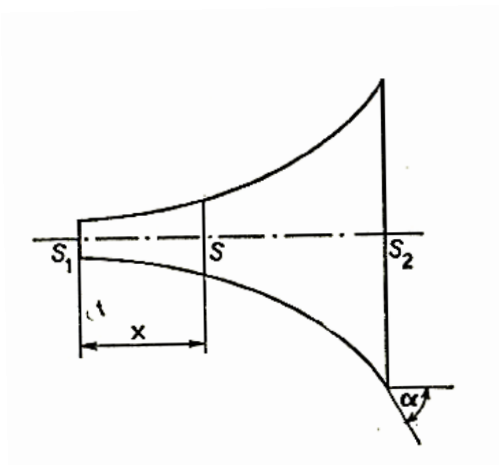
Kde:  $c_0$  je rychlost šíření zvuku ve zvukovodu

$\rho$  je měrná hmotnost vzduchu

$S$  je průřez zvukovodu

Pokud je zvukovod zatížen obecnou akustickou impedancí, vznikají na jeho konci odrazy ovlivňující jak jeho přenos, tak vstupní impedanci [5].

### 5.2 EXPONENCIÁLNÍ ZVUKOVOD



Exponenciální zvukovod se používá u nepřímo vyzářujících reproduktorů jako prvek umožňující přizpůsobení impedance prostředí na impedanci membrány [5].

Průřez zvukovodu  $S_x$  v závislosti na délce zvukovodu  $x$  uvažované od jeho počátku je [5]:

$$S_x = S_1 e^{gx}$$

Kde:  $S_1$  je vstupní průřez zvukovodu

$g$  je charakteristický exponent zvukovodu

Obrázek 8 Řez exponenciálním zvukovodem [5]



### 5.3 KUŽELOVÝ ZVUKOVOD

Nejjednodušším typem zvukovodu je kuželový zvukovod.

Nejmenší průměr výstupního průřezu zvukovodu má být  $d_2 = \frac{c_0}{\pi f_0} = 2x_1$  a odpovídající délka zvukovodu [5]:

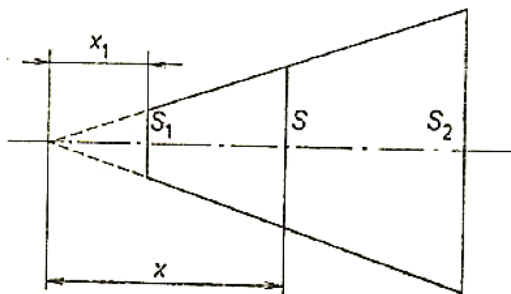
$$l = \frac{c_0}{2\pi f_0} \left( \frac{d_2}{d_1} - 1 \right)$$

Kde:  $f_0$  je dolní mezní kmitočet

$c_0$  je rychlost šíření zvuku

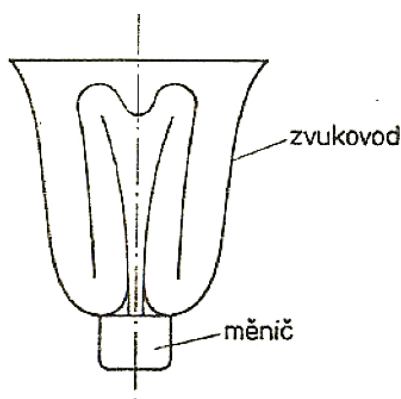
$d_2$  je průměr výstupní plochy zvukovodu

$d_1$  je průměr vstupní plochy zvukovodu



Obrázek 9 Řez kuželovým zvukovodem [5]

### 5.4 REENTRANTNÍ ZVUKOVOD



Obrázek 10 Řez zvukovodem reentrantního reproduktoru [5]

Zvukovody tlakových reproduktorů pro hlásné účely se řeší jako reentrantní, u nichž je celková délka minimální [5]. V praxi potřebujeme často přenést nízké kmitočty, pro které by musel být průměr zvukovodu veliký natolik, že už to není v praxi použitelné. Proto se často používá reentrantní zvukovod, který se používá u stejnojmenných reproduktorů. Reproduktor funguje tak, že je několikrát „zalomen“ a tak ačkoliv se rozměrově zkrátí, tak délka dráhy zůstane zachována.

## 6 PARAMETRY REPRODUKTORU

Při výběru reproduktoru je třeba zohlednit jeho parametry vzhledem k požadavkům prostoru, který chceme ozvučit. Soustředíme se především na následující parametry:

### 6.1 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Frekvenční charakteristika reproduktoru je závislost akustického tlaku v ose reproduktoru na frekvenci při konstantním budícím napětí [5].

### 6.2 KMITOČTOVÝ ROZSAH

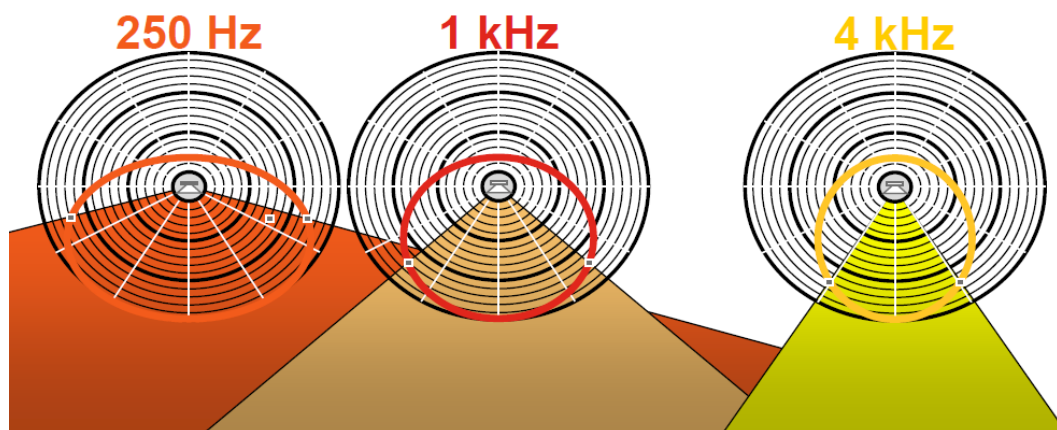
Kmitočtový rozsah udává oblast kmitočtů, ve které při konstantním napájecím napětí reproduktor vyzařuje akustickou energii. Pokud není kmitočtový rozsah doplněn údajem, pro jaká pokles akustického tlaku proti průměrnému akustickému tlaku v přenášeném pásmu jsou mezní kmitočty udány, jsou tyto údaje bezcenné a mohou zkreslit představu o reproduktoru. Dokonalejší informace se získá z grafického záznamu průběhu akustického tlaku v závislosti na kmitočtu, který se nazývá kmitočtová charakteristika [14].

### 6.3 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA

Vyzařování membrány je směrově závislé, tudíž hladina akustického tlaku klesá se vzdáleností od zdroje signálu a zároveň se mění podle polohy pozorovacího bodu [5]. Reproduktor nevyzařuje akustickou energii do všech směrů stejně. Proto je třeba soustředit se u reproduktoru na parametr udávající vyzařovací úhel reproduktoru.

V našem případě zohledňujeme nejen ideálnost celkového návrhu, ale také rozumný cenový rozsah. Pokud bychom se rozhodli prostor ozvučit úzce směrovými reproduktory, museli bychom jich použít mnoho, aby došlo k optimálnímu pokrytí celé poslechové zóny. S počtem reproduktorů vzrůstají nejen náklady na jejich pořízení, ale také se s tím pojí výdaje za jejich napájení.

Směrová charakteristika je frekvenčně závislá. Při výběru reproduktoru pro evakuační rozhlas se tedy soustředíme na hodnoty udané pro 1 - 4kHz (tedy pro hodnoty frekvence lidské řeči).



Obrázek 11 Závislost směrové charakteristiky na frekvenci [13]

## 6.4 CHARAKTERISTICKÁ CITLIVOST

Citlivost reproduktoru podle ČSN EN 60268-16 určuje úroveň akustického tlaku reproduktoru při vstupním signálu 1 kHz, příkonu reproduktoru 1W, ve vzdálenosti 1 metru v ose reproduktoru [15].

Dříve se hodnota udávala právě pro 1W, 1m a 1kHz. Dnes ale normy používají jiné hodnoty a při výběru reproduktoru je třeba dávat pozor, dle které normy jsou udávány. Dle normy EN54-24 se udávají pro vzdálenost ve 4 m [16]. A zatímco norma IEC 268-5 pracuje s frekvenčním rozsahem 20Hz – 20kHz (pro 1 i 4 m) [17], tedy s frekvenčním rozsahem citlivosti našeho ucha, u normy EN 54 se jedná o hodnotu váženého průměru pro frekvence 100Hz – 10kHz [16].

V praxi často zvětšujeme citlivost tím, že použijeme dva reproduktory stejného typu. Je třeba si uvědomit, že citlivost je logaritmická veličina a pokud tedy vzroste citlivost o 3dB bude mít takový reproduktor 2x větší SPL (Tedy např. pokud použijeme reproduktor o citlivosti 93dB, bude hrát stejně nahlas jako dva reproduktory o citlivosti 90dB a stejném příkonu) [13].

Pokud chceme dosáhnout již navržené hodnoty akustického tlaku SPL s citlivějším reproduktorem o 3dB, můžeme tyto citlivější reproduktory zapojit na poloviční výkon. Toto řešení má dopad jak na výkon zesilovačů, výslednou kapacitu záložních akumulátorů, a tudíž i na cenu výsledného systému.

## 6.5 JMENOVITÁ IMPEDANCE

Hodnota reálného odporu R uvedená výrobcem, která má být nahrazena za reproduktor při definování požadovaného výkonu zdroje [16].

## 6.6 STANDARDNÍ ÚČINNOST

Standardní účinnost reproduktoru udává poměr celkového vyzářeného akustického výkonu daného reproduktoru ke standardnímu příkonu [5].

# 7 MĚŘENÍ HLASITOSTI

---

Měření hlasitosti je nedílnou součástí řešení prostor, kde je třeba ozvučení pro bezpečností rozhlas. Tuto problematiku řeší norma ČSN EN 60849, která uvádí, že minimální hladina zvuku nouzových signálů (HSP) musí být 65dB. Je ale také třeba, aby hlasitost systému hlasové signalizace požáru byla 6 – 20dB nad úroveň hluku pozadí [18]. Při navrhování HSP je tedy třeba brát v potaz také hlučnost prostředí, které se má ozvučovat, a podle toho zvolit typ reproduktoru.

Obecně platí, že pro hlučné výrobní prostory či garáže je vhodnější použít tlakové reproduktory nebo zvukové projektory namísto skříňových nebo stropních reproduktorů, které jsou určeny spíše do klidnějších kancelářských prostor.

## 8 SROZUMITELNOST ŘEČI

---

Měřením srozumitelnosti řeči zjišťujeme, jak dobře je v daném prostoru řeč srozumitelná a slyšitelná. Úzce souvisí s dobou dozvuku. Pro měření srozumitelnosti lze použít subjektivní testování, ale daleko přesnější je využití měření akustických vlastností prostoru, ze kterých je možné určit srozumitelnost.

Před uvedením evakuačního systému do provozu je třeba provést dle normy ČSN EN 60849 měření srozumitelnosti řeči [18]. Během tohoto měření se do reproduktoru vysílá speciální signál (STI-PA). Je použit speciální měřicí přístroj, který tento signál zachycuje a porovnává s originálním signálem. Porovnáním těchto dvou hodnot je pak určena hodnota srozumitelnosti STI.

Tato hodnota se pak přepočítává na jednotnou referenční stupnici CIS (Common Intelligibility Scale). Aby bylo měření úspěšné, je třeba, aby hodnota CIS byla větší nebo rovna 0,7. Přičemž [13]:

$$CIS = 1 + \log STI$$

### 8.1 ZTRÁTA SROZUMITELNOSTI SAMOHLÁSEK

Ztráta srozumitelnosti samohlásek (ZSS) platí za předpokladu, že odstup signálu od hluku pozadí je menší jak 25dB dle vztahu [19]:

$$ZSS = \frac{200T^2D^2N}{VQ} \times 100\%$$

Kde: T je doba dozvuku

D je vzdálenost mezi zdrojem a místem příjmu

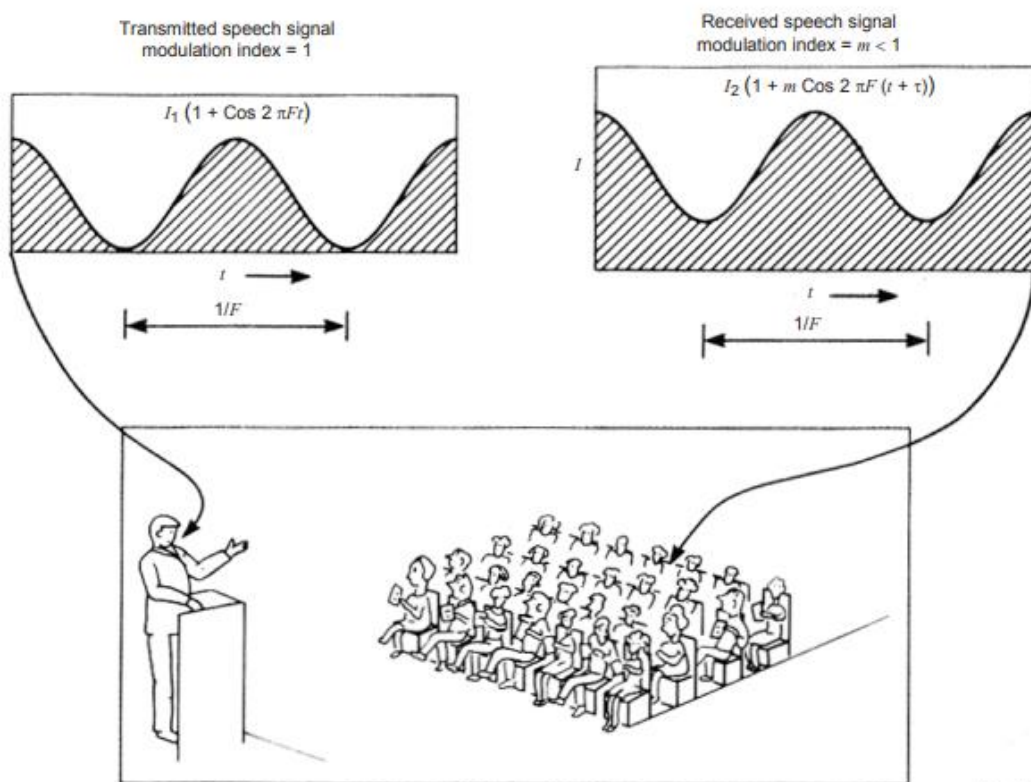
V je objem prostoru

Q je činitel směrovosti zdroje

N je počet zdrojů

### 8.2 SPEECH TRANSMISSION INDEX (STI)

STI je založeno na tom, že informace v řeči jsou akusticky reprezentovány formou modulací. Vyjádření řeči je v podstatě posloupnost modulovaných tónových a hlučivých zvuků. Kolísání v řečovém signálu je způsobeno akustickou separací vět, slov a formantů, které tvoří základní prvky řeči. Fluktuace, nazývané modulace, lze kvantifikovat jako funkce modulační frekvence, která produkuje modulační spektrum. Pro jasnou řeč se frekvence modulace obvykle pohybují od 0,5 Hz do 16 Hz s maximem modulace při přibližně 3 Hz. Jakákoliv deformace modulačního spektra přenosovým kanálem je považována za způsobující snížení srozumitelnosti řeči. Toto zhoršení modulačního spektra odpovídá snížení hloubky modulace u jednoho nebo více modulačních frekvencí a vypočte se jako hodnota přenosové modulace pro každou oktávu pásma přes spektrální rozsah řeči [20]. STI zkoumá, jak se změní obálka signálu po přidání šumu a dozvuku v místnosti, a tím posuzuje kvalitu přenosu řeči od přednášejícího k posluchači. Modulační přenosová funkce, která může být vypočtena nebo měřena, vyjadřuje ztrátu a zachování modulací. STI je možné určit právě ze změřené doby dozvuku místnosti pomocí této přenosové modulační funkce.



Obrázek 12 Princip výpočtu STI [20]

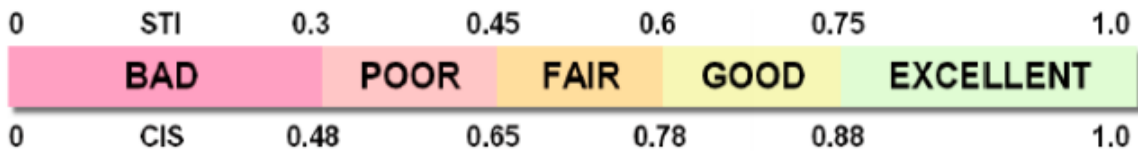
Pro výpočet STI je specifické, že testovací signál a jeho vyhodnocení je odolné vůči šumu pozadí, nelineárnímu zkreslení a dalším degradacím, které mohou ovlivňovat výsledek měření. SNR získané z testovacího signálu se měří v každém oktávovém pásmu ve frekvenčním rozsahu 125 Hz až 8000 Hz [21]. Kromě měření SNR jednotlivě pro každé pásmo má také každé pásmo svůj váhový koeficient. Všechna pásma tudíž nemají při výpočtu STI stejnou váhu. Při měření musíme také dát pozor na případné maskování šumem. Frekvence, které jsou maskované, pro měření nejsou vhodné.

