

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI**

**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

Katedra experimentální fyziky



**Experimentální ověření vlivu teploty a vlhkosti vzduchu na  
výsledek měření hluku terénním zvukoměrem.**

Diplomová práce

Jakub Orolín

2019

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**  
Katedra experimentální fyziky



**Experimentální ověření vlivu teploty a vlhkosti vzduchu na  
výsledek měření hluku terénním zvukoměrem.**

Diplomová práce

Autor:	Jakub Orolín
Studijní program:	B1701 Fyzika
Obor:	Aplikovaná fyzika
Forma:	Prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Tomáš Rössler, Ph.D.
Termín odevzdání:	Červen 2019

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Experimentální ověření vlivu teploty a vlhkosti vzduchu na výsledek měření hluku terénním zvukoměrem.“ vypracoval sám, pod vedením RNDr. Tomáše Rösslera, Ph.D. s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury a souhlasím s jejím použitím pro potřeby katedry, včetně libovolné formy prezentace.

V Olomouci dne .....2019

Jakub Orolín.....

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce RNDr. Tomáši Rösslerovi, Ph.D za jeho vedení a rady. Vedení firmy Ecological Consulting a.s. za to, že mi umožnilo využívat firemní vybavení pro účely této práce. Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě při studiu podporovali a poskytovali někdy tolik potřebné povzbuzení a milé rozptýlení.

## **Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora:	Jakub Orolín
Název práce:	Experimentální ověření vlivu teploty a vlhkosti vzduchu na výsledek měření hluku terénním zvukoměrem.
Typ práce:	Diplomová
Pracoviště:	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce:	RNDr. Tomáš Rössler, Ph.D
Rok obhajoby práce:	2019
Počet stran:	54
Jazyk:	Český

## **Abstrakt**

Při venkovním šíření zvuku se na jeho útlumu projevuje celá řada faktorů včetně meteorologických podmínek. V rámci své práce budu zkoumat faktory, které se na útlumu zvuku podílí, přičemž velkou pozornost budu věnovat závislosti na meteorologických podmínkách. Provedu sérii měření, pomocí kterých zachytím útlum generovaného hluku. Totéž měření budu také simulovat ve speciálním akustickém softwaru. Srovnám výsledky modelu a měření a porovnáám je s vlastnoručně vypočítanými hodnotami útlumu.

**Klíčová slova:** šíření zvuku, akustika, útlum zvuku, terénní měření hluku.

## **Bibliographical identification:**

Autor's first name and surname:	Jakub Orolín
Title:	Experimental verification of the influence of temperature and air humidity on the noise measurement of the terrain meter.
Type of thesis:	Master
Departement:	Departement of Experimental Physics
Supervisor:	RNDr. Tomáš Rössler, Ph.D
The year of presentation:	2019
Number of pages:	54
Language:	Czech

## **Abstract**

There is a lot of factor affecting outdoor sound propagation. In my thesis, I will examine these factors influencing noise attenuation and with a special attention to influence of meteorological conditions. I will make a series of field measurements to detect noise attenuation with different weather conditions. By using of special acoustic software I will also make simulation of my experiment. Results of simulation will be compared with real measurement results and with my personal calculation of noise attenuation.

**Keywords:** sound propagation, acoustic, sound attenuation, field noise measurement.

## Obsah

1. Úvod .....	2
2. Fyzika akustiky.....	2
2.1. Hluk a jeho vliv na zdraví .....	2
2.2. Historie fyziky zvuku .....	2
2.3. Zvuk a jeho veličiny.....	4
2.4. Akustika .....	8
3. Parametry měření a mikrofonu.....	15
3.1. Frekvenční filtry .....	15
3.2. Časové vážení.....	15
3.3. Šum .....	16
3.4. Mikrofon .....	16
4. Šíření zvuku ve venkovním prostoru .....	20
4.1. Zdroj.....	20
4.2. Meteorologické faktory .....	21
4.3. Atmosférický faktor .....	22
4.4. Vliv terénu.....	25
4.5. Překážky.....	26
5. Model .....	27
5.1. Zjednodušený model .....	27
5.2. Reálný model .....	30
6. Experiment .....	32
7. Vyhodnocení dat .....	39
7.1. Výsledky modelu.....	39
7.2. Výsledky měření .....	42
7.3. Zhodnocení a srovnání.....	45
8. Závěr.....	50
9. Literatura.....	51
10. Přílohy.....	54
Příloha 1 – kalibrační list zvukoměru .....	54
Příloha 2 – kalibrační list mikrofonu.....	55