		Modulation Frequencies													
		0.63 Hz	0.8 Hz	1 Hz	1.25 Hz	1.6 Hz	2 Hz	2.5 Hz	3.15 Hz	4 Hz	5 Hz	6,3 Hz	8 Hz	10 Hz	12.5 Hz
Octave Bands	125 Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	250 Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	500 Hz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	4 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	8 kHz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Obrázek 13 Výpočet STI zohledňuje všech 14 modulačních frekvencí a všech 7 oktávových pásem [22]

STI nabývá hodnot od 0 do 1, což udává, do jaké míry přenosový kanál degraduje srozumitelnost řeči. Dokonale srozumitelné slovo má STI 1. Čím blíže se hodnota STI blíží 0, tím více informací se ztratí, signál je méně srozumitelný [21].

Hodnota STI může být různá pro mužský a ženský hlas.



Obrázek 14 Porovnání hodnot STI a CIS [22]

Měření STI vyžaduje 98 individuálních měření, a proto je tato metoda poměrně zdlouhavá. Proto byly vyvinuty přístupy, které výrazně zkracují dobu trvání testu a přitom zajišťují spolehlivý výsledek měření. Metoda STI je tedy sice nejpřesnější existující metodou, ale v praxi se kvůli dlouhé době trvání měření používá zřídka. A to především v situacích, kdy alternativní metody měření neposkytují spolehlivé výsledky.

V normě ČSN EN 60849 je specifikován požadavek na srozumitelnost řeči v celé oblasti pokrytí [18]. Jeho hodnota musí být větší nebo rovna 0,7 na jednotné stupnici srozumitelnosti CIS, to odpovídá indexu srozumitelnosti STI větší nebo roven 0,5.

### 8.3 RAPID SPEECH TRANSMISSION INDEX (RASTI)

Další možností měření míry srozumitelnosti mluveného slova je použití Rapid Speech Transmission Index (RASTI). Tato metoda se používá pro malé uzavřené místnosti bez ozvěny, nikoliv pro složitější akustické systémy. Oproti STI, které se měří v 7 oktávových pásmech (125 - 8000Hz) se RASTI měří pouze ve dvou oktávových pásmech a to 500Hz a 2kHz, tedy v pásmech, které jsou pro lidskou řeč nejdůležitější. Díky tomuto zmenšení frekvenčního pásma je výpočet hodnoty RASTI méně náročný. Měříme totiž pouze 9 hodnot, u STI měříme hodnot 98 [21].

		Modulation Frequencies													
		0.63 Hz	0.8 Hz	1 Hz	1.25 Hz	1.6 Hz	2 Hz	2.5 Hz	3.15 Hz	4 Hz	5 Hz	6,3 Hz	8 Hz	10 Hz	12.5 Hz
Octave Bands	125 Hz														
	250 Hz														
	500 Hz			✓			✓			✓			✓		
	1 kHz														
	2 kHz	✓			✓			✓			✓			✓	
	4 kHz														
	8 kHz														

Obrázek 15 Výpočet RASTI zohledňuje 9 různých modulačních frekvencí v pásmech 2 oktáv [22]

RASTI metoda poskytuje rychlé vyhodnocení srozumitelnosti, avšak pro mnoho prostor není dostačující. Přesto se tato metoda dlouhou dobu používala pro měření kvality přenosu řeči dlouho např. v letectví [22].

## 8.4 SPEECH TRANSMISSION INDEX FOR PUBLIC ADDRESS (STI-PA)

Zvyšující se zájem o zajištění bezpečnosti veřejnosti a nedostatky metody RASTI dali vzniknout nové metodě pro měření srozumitelnosti systémů zajišťujících bezpečnost. Metoda zajišťuje rychlé a přesné měření a umožňuje testování přenosnými přístroji. Podobně jako RASTI tato metoda využívá zjednodušení metody STI. Za předpokladu, že v prostoru není přítomen silný impulsní šum a nedochází k masivnímu nelineárnímu zkreslení, poskytuje metoda STI-PA výsledky o přesnosti metody STI [22].

Metoda STI-PA používá jeden modulační signál získaný analýzou všech 7 frekvenčních pásem. Přitom každé pásmo je modulováno dvěma frekvencemi.

		Modulation Frequencies													
		0.63 Hz	0.8 Hz	1 Hz	1.25 Hz	1.6 Hz	2 Hz	2.5 Hz	3.15 Hz	4 Hz	5 Hz	6,3 Hz	8 Hz	10 Hz	12.5 Hz
Octave Bands	125 Hz			✓							✓				
	250 Hz														
	500 Hz	✓								✓					
	1 kHz							✓							✓
	2 kHz				✓							✓			
	4 kHz		✓							✓					
	8 kHz							✓							✓

Obrázek 16 Metoda STI-PA, kde pásmo 125 Hz a 250 Hz je zkombinováno a žlutě označené modulační kmitočty nejsou brány v úvahu [22]

## 9 PODMÍNKY V TUNELU

---

Zajištění bezpečnosti cestujících v tunelu je klíčové pro jejich bezpečné používání. Evakuační rozhlas je jediným zařízením zajišťující komunikaci s cestujícími v případě nouzové situace. Rozhlas musí být účinný, takže musí být jasně srozumitelný bez potřeby opakovat zprávu. To zajistí, že lidé jsou schopni včas reagovat na pokyny sdělené rozhlasem. V tunelu se z hlediska ozvučení setkáváme s několika zásadními problémy, a proto je třeba ke každému tunelu přistupovat individuálně:

### 9.1 ŠPATNÁ AKUSTIKA

Jak už bylo zmíněno v kapitole [Statistická akustika](#), mnohačetné odrazy od stěn jsou jedním z hlavních důvodů, proč je srozumitelnost v tunelu špatná. Při stavbě tunelu se používají velmi tvrdé materiály s nízkou pohltivostí. Důsledkem je až 95% odrazivost zvukových vln od stěn i komunikace.

Pro hladký nenatřený beton se pro 1 – 4kHz pohybuje hodnota pohltivosti mezi 0,02 až 0,05 [23]. Pro asfalt můžeme pracovat s hodnotou přibližně 0,1 [24].

Vzhledem k těmto nepříznivým podmínkám máme dvě možnosti. Můžeme například instalovat absorpční materiály na stěny tunelu. To je ale nákladné a ve vlhkém tunelu velmi nepraktické. Druhým a vhodnějším řešením je použití vysoce směrových reproduktorů. Malé, běžně používané reproduktory mají špatnou směrovost a nedostatečnou účinnost na větší vzdálenosti, a proto jejich použití v tunelu není vhodné.

### 9.2 HLUK

Další komplikací při ozvučení tunelu je vysoká hladina hluku. Zdrojem hluku v tunelu jsou jak projíždějící auta, tak ventilační systémy zajišťující cirkulaci vzduchu během běžného provozu a zároveň také slouží k odvodu kouře v případě požáru. Nejčastěji používaná pro delší tunely je podélná ventilace.

Nežádoucí hluk v tunelu závisí na mnoha okolnostech, např. na velikosti tunelu, použitém ventilačním systému, počtu projíždějících aut a také na rychlosti, kterou auta projíždí. Pro běžný tunel s maximální povolenou rychlostí 100 km/h je hodnota hluku přibližně 95dB [25]. Hladina hluku v tunelu není individuální jen mezi jednotlivými tunely, ale mění se také během dne, podle hustoty dopravy.

Dle normy ČSN EN 54-3 víme, že je třeba, aby hlasitost systému hlasové signalizace požáru byla 6 – 20dB nad úrovní hluku pozadí [26].

### 9.3 ZKRESLENÍ ZPŮSOBENÉ REPRODUKTOREM

Zkreslení způsobené reproduktorem může mít negativní vliv na srozumitelnost hlášení. Malé reproduktory mají často velké zkreslení, zvláště při vyšších hodnotách SPL. Proto jejich použití v tunelu není vhodné a je třeba hledat jiné řešení.

### 9.4 NEPŘÍZNIVÉ VLIVY

Nesmíme zapomínat na to, že reproduktory musí splňovat nejen akustické požadavky, ale musí být také dostatečně odolné vzhledem k nepříznivým podmínkám v tunelu. Tunely například prochází pravidelnou údržbou, během které se chemicky čistí. Je tedy třeba, aby toto chemické čištění nemělo negativní vliv na výkon a celkovou funkčnost reproduktoru. Dále musí být reproduktory voděodolné a zároveň musí být odolné i vůči vysoké teplotě, aby dokázaly zajistit spolehlivou funkčnost i během nouzových situací, jako je povodeň nebo požár.



## 10 ŽIŽKOVSKÝ TUNEL

Pro tvorbu akustické studie byl vybrán pěší Žižkovský tunel pod kopcem Vítkov v Praze, který spojuje Žižkov s Karlínem.



Obrázek 17 Žižkovský tunel

První etapa tunelu byla slavnostně uzavřena v sobotu 21. dubna 1951 [27]. Ačkoli je tunel na první pohled tmavé a nehostinné místo, denně ho kvůli jeho strategické poloze využívá mnoho Pražanů. Zkracují si tak cestu mezi ulicemi Thámovou (Karlín) a Husitskou (Žižkov). Tunel je dlouhý 303m.

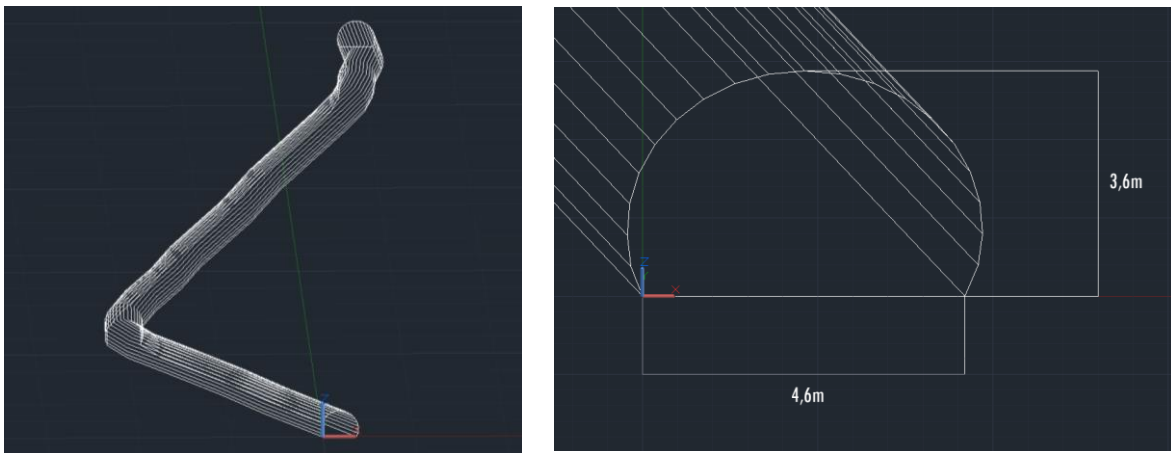


Obrázek 18 Umístění žižkovského tunelu [28]

## 10.1 MODELOVÁNÍ V PROGRAMU AUTODESK AUTOCAD

Přibližný model tunelu byl vytvořen v programu AutoCAD, ze kterého je možné importovat data do programu EASE. Model byl vytvořen z přibližných údajů rozměrů, drobné odchylky v rozměrech můžeme při modelování zanedbat.

Program EASE dovoluje import modelů tvořených pouze z polyline a polyface, tedy všechny plochy musí být tvořeny z křivek, které mají vrcholy. V našem případě, kdy modelujeme tunel, by se nabízelo použití profilu složeného z oblouků. To ale bohužel není možné a je třeba tunel rozdělit na několik rovných úseků.



Obrázek 19 Model tunelu v programu AutoCAD

## 10.2 MĚŘENÍ V TUNELU

### 10.2.1 Měření hluku

Vzhledem k tomu, že potřebujeme zajistit, aby výsledný signál evakuačního rozhlasu přesahoval o 6 - 20dB hladinu hluku pozadí, bylo v tunelu provedeno orientační měření hluku. Měření probíhalo za běžného provozu v čase, kdy tunel hojně využívají lidé, kteří jdou z práce domů. Během měření také nad tunelem projížděly vlaky, které hladinu nepříznivého zvuku zvyšují.

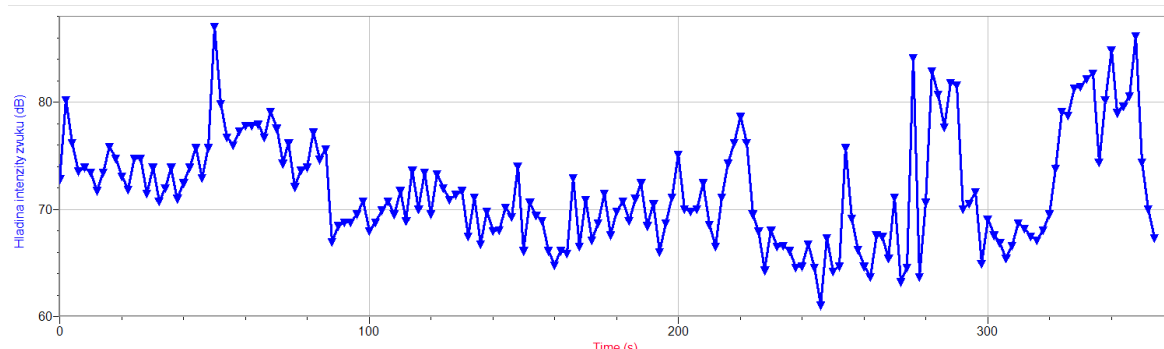


Obrázek 20 Přístroj pro měření hluku

K měření byl použit Hlukoměr od firmy Vernier, který umožňuje měřit v rozsahu 35 – 130dB, při frekvenčním rozsahu 31,5Hz – 8kHz. Citlivost přístroje je 0,1dB a přesnost 1,5dB [29].

Dále byla k měření použito rozhraní LabQuest, které sloužilo jako stanice pro záznam změřených dat a následné uložení pro další zpracování.

Při průchodu tunelem se hladina hluku měnila podle hlučnosti procházejících lidí v rozmezí přibližně 60 – 90dB. Nejvyšších hodnot hluk dosahoval při průjezdu vlaku, to hladina dosahovala až k 90dB.



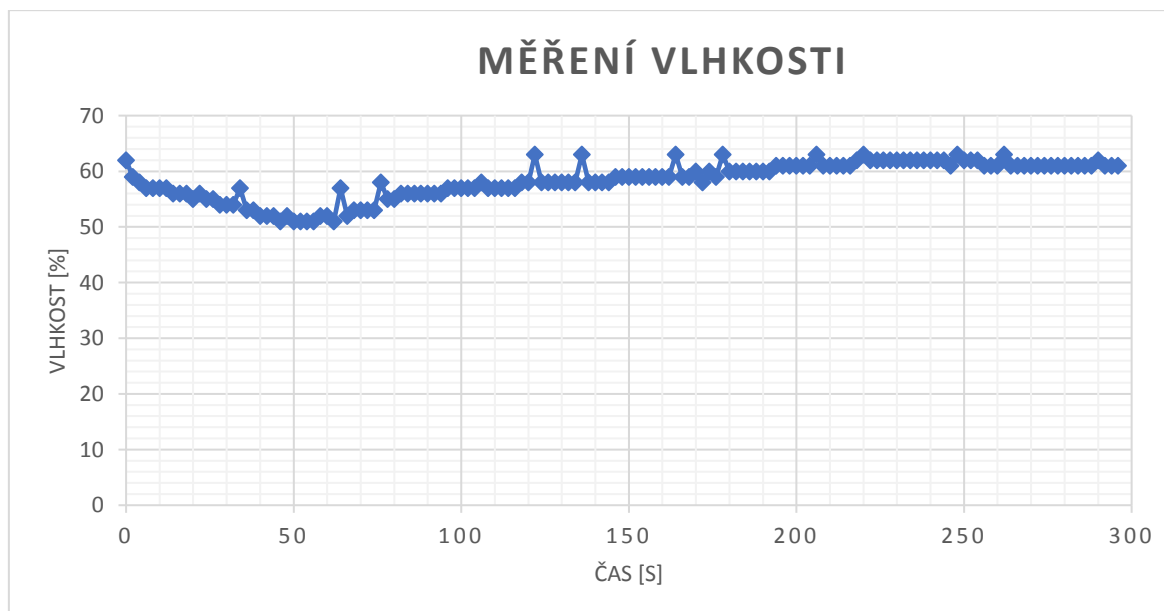
Obrázek 21 Hladina intenzity zvuku měřená při průchodem Žižkovským tunelem

### 10.2.2 Měření vlhkosti

Jak bylo zmíněno v kapitole [Útlum zvuku ve vzduchu](#), důležitým faktorem ovlivňujícím akustiku v tunelu je také teplota a relativní vlhkost vzduchu.

Pro měření vlhkosti byl použit senzor DHT11 od Mouser Electronics, použitelný pro rozsah 20 – 90% relativní vlhkosti při teplotě 0 - 50°C. Přesnost senzoru je  $\pm 5\%$  [30]. To je poměrně vysoká nepřesnost ale pro orientační měření senzor postačí.

Měření probíhalo v den, kdy byla venkovní teplota 25°C. Vlhkost v tunelu se během roku mění, teplý vzduch dokáže vázat více vlhkosti než studený.

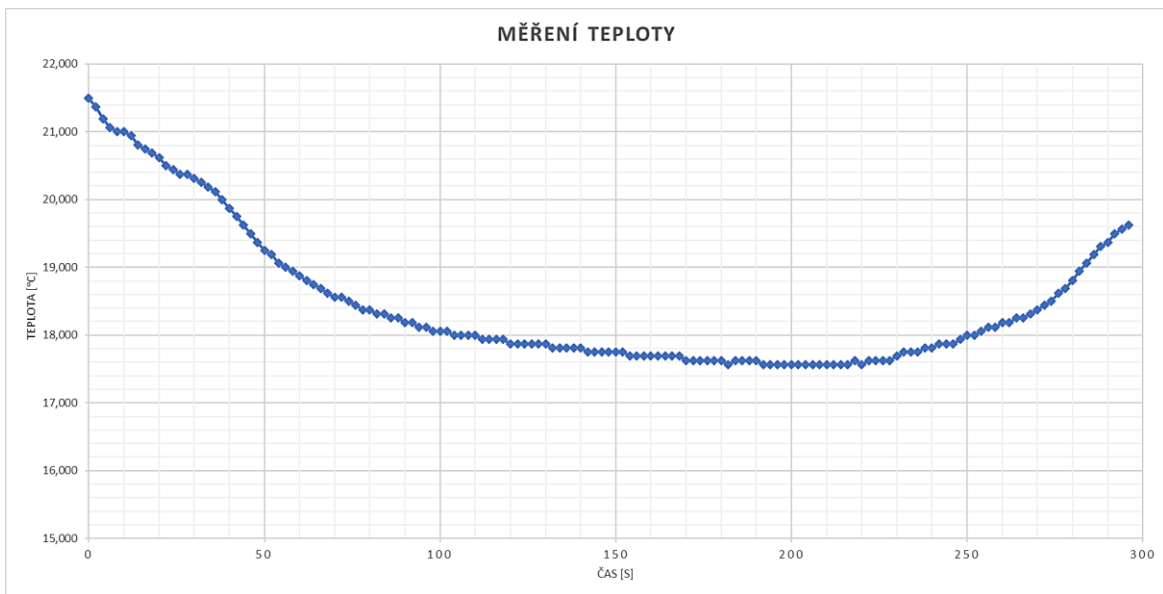


Obrázek 22 Relativní vlhkost vzduchu měřená při průchodu Žižkovským tunelem

### 10.2.3 Měření teploty

Během měření vlhkosti a hluku byla také orientačně změřena teplota v tunelu. Změřené hodnoty ale neodpovídají průměrné teplotě za rok. K měření byl použit senzor Dallas DS18B20 firmy Maxim Integrated. Senzor je možné použít v rozsahu teploty  $-55^{\circ}\text{C}$  až  $+125^{\circ}\text{C}$ . Přesnost senzoru je  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  (na rozsahu od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+85^{\circ}\text{C}$ ) [31].

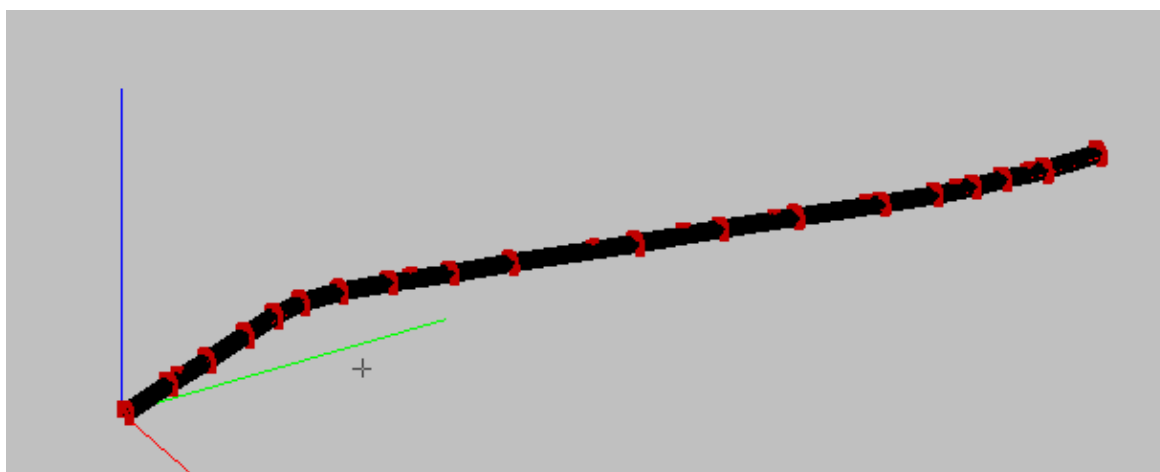
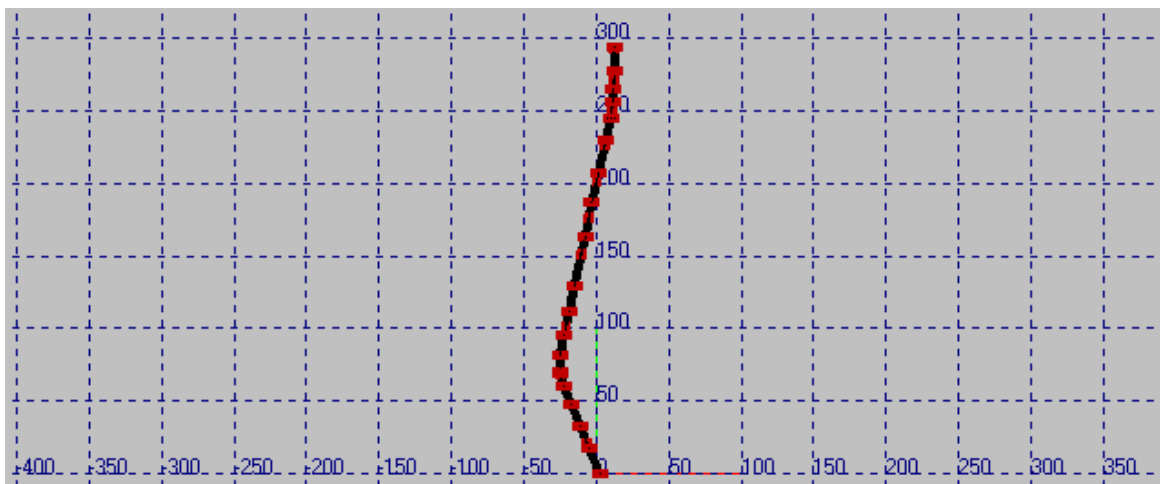
Venkovní teplota v době měření v tunelu byla kolem  $25^{\circ}\text{C}$ . Teplota byla měřena při průchodu tunelem, což je patrné i z grafu – teplota je nejvyšší na začátku na konci měření, protože směrem k otevřenému konci tunelu se teplota blíží venkovní teplotě. Měření bylo uskutečněno několikrát, výsledky byly pro všechny průchody tunelem velmi podobné. To platí i pro měření zmíněná v práci dříve.



Obrázek 23 Teplota vzduchu měřená při průchodu Žižkovským tunelem

### 10.3 MODELOVÁNÍ V PROGRAMU EASE

Po importování modelu z programu AutoCAD je třeba doplnit údaje, které jsou pro akustickou studii zásadní. Jedná se především o vytvoření poslechové hladiny a dále také o nadefinování koeficientů pohltivosti jednotlivých stěn.



Obrázek 24 Model tunelu importovaný do programu EASE

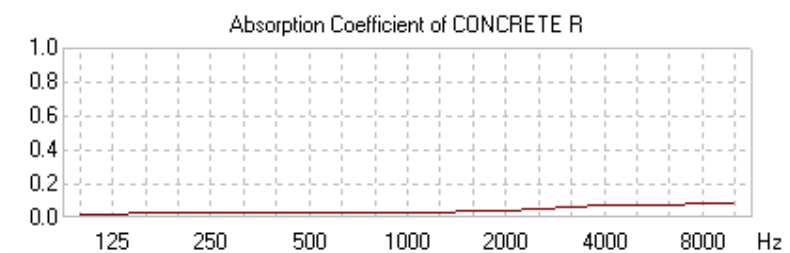
#### 10.3.1 Poslechové hladiny

Před spuštěním simulace v programu je nezbytné nadefinovat poslechovou hladinu, tedy plochu, ve které chceme provádět simulace. Díky komplikovanému půdorysu tunelu jsem tuto hladinu tvořila z několika čtyřúhelníků.

Vzhledem k tomu, že se jedná o pěší tunel, ve kterém veřejnost prochází, výšku poslechové hladiny jsem zvolila 170 cm. Předpokládám totiž, že zpráva vysílaná při evakuaci je směřována především na dospělé, které se následně postarají o své děti.

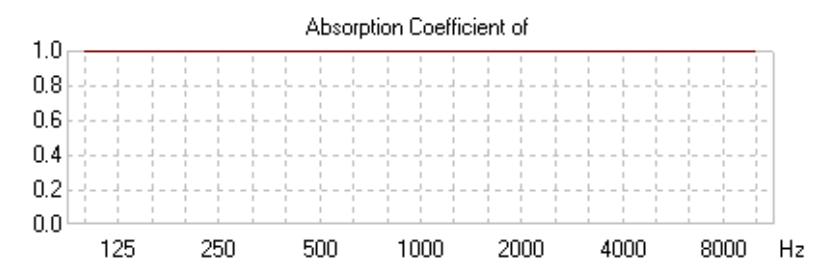
#### 10.3.2 Absorpční koeficienty stěn

Pro každou stěnu modelu je třeba nadefinovat její pohltivost. K tomuto účelu je v programu dostupná databáze různých povrchů. Vzhledem k tomu, že neznáme absorpční koeficienty materiálů použitých v Žižkovském tunelu, použijeme akusticky nejméně příznivou situaci a stěny tedy vytvoříme z akusticky velmi nepříznivého betonu.



Obrázek 25 Absorpční koeficient betonu

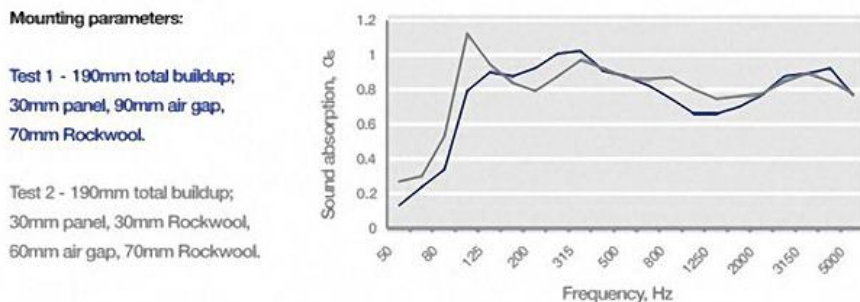
Model musí být ale uzavřený, a tak je třeba také nadefinovat povrch na jeho začátku a konci – u vstupu a u výstupu z tunelu. Víme, že se jedná o otevřené prostředí, vzduch, který zvukovou vlnu neodráží. Nabízí se tedy použití materiálu, který má absorpční koeficient rovný jedné. V databázi programu EASE je tento materiál pod označením ABSORBER.



Obrázek 26 Absorpční koeficient pro ABSORBER

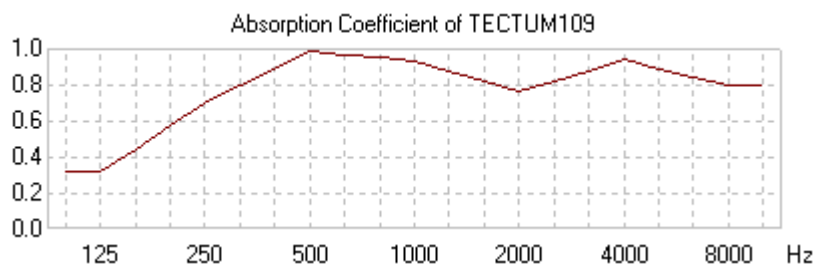
Vzhledem k nepříznivým podmínkám v tunelu je dobré zvážit i variantu, která zahrnuje úpravu podhledů. Je sice finančně a realizačně náročnější, ale velmi pozitivně se odráží na výsledných akustických vlastnostech tunelu.

Je nutné si uvědomit, že v tunelu nemůžeme použít běžně používaný akustický materiál, protože tyto materiály nebývají odolné a bývají extrémně hořlavé, což v tunelu není žádoucí. Musíme vybírat takový materiál, který bude odolný vůči vlhkosti, vysoké teplotě a chemickému čištění. Takový materiál je na dnešním trhu již dostupný. Vyrábí jej například firma QUIETSTONE pod označením Fireproof Acoustic Panels – FR30 [32]. Tento materiál disponuje mnoha výhodnými vlastnostmi – je vyrobený z recyklovaného foukaného skla, vydrží i při vysoké teplotě (odolává až 1150°C po dobu 2h), je odolný vůči mrazu a dešti a také vůči čištění čistícími prostředky. Navíc mají vynikající akustickou účinnost.



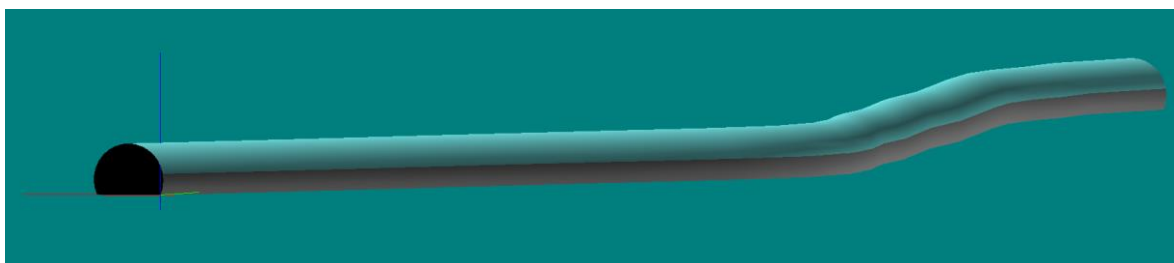
Obrázek 27 Absorpční koeficient Fireproof Acoustic Panels [32]

Nejpodobnější charakteristiku tohoto materiálu obsahuje v databázi programu EASE materiál TECTUM109.