## 1. Úvod

S čím dál tím rozsáhlejšíím využitím strojů v lidské společnosti, se začíná projevovat relativně nová problematika a tou je vysoká míra hlukové zátěže v obytných oblastech. Množství zdrojů hluku neustále roste, například lze uvést nárůst pozemní dopravy nebo čím dál tím běžnější klimatizace a tepelná čerpadla a všechny tyto zdroje neustále produkují hluk, který se kumuluje a negativně ovlivňuje blízké i vzdálené okolí. Protože se hluk stává výrazným faktorem snižujícím kvalitu života, je potřeba se před ním chránit. Vhodná opatření však mohou být často finančně náročná a z různých důvodů i nechtěná. Proto je důležité co nejlépe porozumět způsobům šíření zvukových vln, konkrétně hluku, aby bylo možné co nejlépe předpovědět jeho šíření a navrhnout vhodná opatření. Pochopení systému šíření zvuku samozřejmě není pouze problematikou hlukové zátěže, ale má celou řadu využití i v jiných oblastech.

Obsahem práce bude prozkoumání vlivů, které se podílí na útlumu zvuku šířícího se ve venkovním prostředí. Rád bych se zaměřil na faktory, které jsou popsány v českých státních normách a které jsou závazné při tvorbě hlukových modelů. V dalším kroku vytvořím ve specializovaném akustickém softwaru model, který bude využívat metodiku výpočtu definovanou normou ČSN ISO 9613. Jeho výsledky bych chtěl porovnat s vlastními výpočty vycházejícími ze stejné normy. Na závěr provedu sérii terénních měření a takto získaná reálná data budu konfrontovat s předpoklady získanými z modelových výpočtů.

## 2. Fyzika akustiky

### 2.1. Hluk a jeho vliv na zdraví [1]

Jako hluk bývá označována množina zvuků, které jsou pro velikost své intenzity a frekvenční složení negativně vnímány a působí tak negativním vlivem na kvalitu našeho života. Nejběžnější projevy jsou snížená kvalita spánku a s tím spojená dlouhodobá únava, zhoršení nálady a sociálního chování dále také snížení psychické výkonnosti. Je-li vystavení nadměrnému hluku dlouhodobé, dochází k zhoršování výše zmíněných projevů a vzniku stresu. Přílišnou hlukovou zátěž lze tedy považovat za potenciálně patogenní činitel, který může ovlivnit výskyt dalších nemocí a zdravotních poruch.

### 2.2. Historie fyziky zvuku [2]

Zvuk, jeho vnímání, popis a záznam je spojen s lidstvem již od jeho vzniku. Umožňuje nám komunikovat, dokáže ovlivňovat naše emoce, přináší informace o dění v našem okolí. Nejen lidé, ale i další živí tvorové s ním dokážou na různých úrovních vědomí pracovat, ale za pochopením jeho podstaty stojí obrovské množství práce a je potřeba pokročilých znalostí matematiky a fyziky. Není tedy udivující, že prvotní poznatky o akustice coby vědě o vzniku, šíření a vnímání zvuku vznikaly z pouhých dedukcí a odhadů.



Kořeny vědeckého bádání sahají již do 6. století před naším letopočtem do starověkého Řecka. Učenec Pythagoras se zde zabýval harmonií zvuků. Konkrétně proč některé zvuky zní příjemně, zatímco jiné nikoliv (dnes se obor zabývající se vlivem zvuku na biologické systémy nazývá psychoakustika). Na základě svých pozorování a pokusu na monochordu (jednostrunný nástroj) pak přišel s vyjádřením harmonie pomocí celých čísel. Z jeho pozorování vycházeli následně i fyzici ve 20. století. A je mu také připisován titul zakladatele akustiky coby vědního oboru. [3]

Ve 3. století př. n. l. prezentoval Aristoteles svůj názor, že zvuk sestává z komprese a expanze vzduchu, který tak „udeří“ do vzduchu vedlejšího a tím se šíří. Ačkoliv tuto teorii dokládal spíše filozoficky než na základě fyzikálních experimentů, byl jeho odhad správný. Bohužel však dospěl k teorii, že se zvuk o vyšších frekvencích šíří rychleji, než zvuk o nižších frekvencích a tento omyl následně přetrval několik století. [4]

Kolem roku 20 př. n. l. bylo napsáno první významné dílo o stavební akustice. Jeho autorem byl římský architekt a inženýr Vitruvius. Ten ve své sbírce *De Architectura* přirovnával zvukovou vlnu k vlně vodní, s tím rozdílem, že zvuková se šíří všemi směry. Vlna, která pak na své trase narazí na překážku, se odrazí a vyruší vlnu následující. Tím vysvětloval sestupné uspořádání hlediště starověkých amfiteátrů a jejich dobré akustické vlastnosti. Dále také navrhoval využití bronzových nádob vhodných rozměrů k tomu, aby rezonovaly s žádoucími harmonickými tóny.