Obrázek 28 Absorpční koeficient pro TECTUM109

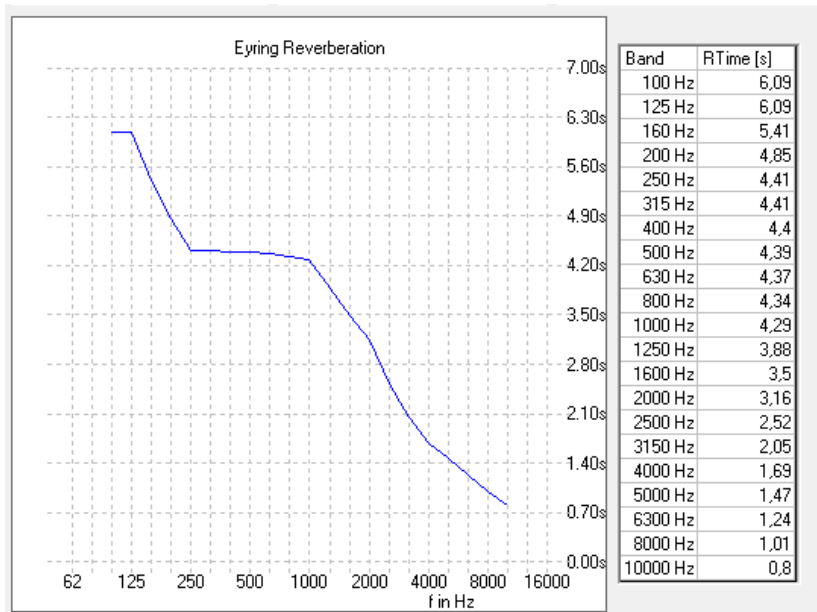
Studie vypracované s upravenými podhledy mají absorpční materiál ve výšce přibližně od dvou metrů nad zemí přes plochu stropu, aby eliminovaly alespoň část nežádoucích odrazů. Rozložení materiálů je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek 29 Spodní šedá část tunelu není nijak upravena, modrá část znázorňuje upravené podhledy materiálem TECTUM109

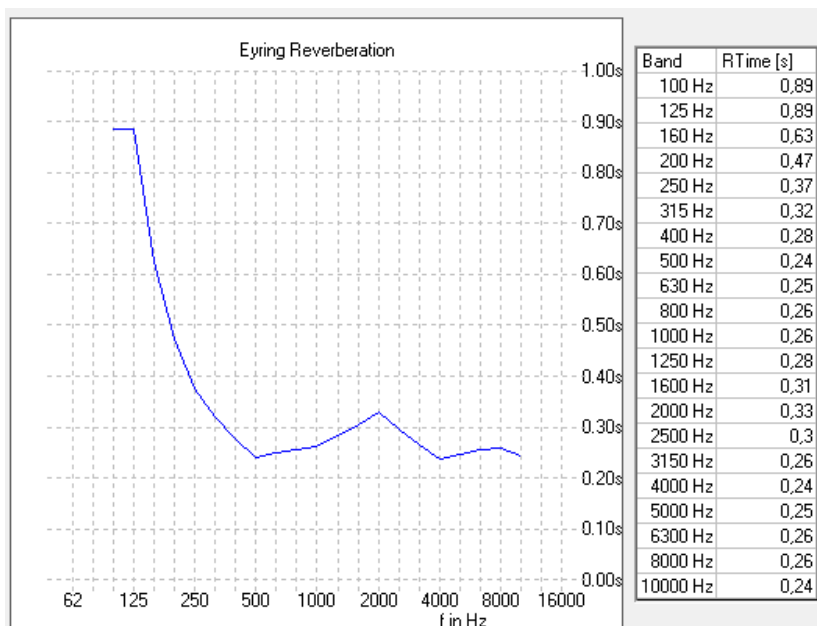
### 10.3.3 Doba dozvuku

Na níže uvedených grafech je zobrazen průběh doby dozvuku RT, který byla použit pro následné simulace. Při nižších hodnotách doby dozvuku dojde ke zlepšení hodnot parametru srozumitelnosti.



Obrázek 30 Frekvenční průběh doby dozvuku RT v tunelu bez úpravy podhledů

Pokud upravíme podhledy v tunelu akusticky pohltivým materiálem, situace se výrazně zlepší.



Obrázek 31 Frekvenční průběh doby dozvuku RT v tunelu pro upravené podhledy



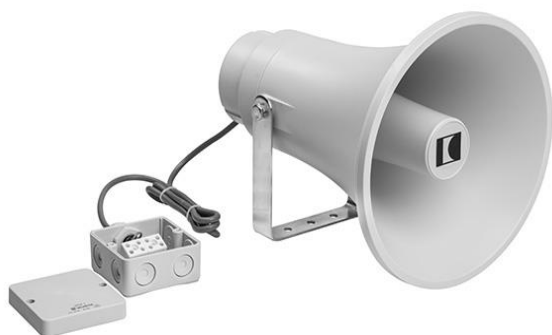
## 10.4 VÝBĚR REPRODUKTORŮ



Při navrhování akustické studie evakuačního rozhlasu pro tunel musíme pečlivě vybrat reproduktory, které použijeme. Nesmíme zapomínat na to, že reproduktory musí být v souladu s normou ČSN EN 54-24 a být tedy vhodné pro použití pro evakuační rozhlas. Pro akustické studie byly vybrány tlakové reproduktory, které vykazují vysokou účinnost a jsou odolné vůči vnějším vlivům.

V tunelech se používá 100V rozvodu aby se eliminovaly ztráty na vedení a dalo se připojit více reproduktorů.

### 10.4.1 Reproduktor DK 30/T - EN54

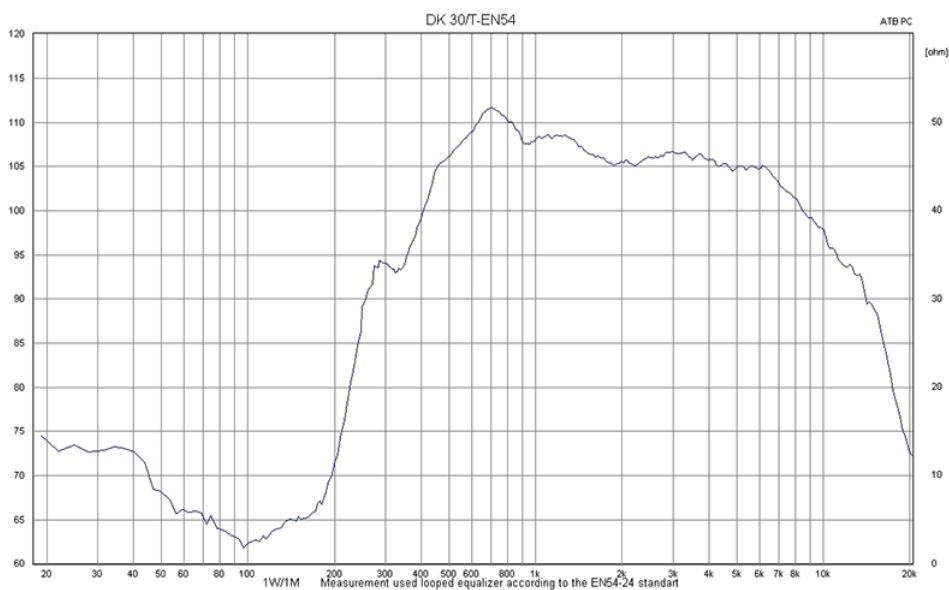


Jedná se o tlakový reproduktor, který má následující parametry [33]:

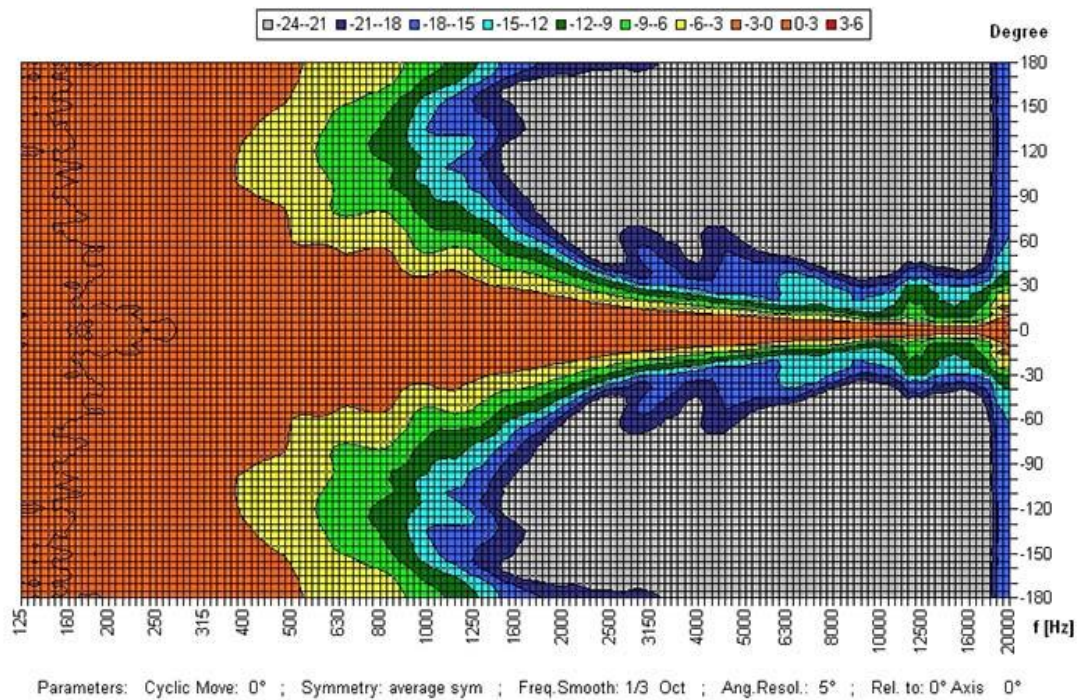
- Max. výkon 30 W
- citlivost 79,9 dB (1W/4m)
- frekvenční rozsah 250Hz – 15kHz
- SPL 98,1dB (1W/4m, peak)
- vyzařovací úhel 103° (1 kHz)
- rozměry 235 x 303 mm
- v souladu s normou EN 54-24

Obrázek 32 Reproduktor DK 30/T - EN54 [33]

Reproduktor je vybaven keramickou svorkovnicí s tepelnou pojistkou. Tělo reproduktoru je vyrobeno z nárazuvzdorného plastu ABS. Reproduktor je dodáván s držákem ve tvaru U, který je vyroben z nerez. Přepínání příkonu se provádí přímo na reproduktoru v rozsahu 30 W, 20 W, 10 W, 5 W.



Obrázek 33 Frekvenční charakteristika reproduktoru DK 30/T - EN54 [33]



Obrázek 34 Vyzařovací charakteristika reproduktoru DK 30/T - EN54 [33]

#### 10.4.2 Reproduktor DK - MH 30/T PLUS - EN54

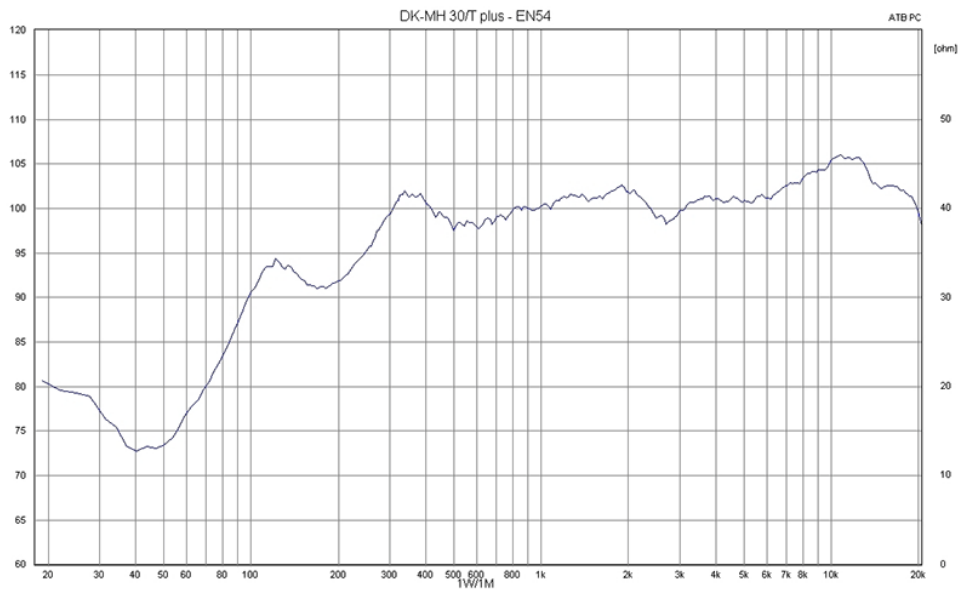


Obrázek 35 Reproduktor DK – MH 30/T PLUS – EN54 [33]

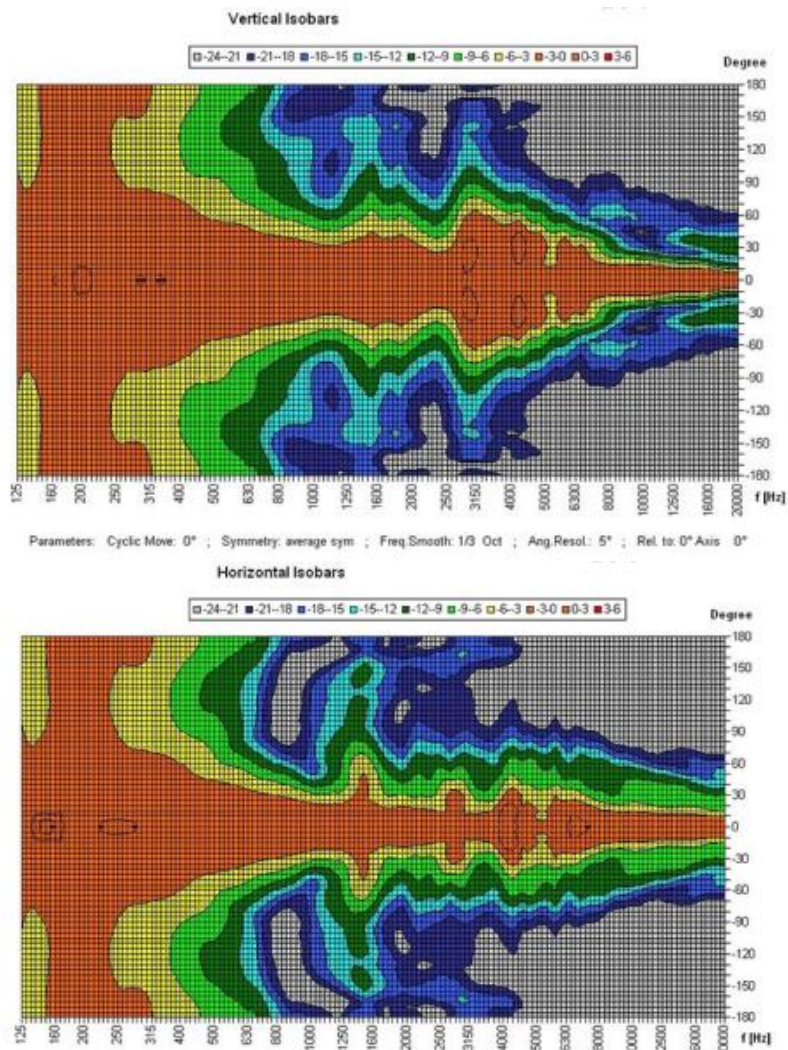
Jedná se o tlakový reproduktor, který má následující parametry [33]:

- Max výkon 30 W
- citlivost 78,4 dB (1W/4m)
- frekvenční rozsah 65Hz – 24kHz
- SPL 89,8dB (1W/4m, peak)
- vyzařovací úhel (1 kHz) 60° (h), 99° (v)
- rozměry 370 x 255 x 330 mm
- v souladu s normou EN 54-24

Dvoupásmový tlakový reproduktor DK - MH 30/T plus - EN54 pro evakuační rozhlas je vyroben z nárazuvzdorného plastu. Je vybaven keramickou svorkovnicí s tepelnou pojistkou. Vydávaný velmi vysoký akustický tlak a dobrá kvalita hudby jsou hlavní vlastnosti tohoto reproduktoru, tak jako jednoduchá montáž pomocí držáku ve tvaru U, který je z hliníku.