Moderním studiem vlnění se jako první zabýval Galileo Galilei (1564-1642), který studoval vibrace a popsal vztah mezi frekvencí zvuku a výškou vnímaného tónu. Základy, které svou prací Galileo položil, následně odstartovaly rychlý rozvoj akustiky.

Dalším zajímavým milníkem bylo generování zvukové vlny s přesně danou frekvencí. To se povedlo anglickému fyziku Robertu Hookeovi (1635-1703) pomocí rotace ozubeného kola. Tento přístroj o století později následně zdokonalil Felix Savart (1791-1841) podle něž nese označení Savartovo kolo. Savart s jeho pomocí dokazoval vztah mezi frekvencí a výškou tónu při zkoumání rozsahu lidského sluchu.

Roku 1660 se vědci Robertu Boyleovi podařilo pomocí pokusu se zvonem umístěným ve vakuu, že je potřeba média pro přenos zvuku. Tento pokus byl realizován i dříve, avšak kvůli nedostatku vakuových technologií nepřinesl nikdy přesvědčivé výsledky. Za zmínku také stojí, že ani Boyle nedosáhl úplného vakua, pouze snížil hustotu vzduchu natolik, že nebyl schopen převést zvukovou vlnu na okolní skleněnou nádobu. Hlavním poznatkem, který z tohoto pokusu plynul, bylo potvrzení vlnové, nikoliv částicové, povahy zvuku.

Když byla známá vlnová podstata zvuku, začalo se mnoho vědců zajímat o změření rychlosti šíření. Prvním průkopníkem byl francouzský vědec Pierre Gassendi (1592-1655), který správně usuzoval, že zatímco rychlost světla je efektivně nekonečná, rychlost zvuku nikoliv. Proto začal provádět pozorování, během kterých měřil čas mezi zahlednutím a

zaslechnutím výstřelu. A ačkoliv rychlost, kterou naměřil, byla dosti nadhodnocená – 478,4 m/s, správně odvodil, že rychlost nezávisí na frekvenci zvuku.

Přestože byla rychlost zvuku záhy změřena mnohem lépe, až italský fyzik G. L. Bianconi roku 1750 dokázal, že rychlost zvuku roste s teplotou. V té době byla rychlost zvuku uváděna jako 332 m/s.

Spolu s těmito fyzikálními experimenty a objevy se vyskytla i potřeba jejich teoretického pochopení a matematického popisu. V tomto odvětví by se za pomyslný počátek mohl považovat rok 1715, kdy anglický matematik Brook Taylor vydal své dílo *Methodus Incrementorum Directa et Inversa*, kde prezentuje výpočet konečných rozdílů. Pomocí tohoto matematického postupu pak Taylor řešil celou řadu fyzikálních problémů včetně vibrací struny. Ačkoliv se jeho matematický popis shodoval s experimenty, nedokázal spočítat vibrace systému jako celku.

To dokázal až Jean Le Rond d'Alembert roku 1740, kdy pomocí Newtonových a Leibnizových matematických objevů vymyslel metodu parciálních diferenciálních rovnic, kterou aplikoval na výpočet obecné vlnové rovnice, své poznatky na toto téma prezentoval roku 1747 ve svém díle *Recherches sur les cordes vibrantes*.

Na tyto výpočty následně navázal Daniel Bernoulli, Leonhard Euler a Joseph-Louis Lagrange, kteří nové postupy aplikovali na výpočet vln ve vzduchu a ve struně.

Na počátku 19. století pak Jean-Baptiste-Joseph Fourier zavedl rozklad periodické komplexní vlny na jednotlivé spektrální komponenty. Tato vlastnost vlnových funkcí se dnes označuje za Fourierův teorém.

## **2.3. Zvuk a jeho veličiny**

### **2.3.1. Zvuk [5,6]**

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí. Obecně se uvádí frekvenční rozsah mezi 16 Hz a 20 kHz. Jedná se však pouze o zvuk slyšitelný lidským sluchem a celé spektrum zvuku se dělí do těchto tří kategorií – infrazvuk, slyšitelný zvuk a ultrazvuk. [6]

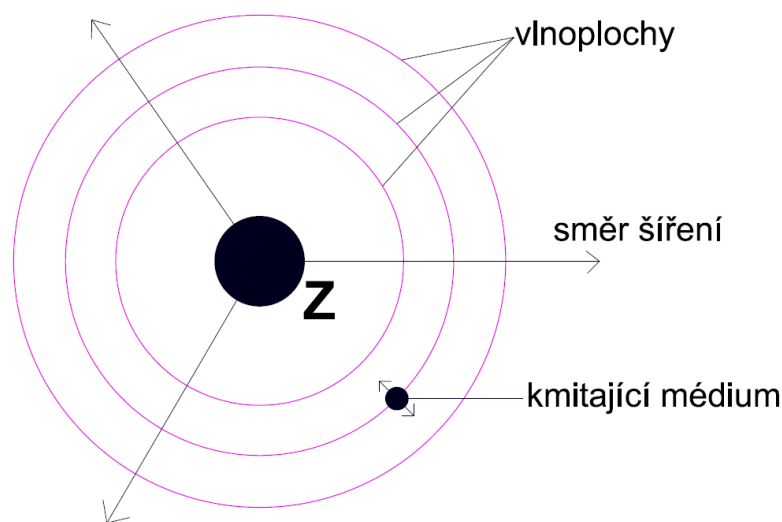
Infrazvukem je označováno vlnění s frekvencí nižší než 16 Hz. Ačkoliv toto vlnění již sluchem vnímat nedokážeme, tak vlnění při 5 Hz až 7 Hz může vyvolávat negativní reakce jako změny krevního tlaku nebo bolesti hlavy.

Ultrazvukem je označováno vlnění s frekvencí nad 20 kHz. Ultrazvukové vlny mají velmi krátkou vlnovou délku a při vysokých intenzitách dochází výrazným výkyvům tlaku v řádech MPa. Jejich odrazu na rozhraní dvou prostředí se hojně využívá v detekčních metodách. [7]

Těleso, kterým se zvuk šíří bývá zpravidla označováno jako prostředí a může nabývat všech skupenství, tedy pevného, kapalného i plynného. Částice daného prostředí se při přenosu zvuku nepohybují, ale pouze kmitají kolem svých rovnovážných stavů.

Zvuk se v kapalinách a plynech projevuje jako podélné vlnění. V pevných látkách se navíc může šířit i jako vlnění příčné.

Zvuk se od zdroje šíří všemi směry kolmo k jeho tečně se zdrojem. Místa se stejnou hodnotou hladiny zvuku vyznačují vlnoplochy. V případě, že se je prostředí šíření hluku homogenní, mají vlnoplochy vycházející z bodového zdroje pravidelný tvar kruhu, případně koule.



Obrázek 1 - Šíření zvuku

Věda, která se zabývá slyšitelným zvukem, se jmenuje akustika, konkrétně pak odnož, zabývající se vznikem zvuku, jeho šířením a působením se označuje jako fyzikální akustika. Existují samozřejmě i další odnože akustiky, například hudební akustika, fyziologická akustika nebo elektroakustika.

### 2.3.2. Rychlost zvuku [1,5]

Obecně závisí rychlost jakéhokoliv vlnění na setrvačných a elastických vlastnostech prostředí, kde se vlna šíří. Obecná rovnice má pak takovýto tvar:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1)$$

Kde  $K$  je modul objemové pružnosti a  $\rho$  je hustota prostředí.  $K$  v závislosti na prostředí šíření má několik podob.

$$K = -\frac{V\Delta p}{\Delta V} \quad (2)$$

Rovnice (2) [12] je vztah pro kapaliny, kde  $\Delta p$  je vnější dodatečný tlak působící na kapalinu

$$K = \gamma p_0 \quad (3)$$

V plynném prostředí lze dle (3) vyjádřit modul objemové pružnosti  $K$  jako součin Poissonovy konstanty  $\gamma$  a tlaku prostředí  $p_0$ .

Rychlost zvuku v plynném prostředí lze dosazením (3) do (1) vyjádřit ve tvaru

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}} \quad (4)$$

Pro rychlost zvuku v atmosféře se uvádí následující vzorec pro výpočet rychlosti zvuku v závislosti na teplotě vzduchu:

$$c = (331,8 + 0,607 \cdot T) \text{ ms}^{-1} \quad (5)$$

Kde  $T$  reprezentuje teplotu v °C.