Obrázek 36 Frekvenční charakteristika reproduktoru DK - MH 30/T PKUS - EN54 [33]



Obrázek 37 Vyzařovací charakteristika reproduktoru DK MK 30/T - EN54 pro horizontální (nahore) a vertikální (dole) směr [33]

### 10.4.3 Reproduktor TH – 100 - EN54

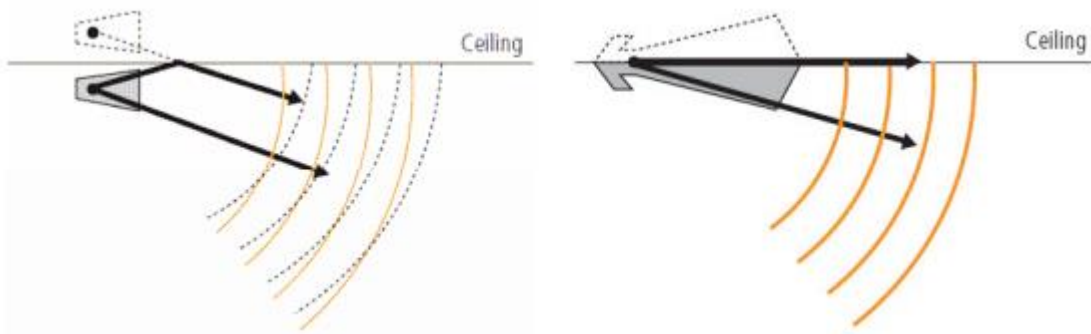


Jedná se o reproduktor, který má následující parametry [33]:

- Max výkon 100 W
- citlivost 101,9 dB (1W/4m)
- frekvenční rozsah 250Hz – 10kHz
- SPL 107dB (1W/4m, peak)
- vyzařovací úhel (1 kHz) 35°(h), 25°(v)
- rozměry 1228 x 413 x 832 mm
- v souladu s normou EN 54-24

Obrázek 38 Reproduktor TH – 100 – EN54 [33]

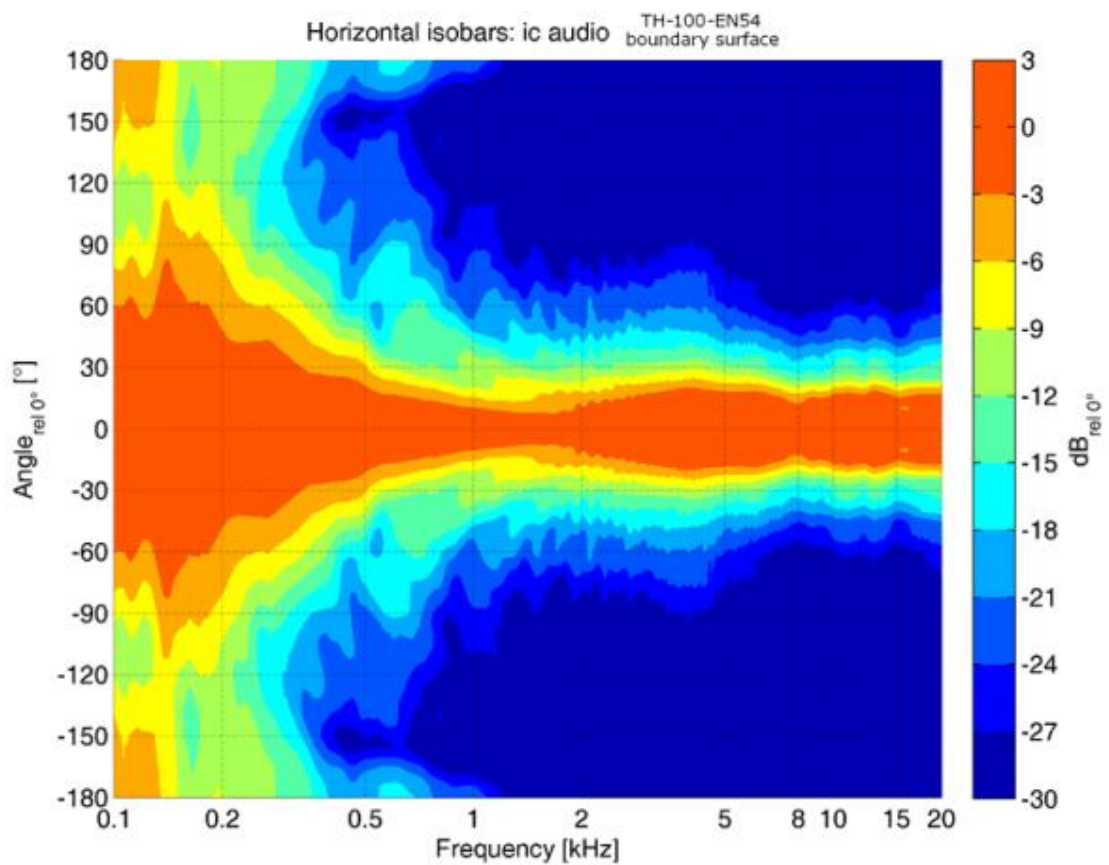
Speciální reproduktor TH-100-EN54 firmy ic audio, který byl vyvinut pro oblasti s vysokou hlučností pozadí. Je vhodný jak pro vnější, tak pro vnitřní použití. Jeho speciální tvar je přizpůsoben tvaru stropu v tunelu, je vyroben z materiálu odolného vůči korozi, vysoké vlhkosti i extrémním teplotám. Reproduktor je vybaven tepelnou pojistkou. Tento reproduktor poskytuje srozumitelné hlášení i na velké vzdálenosti, což vede k použití nižšího počtu reproduktorů. Velmi nápadný je také jeho úzce směřový profil, který eliminuje nežádoucí odrazy.



Obrázek 39 Úzce směřový profil reproduktoru eliminuje nežádoucí odrazy [25]



Obrázek 40 Frekvenční charakteristika reproduktoru TH – 100 – EN54 [33]



Obrázek 41 Vyzařovací charakteristika v horizontálním směru reproduktoru TH - 100 - EN54 [33]

## 10.5 SIMULACE V EASE

Všechny simulace jsou provedeny pro teplotu 18°C, relativní vlhkost vzduchu 60%, hlučnost pozadí 80dB a tlak 1013hPa. Doba dozvuku je počítána dle Eyringa. Simulace zohledňují maskování signálů.

### 10.5.1 Simulace s reproduktorem DK – MH 30/T PLUS - EN54

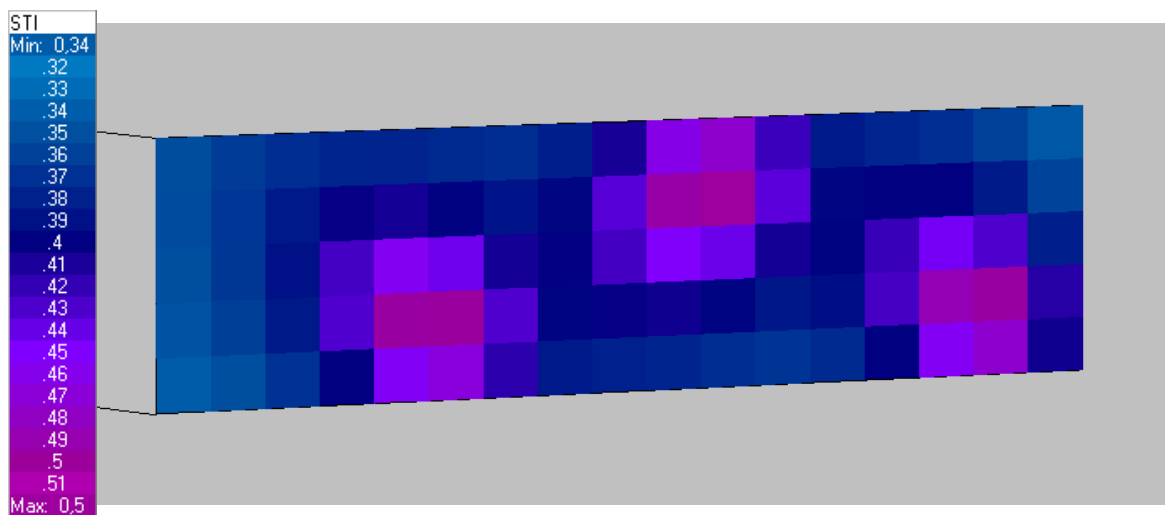
Tento reproduktor má odlišnou vyzařovací charakteristiku v horizontálním a ve vertikálním směru. Vzhledem k tomu, že širší charakteristiku má pro vertikální směr, všechny reproduktory v simulaci jsou otočeny o 90°.

#### 10.5.1.1 Simulace bez upravených podhledů

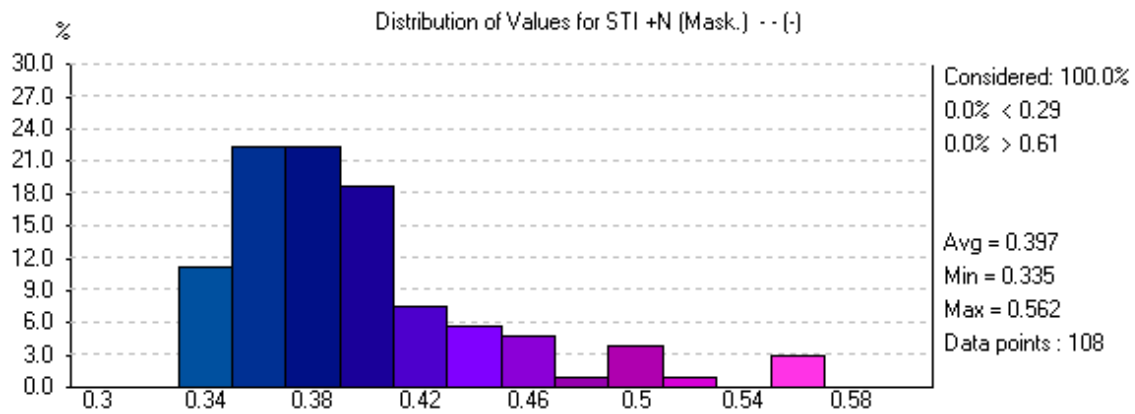
Při vypracování studie bez upravených podhledů, tedy v případě, kdy všechny stěny mají absorpční koeficient beton, bylo vyzkoušeno různých umístění a natočení reproduktorů. Vyzkoušeno bylo umístění jak uprostřed stropu, tak na stěnách nad poslechovou úrovní. Avšak žádná z variant nesplňovala požadavky srozumitelnosti dané normou – tedy hodnotu STI vyšší než 0,5.

Jako příklad studie uvádím simulaci, která dosahuje nejlepších hodnot. Reproktory by byly namontovány každých 5 m v tunelu, což by bylo velmi nákladné. Zobrazená simulace je pro první úsek tunelu. V celém tunelu by muselo být použito 60 reproduktorů. Reproktory jsou natočené o  $\pm 45^\circ$  horizontálně a o  $-10^\circ$  vertikálně umístěné na stěně tunelu ve výšce 2,20 m. Průměrná hodnota STI v uvedené studii dosahuje průměrných hodnot 0,397. Srozumitelnost se vzdávající vzdáleností od reproduktoru velmi rychle klesá, a to především díky vysoké době dozvuku.

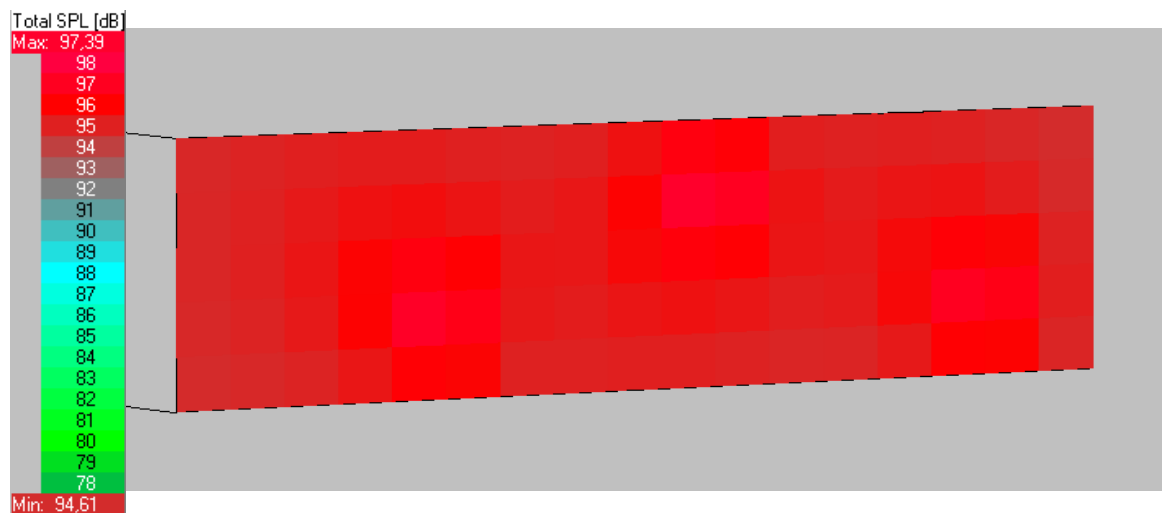
Hodnota Total SPL je v tomto případě dostačující. Dosahuje hodnot průměrně 15,28dB a nad hladinou hluku.



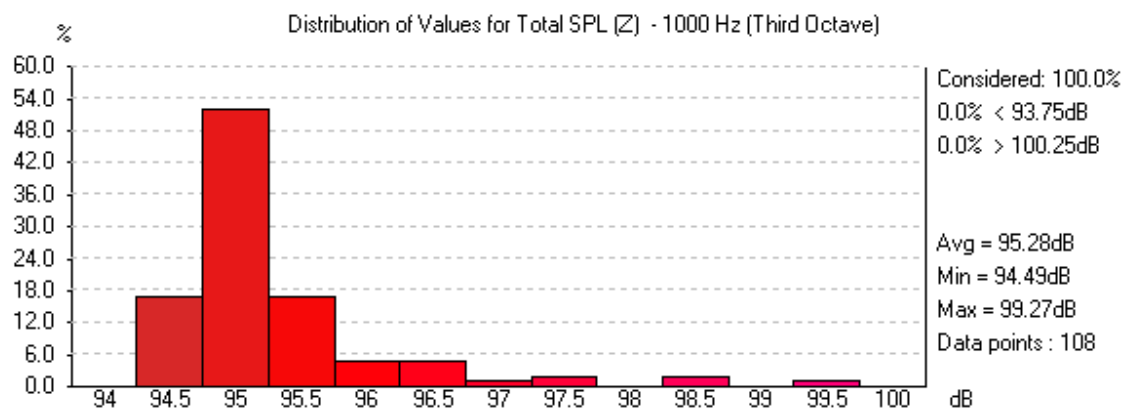
Obrázek 42 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených podhledů, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54



Obrázek 43 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54



Obrázek 44 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54



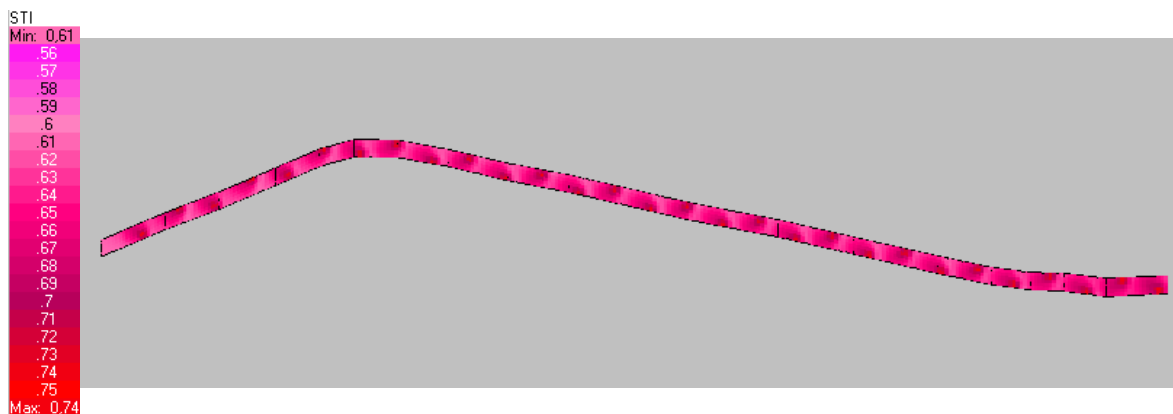
Obrázek 45 Distribuční rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK - MH 30/T PUS - EN54

### 10.5.1.2 Simulace s upravenými pohledy

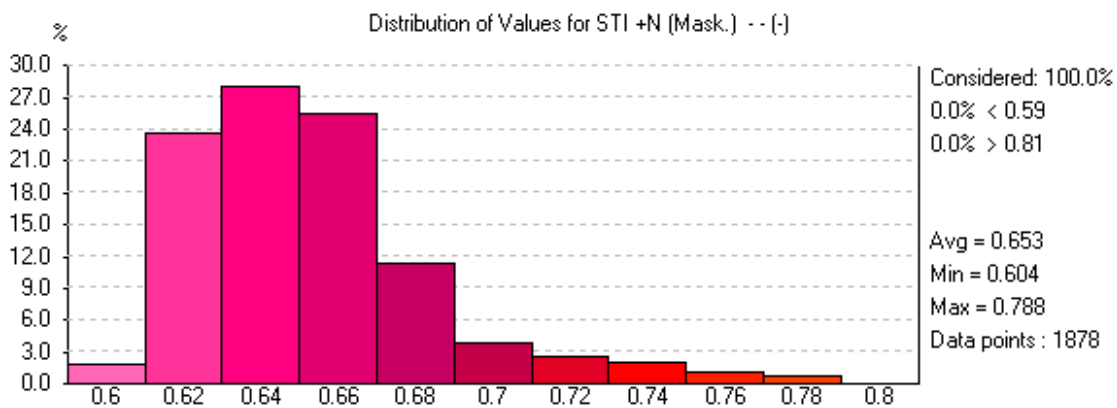
Podhledy v této simulaci jsou upraveny materiálem TECTUM109 s vyšším absorpčním koeficientem. Zobrazená simulace byla vytvořena tak, aby splňovala hodnoty srozumitelnosti STI. V simulaci jsou použity reproduktory ve vzdálenosti 10 m od sebe. Vyšší vzdálenost mezi reproduktory nedosahovala v simulaci uspokojivých hodnot. Reproduktory jsou natočené o  $\pm 25^\circ$  horizontálně a o  $-10^\circ$  vertikálně umístěné na stěně tunelu ve výšce 2,20 m.

Při simulaci bylo použito celkem 29 reproduktorů zapojených na maximální výkon. Jedná se tedy o velké množství reproduktorů na tunel dlouhý pouze 303m a realizace by byla nákladná.

Průměrná hodnota STI je 0,653. U hodnoty Total SPL se pohybujeme kolem spodní hranice odstupů od pozadí hluku daného normou. Průměrná hodnota Total SPL je 87,42dB.