### 2.3.3. Akustická rychlost [1,5,6,7]

Akustickou rychlost označovanou  $v$  nelze zaměňovat s výše zmiňovanou rychlostí šíření zvukové vlny. Akustická rychlost popisuje rychlost kmitání částic kolem své rovnovážné polohy a lze jí získat z rovnice akustické výchylky.

$$a = a_{\max} \sin(\omega \cdot t) \quad (6)$$

V rovnici  $a$  reprezentuje okamžitou výchylku částice z rovnovážné polohy,  $a_{\max}$  je maximální možnou výchylkou, proměnná  $t$  představuje čas a  $\omega$  je úhlová rychlost.

Derivací výše zmíněného vzorce (6) podle času získáme rovnici akustické rychlosti

$$v = v_{\max} \cos(\omega \cdot t) \quad (7)$$

Pro doplnění je ještě nutné uvést, že  $\omega$  získáme z frekvence konkrétního zvuku. Jejich vzájemný vztah lze vyjádřit rovnicí:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (8)$$

### 2.3.4. Akustický tlak [1]

Jak již bylo zmíněno zvuk se šíří jako mechanické vlnění. Vlivem oscilace částic média kolem své rovnovážné polohy tak dochází k lokálním tlakovým změnám. Lidské ucho je schopné vnímat změny tlaku již od  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Tyto hodnoty jsou superponovány na atmosférický tlak, který má hodnotu přibližně  $10^5$  Pa a zvuk je tedy projevem výchylek z jeho klidové hodnoty.

Akustický tlak lze analogicky jako v případě akustické rovnice spočítat vztahem

$$p = p_{\max} \cos(\omega \cdot t), \quad (9)$$

kde  $p_{\max}$  představuje amplitudu akustického tlaku.

### 2.3.5. Akustický výkon[1,6]

Akustický výkon vychází z běžné definice výkonu -

$$P = \frac{dE}{dt}, \quad (10)$$

kde  $E$  představuje akustickou energii, tedy akustický výkon odpovídá akustické energii přenesené za jednotku času. Pokud akustický výkon vztáhneme na jednotku plochy  $dS$ , dostaneme měrný akustický výkon -  $N$ .

$$N = \frac{dP}{dS \cdot \cos \vartheta} \quad (11)$$

$\vartheta$  zde reprezentuje úhel, pod kterým procházejí zvukové vlny plochou  $dS$ .

Akustický výkon  $P$  si také můžeme odvodit jako jednoduchý vztah součinu akustické rychlosti  $v$  a působící síly  $F$ . Síla, kterou zde zmiňujeme je zase součinem akustického tlaku  $p$  a plochy  $S$  na kterou působí. Vzorec tohoto vyjádření vypadá takto:

$$P = F \cdot v = p \cdot S \cdot v. \quad (12)$$

Je-li  $\cos \vartheta = 1$ , lze kombinací rovnic (11) a (12) spočítat měrný akustický výkon  $N$  jako součin akustické rychlosti a akustického tlaku:

$$N = p \cdot v \quad (13)$$

### 2.3.6. Akustická intenzita [1,5]

Akustická intenzita představuje střední hodnotu energie přenesenou zvukovým vlněním skrze normovanou plochu během normovaného časového úseku (většinou se volí doba jedné periody).

Akustickou intenzitu lze spočítat jako součin efektivní hodnoty akustické rychlosti a efektivní hodnoty akustického tlaku:

$$I = p_{\text{ef}} \cdot v_{\text{ef}} \quad (14)$$

Efektivní hodnoty akustických veličin odpovídají podílu amplitudy dané veličiny a  $\sqrt{2}$ . Efektivní tlak se tedy rovná

$$p_{\text{ef}} = \frac{p_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

a obdobně se vypočítá také efektivní rychlost.

$$v_{\text{ef}} = \frac{v_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Měření akustické rychlosti je v mimolaboratorních podmínkách dosti složité a nepřesné, zatímco akustický tlak lze běžně měřit poměrně snadno a s mnohonásobně vyšší přesností. Pro výpočty akustické intenzity se tak využívá tzv. měrného vlnového odporu prostředí  $Z$  [ $\text{Ns}/\text{m}^3$ ]. Tato veličina, která odpovídá podílu mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí a je vždy konstantní. Zato hodnota je zároveň rovna součinu rychlosti vlnění a hustotě prostředí.