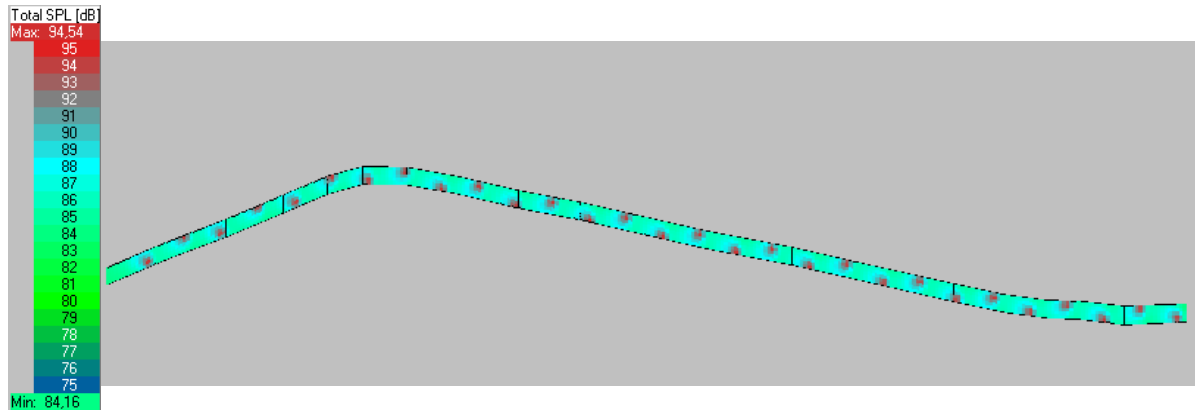


Obrázek 46 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI s upravenými pohledy, repro DK – MH 30/T – PLUS – EN54

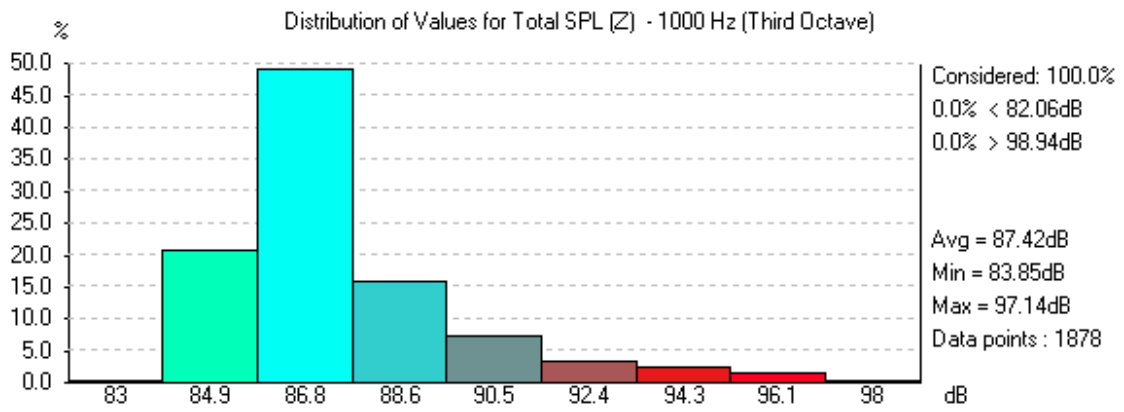


Obrázek 47 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI s upravenými pohledy, repro DK - MH 30/T – PLUS – EN54

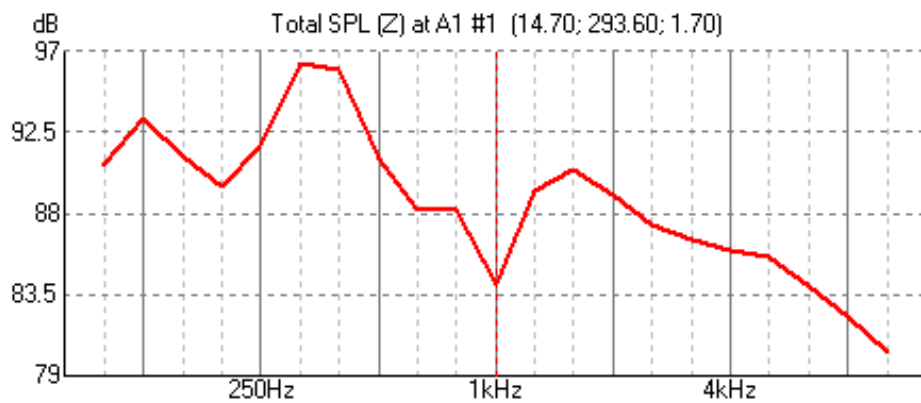




Obrázek 48 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu s upravenými podhledy, repro DK – MH 30/T – PLUS EN54



Obrázek 49 Distribuční rozdělení parametru Total SPL s upravenými podhledy, repro DK - MH 30/T – PLUS – EN54



Obrázek 50 Frekvenční závislost parametru Total SPL, repro DK - MH 30/T PLUS - EN54

## 10.5.2 Simulace s reproduktorem DK 30/T - EN54

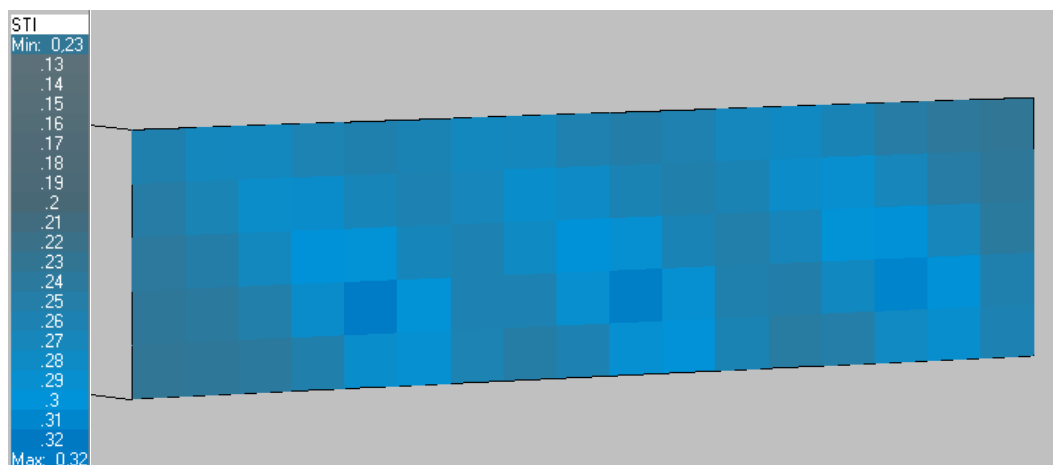
### 10.5.2.1 Simulace bez upravených pohledů

Stejně tak jako u reproduktoru DK MH 30/T PRUS – EN54 byla studie vypracována bez upravených pohledů, tedy v případě, kdy všechny stěny mají absorpční koeficient beton a bylo vyzkoušeno různých umístění a natočení reproduktorů. Vyzkoušeno bylo umístění jak uprostřed stropu, tak na stěnách nad poslechovou úrovní. Avšak žádná z variant nesplňovala požadavky srozumitelnosti dané normou – tedy hodnotu STI vyšší než 0,5.

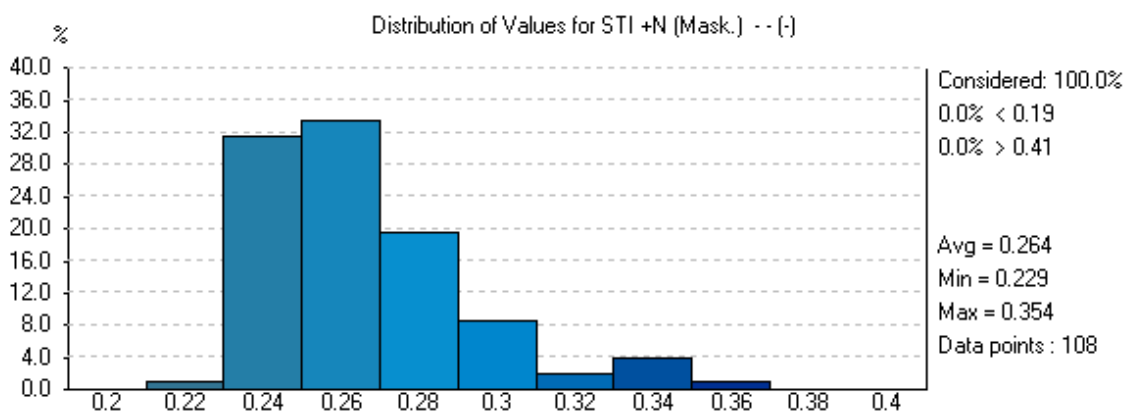
Jako příklad studie uvádím simulaci, která dosahuje nejlepších hodnot. Reproduktry by byly namontovány každých 5 m v tunelu, což by bylo velmi nákladné. Zobrazená simulace je pro první úsek tunelu. V celém tunelu by muselo být použito 60 reproduktorů. Reproduktry jsou natočené o - 45° horizontálně a o - 5° vertikálně umístěné na stěně tunelu ve výšce 2,20 m. Průměrná hodnota STI v uvedené studii dosahuje průměrných hodnot 0,264. Srozumitelnost se vzdávající od reproduktoru velmi rychle klesá, a to především díky vysoké době dozvuku.

Hodnota Total SPL v tomto případě dosahuje průměrné hodnoty 32,48dB nad úrovní hluku pozadí.

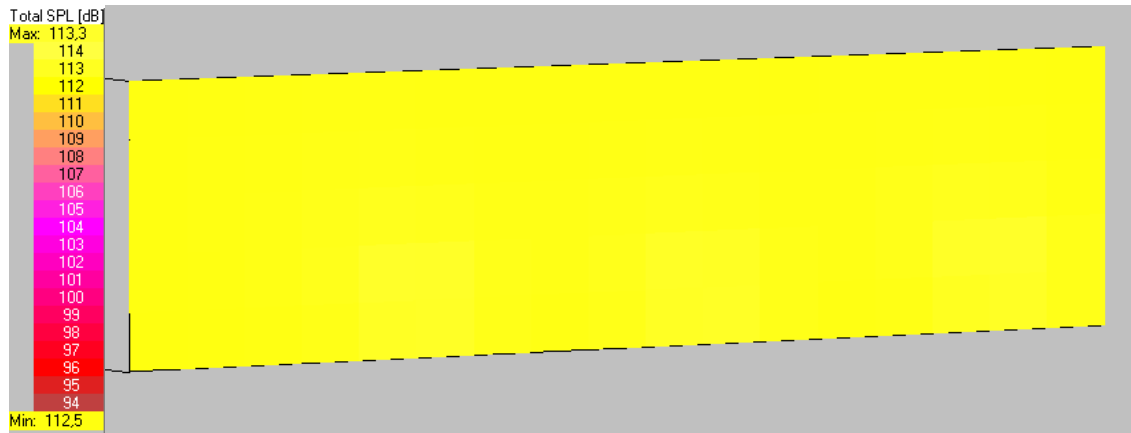
Oproti reproduktoru DK MH 30/T – EN54 dosahuje tento reproduktor o něco horší srozumitelnost, avšak daleko vyšších hladin hodnoty Total SPL.



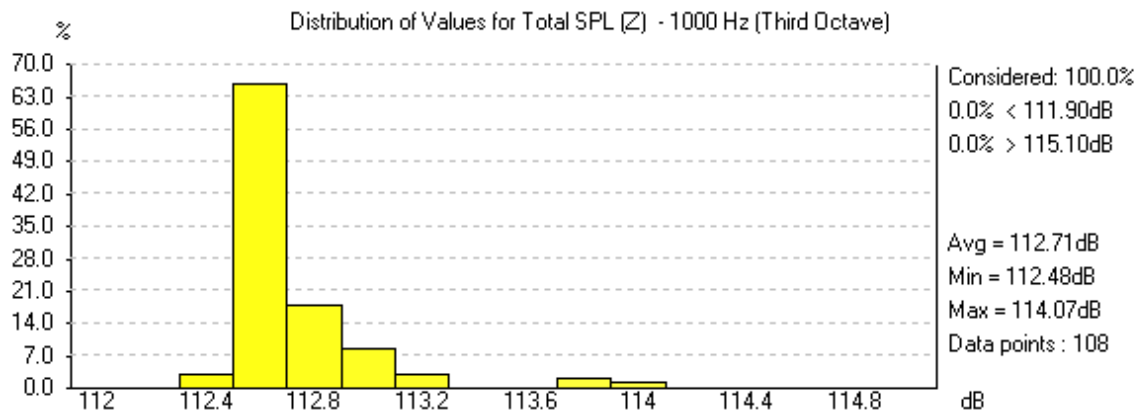
Obrázek 51 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T – EN54



Obrázek 52 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T - EN54



Obrázek 53 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T - EN54

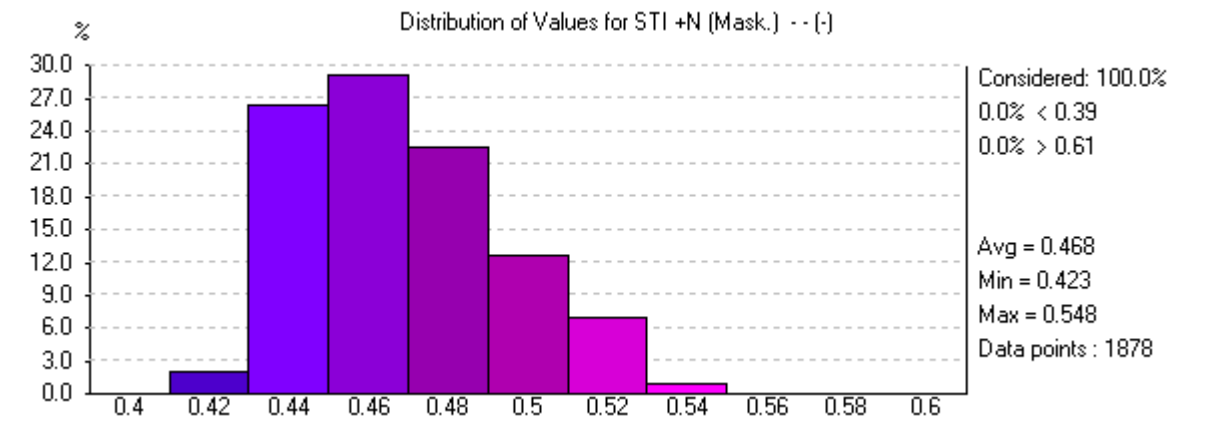


Obrázek 54 Distribuční rozložení parametru Total SPL na prvním úseku tunelu bez upravených pohledů, repro DK 30/T - EN54

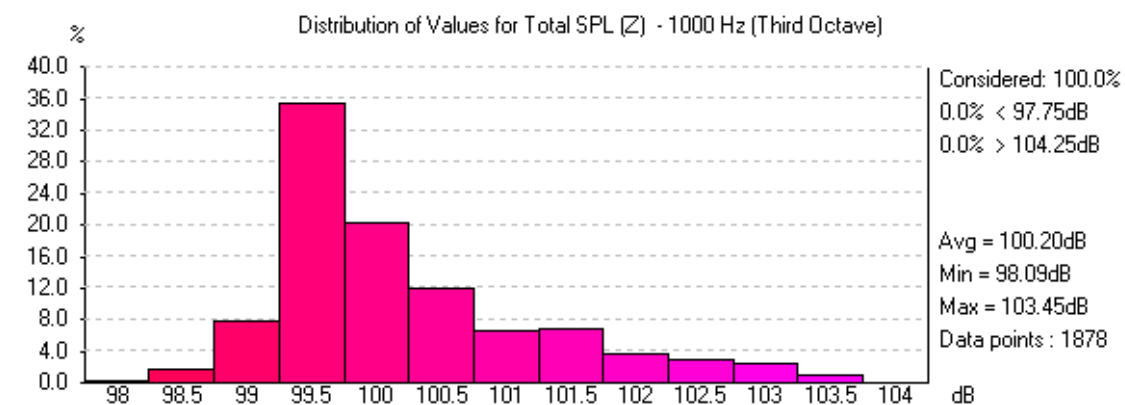
### 10.5.2.2 Simulace s upravenými pohledy

Pro tento reproduktor je uvedeno několik různých výsledků studií pro porovnání.

Při umístění reproduktorů na stropě se jako nejlepší varianta ukázalo umístění reproduktoru na střed stropu každých 10 m, vertikálně otočené o 15°. Při tomto rozmístění se průměrná hodnota STI v tunelu při simulaci pohybuje kolem 0,468 a hodnota SPL kolem 100,20dB. Hodnota hladiny akustického tlaku je dostačující, hodnota STI se pohybuje pod hranicí srozumitelnosti 0,5. Avšak hodnota 0,45 je uváděna jako nejnižší možná přípustná u tunelů, kde není možné dosáhnout lepších hodnot srozumitelnosti.

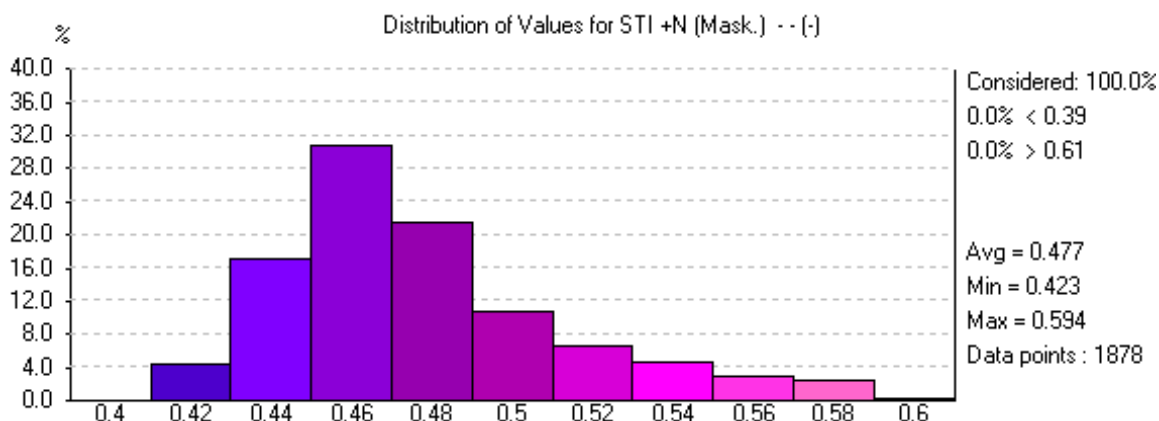


Obrázek 55 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na strop tunelu

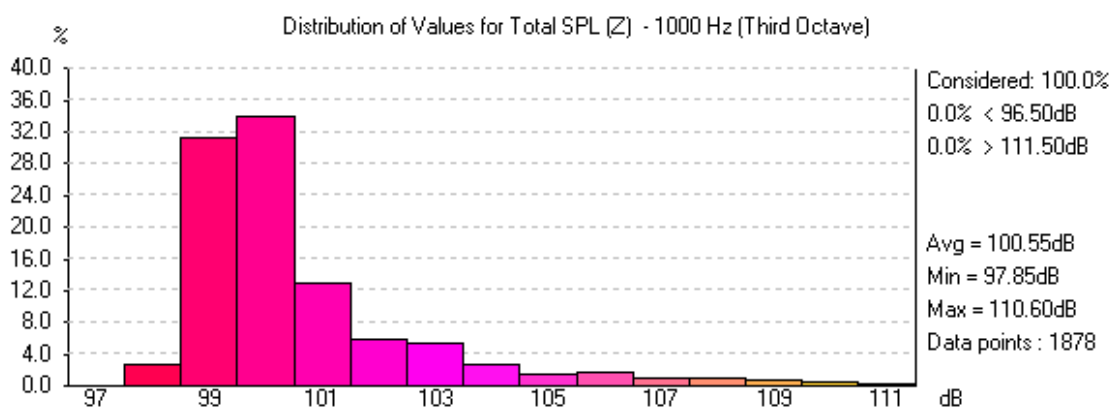


Obrázek 56 Distribuční rozložení parametru Total SPL při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na strop tunelu

Při umístění reproduktorů na stěnu tunelu, tedy blíže k poslechové zóně, než při umístění na strop dosahujeme během studie lepších hodnot. Při umístění reproduktorů ve výšce 2,2 m, otočených o  $-27^\circ$  horizontálně a  $-7^\circ$  vertikálně dostáváme průměrnou hodnotu STI 0,477 a hodnotu Total SPL 100,55dB. Především u hodnoty STI dostáváme mírně vyšší průměrnou hodnotu STI a blížíme se tedy k požadované hodnotě 0,5. Tuto hodnotu se mi ale během simulací nepodařilo s tímto reproduktorem dosáhnout.



Obrázek 57 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na stěnu tunelu

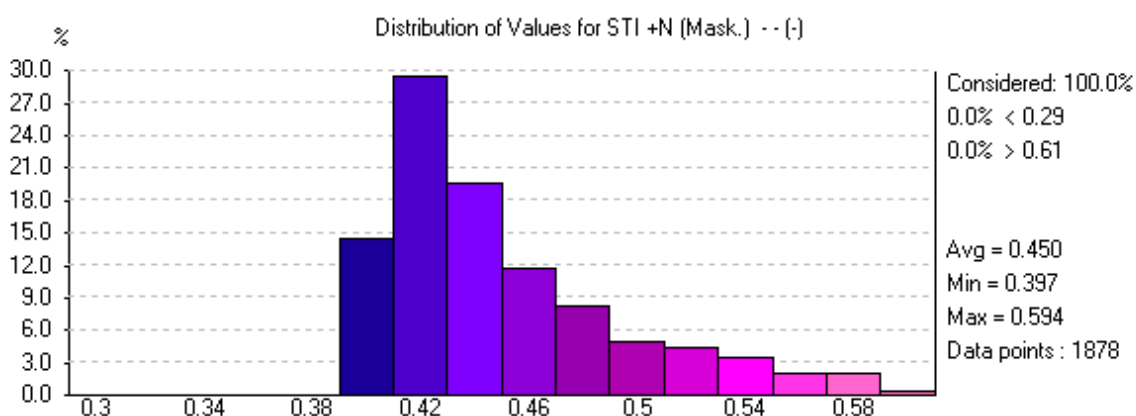


Obrázek 58 Distribuční rozložení parametru Total SPL při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 10 m na stěnu tunelu

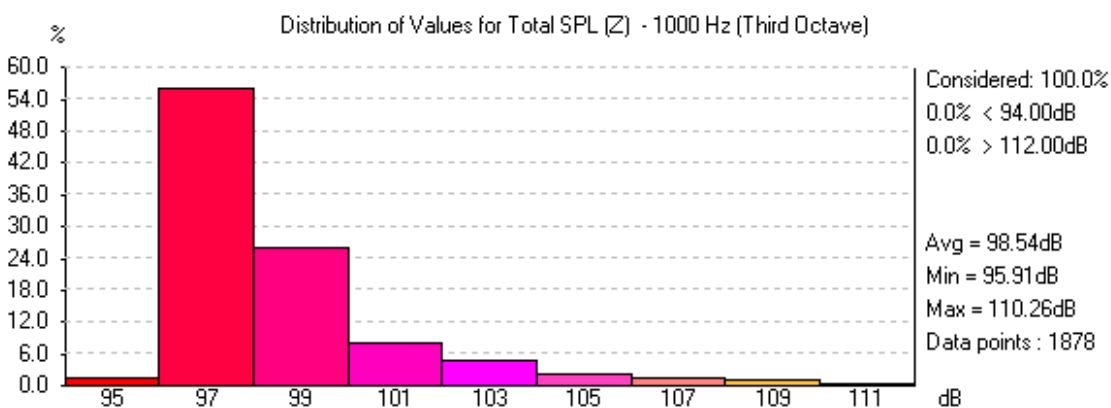
Použití reproduktorů každých 10 m v tunelu je poměrně nákladnou variantou, avšak při použití větších vzdáleností mezi reproduktory se snižuje hodnota STI.

Jako další příklad je uvedena simulace, kdy je použit jeden reproduktor každých 15 m. Je umístěn na stěnu ve výšce 2,2 m. Celkem bylo k simulaci použito 19 reproduktorů, otočených  $-30^\circ$  horizontálně a  $-5^\circ$  vertikálně. Průměrná hodnota STI sice oproti předchozí uvedené studii klesla na 0,45, ale na druhou stranu by tato varianta byla méně nákladná a také méně náročná na údržbu než předchozí varianta.

Při použití 1 reproduktoru na 20 m klesne průměrná hodnota STI na 0,433.



Obrázek 59 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 15 m na stěnu tunelu



Obrázek 60 Distribuční rozložení parametru Total SPL při umístění reproduktoru DK 30/T - EN54 každých 15 m na stěnu tunelu

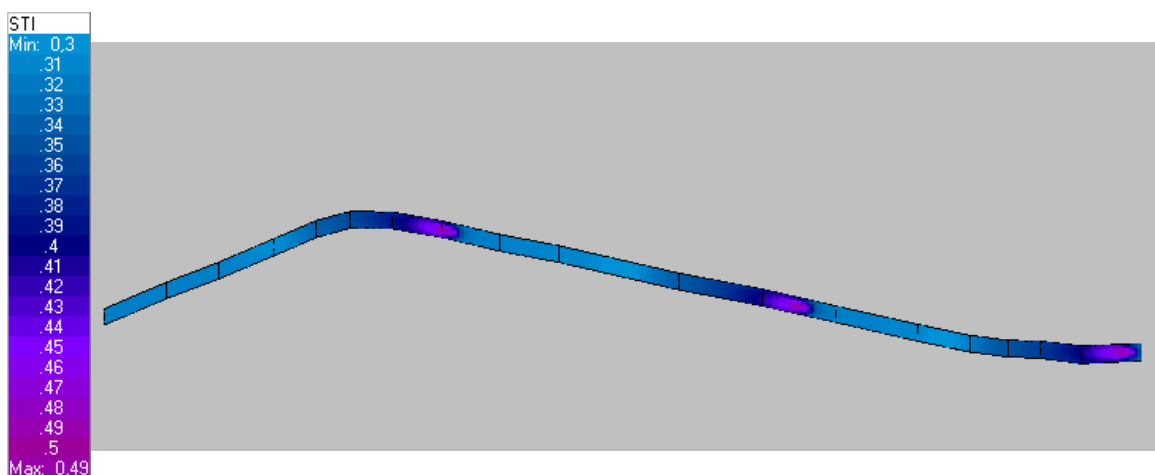
### 10.5.3 Simulace s reproduktorem TH – 100 - EN54

#### 10.5.3.1 Simulace bez upravených podhledů

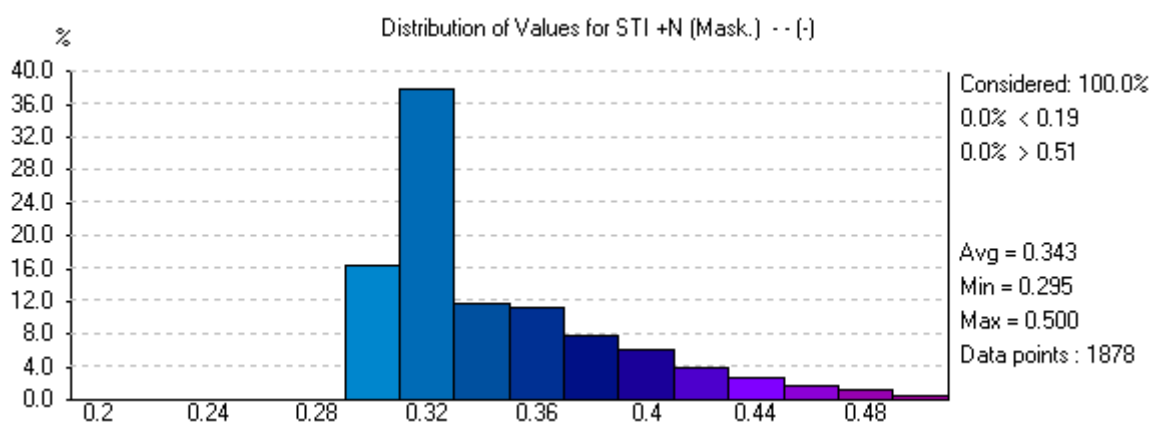
Pokud chceme ozvučit tunel bez jakýchkoliv akustických úprav tunelu, bude problémem dosáhnout srozumitelnosti, a to jak kvůli nízkým absorpčním koeficientům stěn, tak také díky vysoké hladině hluku.

Následující simulace využívá tři reproduktory TH – 100 – EN54 umístěné na strop tunelu. Při použití většího množství reproduktorů se výsledky mírně zlepší, ale zvýší se také náklady na realizaci a údržbu. Volba uvedení simulace se třemi reproduktory je především pro srovnání s další uvedenou simulací, která používá stejné rozložení reproduktorů v tunelu, ale je vytvořena pro situaci s upravenými podhledy.

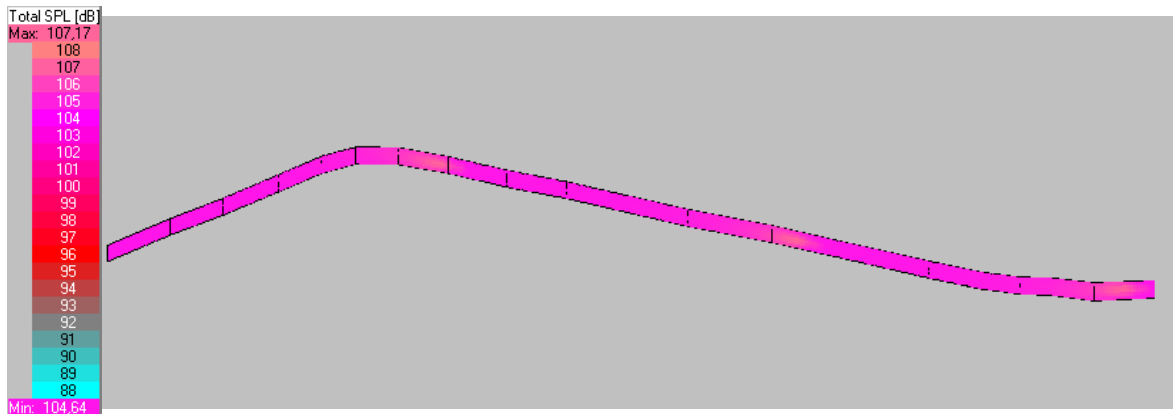
Hodnota STI dosahuje hodnot v rozsahu 0,295 – 0,5, průměrně hodnoty 0,343. Hodnoty tedy nedosahují míru kvalitního srozumitelného přenosu. Hodnoty parametru Total SPL nabývají hodnot průměrně 105,05dB. Pohybují se tedy 25dB a více nad úroveň hluku pozadí. V tomto případě dostáváme konstantnější pokrytí hodnotou Total SPL než v případě studie s upravenými podhledy.



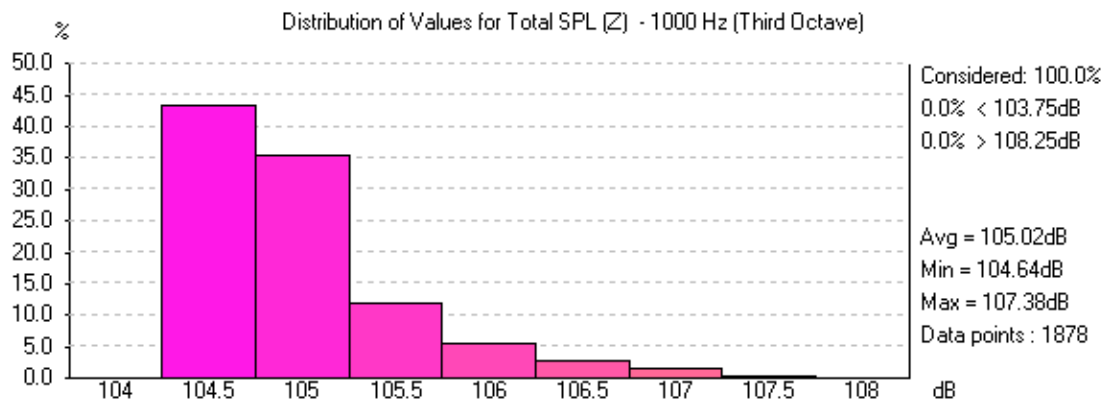
Obrázek 61 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI bez upravených podhledů, repro TH - 100 - EN54



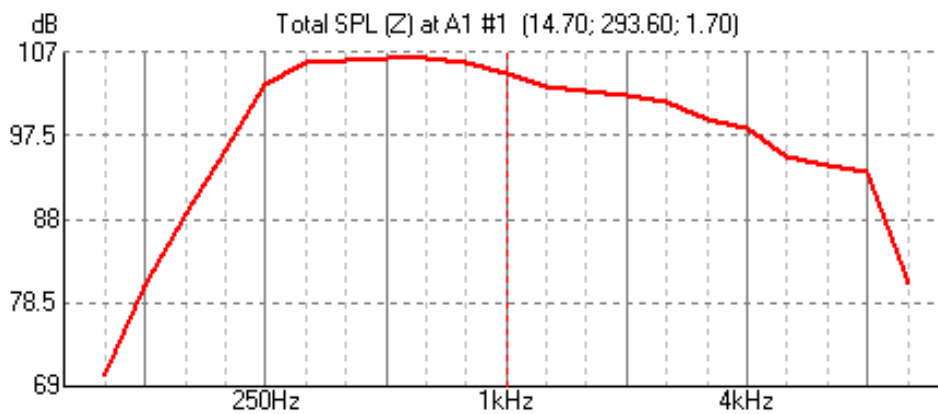
Obrázek 62 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI bez upravených podhledů, repro TH – 100 - EN54



Obrázek 63 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54



Obrázek 64 Distribuční rozložení parametru Total SPL bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54



Obrázek 65 Frekvenční závislost parametru Total SPL bez upravených pohledů, repro TH – 100 - EN54