$$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c = \text{konstanta} \quad (17)$$

Kombinací rovnic (14) a (17) tak dostaneme jednoduchou metodu výpočtu akustické intenzity, které je prakticky využitelné k jejímu měření.

$$I = \frac{p_{\text{ef}}^2}{\rho \cdot c} \quad (18)$$

## 2.4. Akustika

### 2.4.1. Weber-Fechnerův zákon [8,9]

Lidský sluch vnímá různé frekvence a intenzity zvuku odlišně. Tím jak lidské tělo reaguje na podměty, se zabýval obor psychofyzika, v tomto případě pak psychoakustika. Mezi jeho zakladatele patřili Ernst Heinrich Weber a Gustav Fechner. Tito dva pánové se zabývali zkoumáním projevů fyzického světa na lidskou psychiku a mimo jiné provedli pozorování, při kterém síla psychického vjemu reagovala lineárním růstem na podmět, který zároveň narůstal geometrickou řadou. Tato pozorování lze zapsat matematicky, přičemž je

tento jev dnes označován jako Weber-Fechnerův zákon. Jeho matematická formulace vypadá takto:

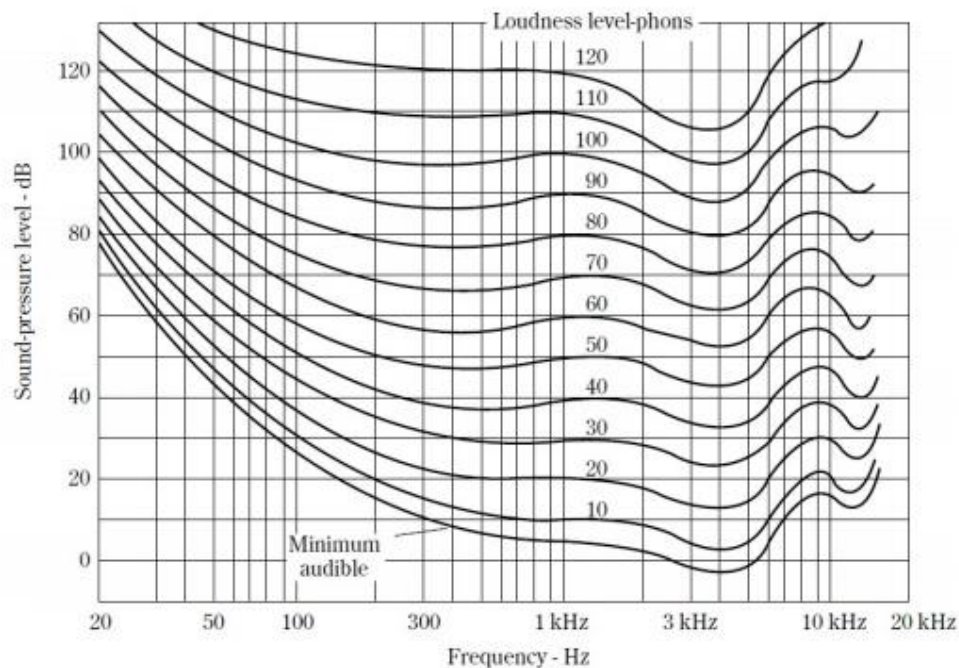
$$dV = \textit{konstanta} \cdot \frac{dI}{I} \quad (19)$$

$$V = \textit{konstanta} \cdot \ln \frac{I}{I_0} \quad (20)$$

V rovnicích výše  $V$  označuje vjem a  $I_0$  označuje referenční hodnotu akustické intenzity. Referenční hodnota byla určena na  $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , což je mezní slyšitelná hodnota zvuku s frekvencí 1 kHz.

#### 2.4.2. Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti [1,8,9]

Tento jev vnímání rozdílné hlasitosti v závislosti na frekvenci daného zvuku zachycují Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti. Na obrázku Barkhausenových křivek je znázorněno vnímání hlasitosti (klikaté černé křivky) a jak se mění v závislosti na hladině akustického tlaku a frekvenci tónu. Jako referenční hodnota při jejich tvorbě se bere frekvence 1 kHz. Ta má pro jednotlivé hladiny hlasitosti totožných hodnot. Například pro  $L_p = 20$  dB bude hlasitost rovna 20 fónům. Z křivek lze vyčíst obecný trend, že hlasitost při stejném akustickém tlaku výrazně klesá s tím, jak klesá frekvence zvuku. Zároveň je vidět nejvýraznější citlivost lidského ucha v oblasti kolem 4 kHz.



Obrázek 2 - Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti. [9]

### 2.4.3. Hladiny akustických veličin [1,5,6]

Jak vyplývá z Weber-Fechnerova zákona, je pro popis vnímání lidského sluchu a tedy i pro posuzování akustických jevů, nejvhodnější logaritmická škála. Proto se k popisu používají hladiny akustických veličin.

Hladina akustické intenzity je definována vztahem:

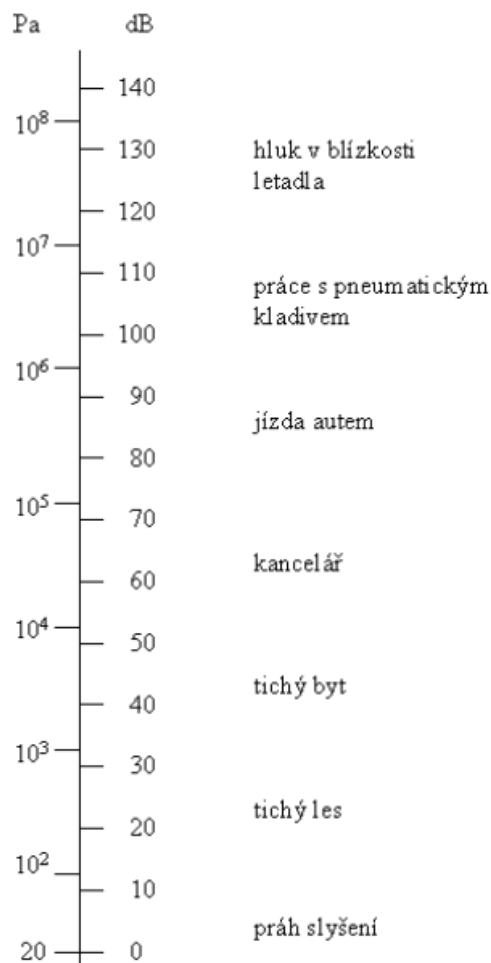
$$L_I = 10\text{dB} \log \frac{I}{I_0} \quad (21)$$

Hladinu akustického tlaku získáme dosazením rovnice (18) do (21), výsledné podoba bude:

$$L_p = 20\text{dB} \log \frac{p}{p_0}. \quad (22)$$

Jednotky  $I_0$  a  $p_0$  jsou referenční hodnoty.  $I_0$  se rovná  $10^{-12} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  a  $p_0$  se rovná  $2\cdot 10^{-5} \text{Pa}$ . Obě tyto hodnoty jsou považovány za hraniční pro zvuk o frekvenci 1 kHz. Tyto hodnoty jsou také standardizovány v mezinárodní normě ISO 389-7.

Na obrázku níže jsou pro představu uvedeny některé hladiny akustických tlaků v běžných prostředích a při běžných činnostech.



Obrázek 3 - Hladiny akustického tlaku pro různé činnosti [6].



#### 2.4.4. Ekvivalentní hladina akustického tlaku [1]

Ekvivalentní hladina akustického tlaku se značí  $L_{Xeq}$ , kde X nese označení filtru, který byl při měření použit (viz frekvenční filtry). Samotná veličina pak vypovídá o jakési průměrné hodnotě akustického tlaku, který byl zachycen během doby měření. Její rovnice je:

$$L_{Xeq} = 10 \text{ dB}(X) \log \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1L_p} dt. \quad (23)$$

$t_1$  a  $t_2$  reprezentují čas na začátku a konci měření a  $L_p$  je okamžitý akustický tlak. Bezrozměrnou jednotkou ekvivalentní hladiny akustického tlaku je dB.

Tato veličina se mimo jiné využívá při posuzování vlivu hluku na lidské zdraví a slouží k posouzení ucelených časových celků, například den, noc, pracovní směna nebo otevírací doba hlučné budovy.

#### 2.4.5. Procentní hladiny akustického tlaku [10]

Tyto veličiny nesou informaci o proměnlivosti měřeného akustického tlaku. Značí se kombinací velkého písmene L s číselnou hodnotou v dolním indexu, například  $L_{50}$ . Číselná hodnota značí procenta. Udaná hodnota v decibelech pak reprezentuje takovou hladinu akustického tlaku, která byla překročena v takovém poměru z celkového času měření, jak uvádí procentní hodnota. Níže jsou uvedeny příklady a jejich přibližný popis a význam.