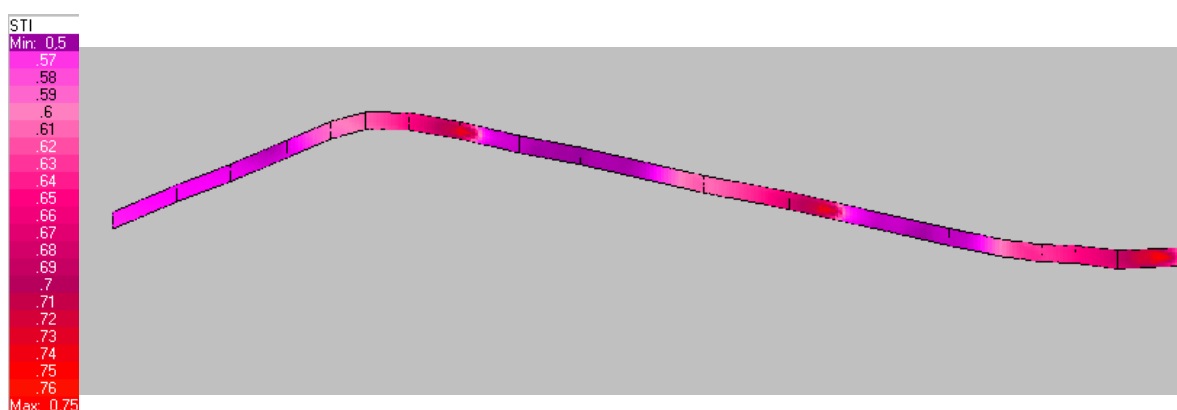


### 10.5.3.2 Simulace s upravenými pohledy

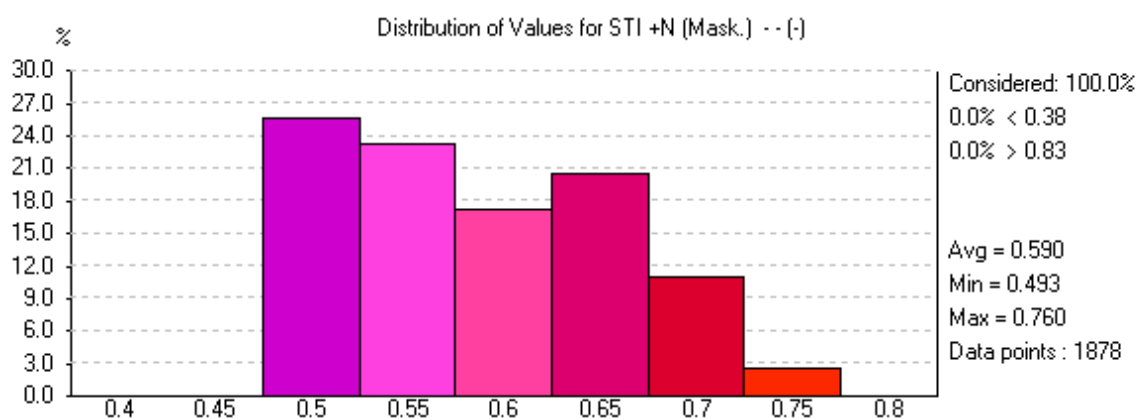
Je patrné že tento reproduktor je konstruován pro použití v tunelu, protože i při vysokých hladinách hluku je možné při použití menšího počtu zdrojů dosáhnout hodnot splňujících normu. Následující simulace počítá s upravenými pohledy materiálem TECTUM109.

V následující simulaci jsou použity tři reproduktory TH – 100 – EN54, které jsou umístěny na prostředek stropu tunelu. Hodnoty STI dosahují hodnot od 0,5 do 0,75 (průměrná hodnota STI je 0,59), což se v souladu s normou. U hodnot SPL se výsledek simulace pohybuje od 10dB a více nad úrovní hluku pozadí, což je rovněž v souladu s normou.

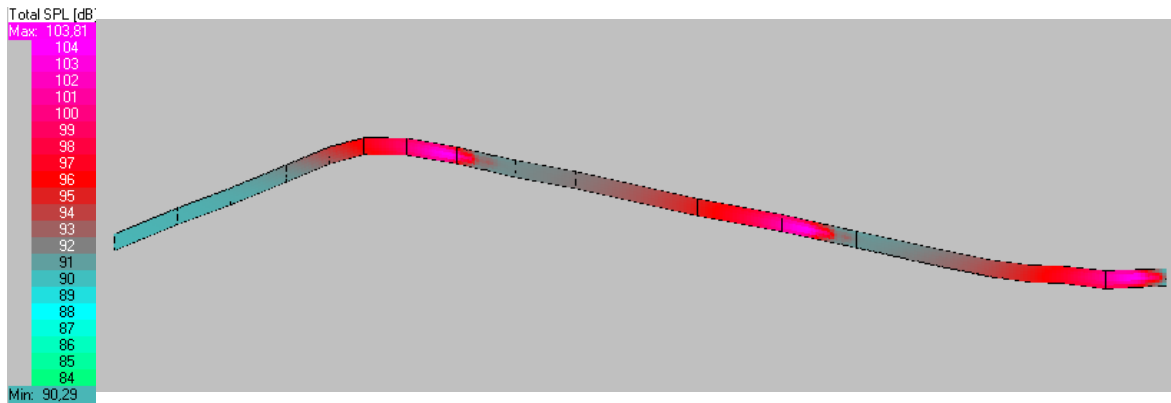
Tato simulace dosahuje nejlepších výsledků ze všech uvedených. Při použití pouze dvou reproduktorů nedosahovala simulace dostatečných hodnot.



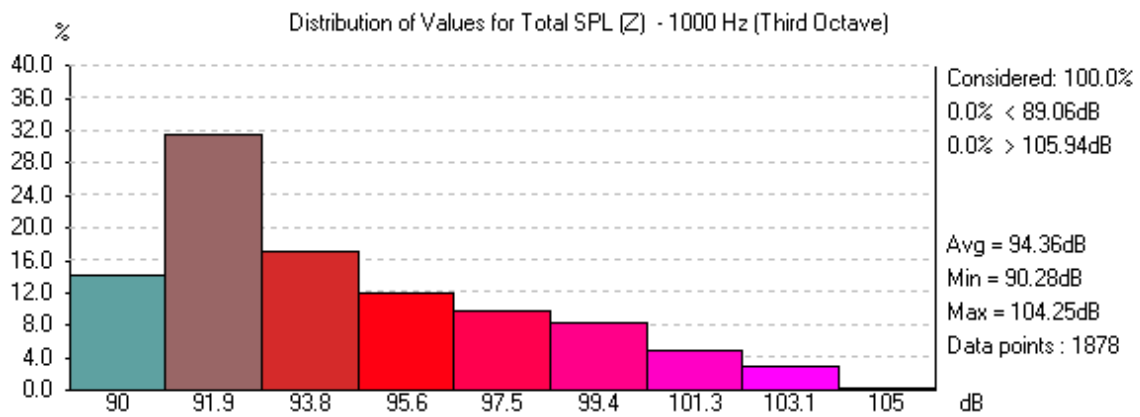
Obrázek 66 Simulace rozložení parametru srozumitelnosti STI s upravenými pohledy, repro TH – 100 - EN54



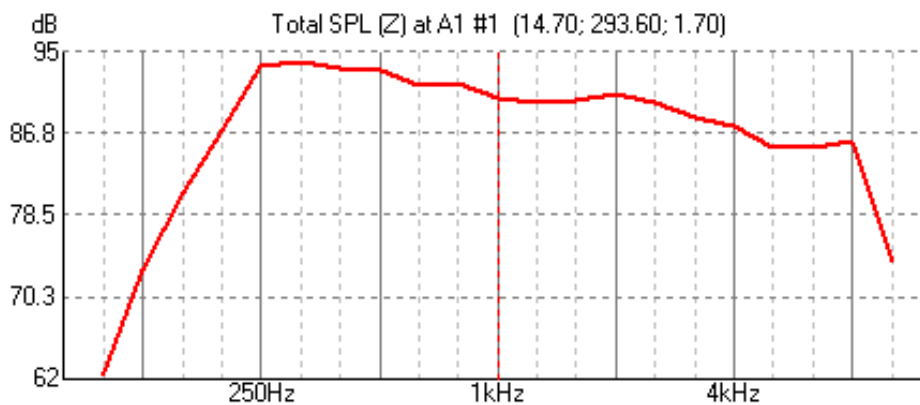
Obrázek 67 Distribuční rozdělení parametru srozumitelnosti STI s upravenými pohledy, repro TH – 100 - EN54



Obrázek 68 Simulace plošného rozložení parametru Total SPL s upravenými pohledy, repro TH – 100 - EN54



Obrázek 69 Distribuční rozložení parametru Total SPL s upravenými pohledy, repro TH – 100 - EN54



Obrázek 70 Frekvenční závislost parametru Total SPL s upravenými pohledy, repro TH – 100 - EN54

## 11 ZÁVĚR

---

Tato bakalářská práce byla zaměřena na akustickou studii pěšího Žižkovského tunelu, a kromě teoretického rozboru problematiky obsahuje porovnání několika vytvořených studií s reproduktory firmy ic audio – TH – 100 – EN54, DK 30/T – EN54 a DK – MH 30/T PLUS – EN54.

Výsledná akustická studie by měla zajistit vynikající srozumitelnost řeči i přes všechny nepříznivé vlivy. A nejen to, z hlediska instalace a ekonomiky je ideální minimální počet zdrojů. Méně instalačních bodů sníží náklady nejen na instalaci, ale také na následnou údržbu. Reprodaktor by měl být úzce směrový, měl by mít vysoký výkon a nízké zkreslení i na větší vzdálenosti.

Na základě orientačního měření v tunelu byla hodnota relativní vlhkosti vzduchu použitá pro studie stanovena na 60% a hlučnost prostředí na 80dB.

Vzhledem k vysoké hladině hluku a nízkému absorpčnímu koeficientu stěn nedostáváme pro tunel hodnoty srozumitelnosti, které by zaručovaly srozumitelnost evakuačního rozhlasu. Při použití běžných tlakových reproduktorů, tedy DK 30/T – EN54 a DK – MH 30/T PLUS – EN54, by i v případě úpravy podhledů tunelu speciálním nehořlavým a vysoce odolným materiálem s vyšším absorpčním koeficientem hodnoty nedosahovaly přijatelných hodnot, pokud by nebylo použito velkého množství reproduktorů.

Důležitou součástí práce je vytvoření akustické studie se speciálním reproduktorem TH – 100 – EN54 určeným pro použití v tunelu, který díky svým vlastnostem umožňuje použití menšího počtu reproduktorů. Tento reproduktor zatím není v ČR použit. Po úpravě podhledů tunelu dostáváme pak při použití 3 zdrojů na tento 303 m dlouhý Žižkovský tunel hodnoty STI větší než 0,5, které zaručují kvalitní a srozumitelné hlášení tohoto evakuačního rozhlasu.

Hodnota STI není ale to jediné, co je třeba při tvorbě akustické studie hlídat. Je třeba také sledovat hodnotu parametru Total SPL, která musí být minimálně o 6 – 20dB nad úrovní hluku pozadí. To bylo nejtěžší dosáhnout u reproduktoru DK - MH 30/T PUS - EN54 v simulaci s upravenými podhledy. Katalogová hodnota SPL tohoto reproduktoru je ze všech uvedených reproduktorů nejnižší.

Jako nejvhodnější variantu řešení evakuačního rozhlasu v Žižkovském tunelu považují investovat do úpravy podhledů a ozvučit jej reproduktory TH – 100 – EN54, které zajistí jak srozumitelnost, tak dostačující odstup hodnot akustického tlaku od hladiny hluku v tunelu. Vzhledem k tomu, že mi nejsou známy ceny tohoto reproduktoru a nákladnost úprav prostoru, bylo by to třeba ještě důkladně zvážit po ekonomické stránce.

Vypracování akustické studie bývá podkladem pro následnou instalaci v řešeném prostoru. Po instalaci je nutné uskutečnit měření v prostoru a ověřit tak, zda hodnoty dosažené ve studii budou skutečně dosaženy i po instalaci. Studie s reproduktorem TH – 100 - EN54 může být podkladem pro budoucí řešení evakuačního rozhlasu v Žižkovském tunelu. První použití tohoto reproduktoru v České republice může být základem pro použití v dalších tunelech, které již nevyhovují dnešním nárokům na bezpečnost.

## 12 ZDROJE / POUŽITÁ LITERATURA

---

1. *Fire Safety - ITA-AITES* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground/safety/fire-safety>
2. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2004/54/ES: o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://tunnels.piarc.org/sites/tunnels/files/public/wysiwyg/import/Other%20documents/European%20Directive%20Cs.pdf>
3. *Řešení s certifikací EN 54: vysvětlení*. Bosch Security Systems [online]. 2011 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [http://s3.abbas.cz/PRODUKT/Datasheet/Bosch\\_audio/BOSCH\\_EN54\\_booklet\\_CS.pdf](http://s3.abbas.cz/PRODUKT/Datasheet/Bosch_audio/BOSCH_EN54_booklet_CS.pdf)
4. KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
5. SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
6. KRÁLOVÁ, Magda. *Člověk a zvíře: SLUCHOVÝ ROZSAH*. Techmania Science Center [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/katalog/clovek-zvire/316/sluchovy-rozsah>
7. SEDLÁŠEK, Karel. *Základy audiologie*. Praha: Státní zdravotnické nakladatelství, 1956.
8. KUTMAN, Otakar. *Fyzika : Díl 2., Akustika*. 1. vyd. Praha : České vysoké učení technické, 1991. 59 s. ISBN 80-0100-655-7.
9. MERHAUT, Josef. *Teoretické základy elektroakustiky*. 3., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Academia, 1976.
10. KAŇKA, Jan a Jiří NOVÁČEK. *Stavební fyzika 3*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05674-5.
11. ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
12. *Curso de medidas acústicas* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://audioforo.com/2015/03/18/curso-de-medidas-acusticas-3-como-mido-el-tr/>
13. RAJMAN, Jiří. *Produktové školení [přednáška]*. Praha: ČVUT, 2017.
14. SVOBODA, Ladislav a Miloslav ŠTEFAN. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. 3. přeprac. vyd., dot. Praha: SNTL, 1983.
15. ČSN EN 60268-16. *Elektroakustická zařízení: Část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*. Ed. 2. 2012.
16. ČSN EN 54-24. *Elektrická požární signalizace: Část 24: Komponenty hlasových výstražných systémů - Reproduktory*. 2008.
17. ČSN IEC 268-5. *Elektroakustická zařízení: Část 5: Reproduktory*. 2004.
18. ČSN EN 60849. *Nouzové zvukové systémy*. 1999.

19. HUSNÍK, Libor. *Objektivní hodnocení poslechových prostor* [přednáška]. Praha: ČVUT.
20. *Sound system equipment: Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index* [online]. 2012 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/BS%20EN%2060268-16.pdf>
21. *APPLICATION NOTE: Measuring Speech Intelligibility using DIRAC Type 7841*. Brüel & Kjaer [online]. 2013-12 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bo0521.pdf>
22. *Speech Intelligibility: Measurement with XL2 Analyzer* [online]. NTI audio [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [https://elimex.hu/upload/files/NTI\\_STI-PA.pdf](https://elimex.hu/upload/files/NTI_STI-PA.pdf)
23. *ABSORPTION COEFFICIENTS* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [http://www.acoustic.ua/st/web\\_absorption\\_data\\_eng.pdf](http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf)
24. *Sound absorption coefficient* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Audrius\\_Vaitkus/publication/304530168/figure/fig3/AS:406672708259843@1473969737300/Sound-absorption-coefficient-for-different-asphalt-mixtures.png](https://www.researchgate.net/profile/Audrius_Vaitkus/publication/304530168/figure/fig3/AS:406672708259843@1473969737300/Sound-absorption-coefficient-for-different-asphalt-mixtures.png)
25. *Design of voice alarm systems for traffic tunnels: oprimisation of speech intelligibility* [online]. The Netherlands: Duran Audio BV [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.iris.co.nz/media/17037/Duran-Audio-VA-systems-in-tunnels.pdf>
26. ČSN EN 54-3. *Elektrická požární signalizace: Část 3: Požární poplachová zařízení - Sirény*. Ed. 2. 2015.
27. *Královská města Žižkov* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.zizkov.cz/clanek.asp?id=271>
28. *Mapy.cz* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz>
29. *Sound Level Meter. Edufor s. r. o.* [online]. 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/slm-bta>
30. *DHT11 Humidity & Temperature Sensor. Mouser Electronics* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>
31. *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer: DS18B20. Maxim Integrated Products, Inc.* [online]. 2015 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
32. *Fireproof Acoustic Panels – FR30. QUIETSTONE* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: [https://elimex.hu/upload/files/NTI\\_STI-PA.pdf](https://elimex.hu/upload/files/NTI_STI-PA.pdf)
33. *ic audio* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.ic-audio.com/katalog>
34. ČECHURA, Jiří. *Stavební fyzika 10: akustika stavebních konstrukcí*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01593-9.
35. *Akustické izolace v přičkách* [online]. 2.9.2016 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/aktuality/akusticke-izolace-v-prickach>