- [1]  $L_5$  - hladina akustického tlaku, jejíž hodnota je překročena v 5 % z doby měření, jedná se nejvyšší píky.
- [2]  $L_{10}$  - hladina akustického tlaku, jejíž hodnota je překročena v 10 % z doby měření, většinou reprezentuje běžné výkyvy naměřených hodnot.
- [3]  $L_{50}$  - tato hodnota odpovídá průměrné hladině akustického tlaku.
- [4]  $L_{90}$  - hodnota akustického tlaku, která byla překročena po dobu trvající 90 % z celkového intervalu měření. Hodnota tak reprezentuje hluk pozadí, případně zbytkový hluk.
- [5]  $L_{95}$  - hodnota, jež reprezentuje hluk pozadí, většinou neoddělitelné šumy apod.

#### 2.4.6. Maximální hladina akustického tlaku [11]

Jedná se o další veličinu, která se zohledňuje při posuzování hlukové zátěže a jde o již zmiňovaný akustický tlak, přesněji jeho hladinu. V tomto případě se sleduje nejvyšší naměřená hodnota zaznamenaná během celé doby měření. Tato hodnota nese označení -  $L_{Zmax}$ .

### 2.4.7. Kmitočtová pásma[6]

Při měření jsou zaznamenávány hladiny měřených veličin pro celé frekvenční spektrum, což by ovšem při vzorkovacím kroku  $\Delta f = 1$  Hz bylo velmi nepraktické a pro vyhodnocení hluchnosti i zbytečné. Z tohoto se pro účely vyhodnocení zavádějí kmitočtová pásma. Tyto pásma dělí slyšitelné spektrum na procentuálně rozdělené úseky o konstantní šířce. Používá se dělení na oktávová nebo třetinooktávová pásma.

#### *Oktávové pásmo*

Meze jednotlivých oktáv jsou zvoleny tak, že hodnota frekvence dolní meze se rovná dvojnásobku frekvence horní meze (viz vzorec (24)) a celé slyšitelné spektrum je takto rozděleno na 10 oktávových pásem.

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (24)$$

$f_1$  představuje dolní mez a  $f_2$  představuje mez horní. Samotná oktáva pak bývá označovaná hodnotou označovanou jako střední frekvence –  $f_m$ . Hodnotu střední frekvence získáme pomocí následujícího vzorce:

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2}. \quad (25)$$

Matematicky pak bude tato hodnota odpovídat číslu:

$$f_m = 15,625 \cdot 2^n \text{ Hz}, \quad (26)$$

kde  $n$  je číslo samotné oktávy, tedy od 1 do 10. y

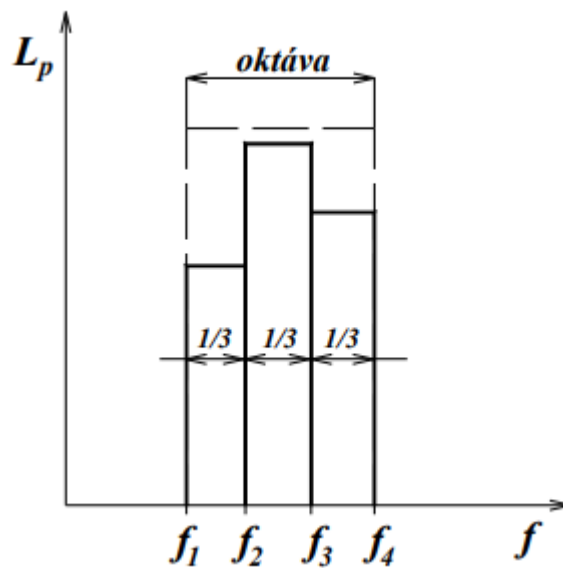
Z rovnice (24) a (26) pak vyplývá vztah mezi jednotlivými mezními frekvencemi:

$$f_{m+1} = 2f_m. \quad (27)$$

### Třetinooktávové pásmo

Jak už název napovídá, třetinooktávová pásma vzniknou rozdělením hladin jednotlivých pásem na rovnoměrné třetiny. V součtu pak musí platit, že výsledek rovnat oktávě, pod kterou jednotlivé třetinooktávové pásma spadají. Tento vzájemný vztah lze zapsat následující rovnicí:

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2. \quad (28)$$



Obrázek 4 - Rozdělení oktávového pásma na třetinooktávová. [6]

Úpravou rovnice (28) můžeme vyjádřit konstantní poměr mezi jednotlivými hraničními kmitočty stejně jako v rovnici (24).

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \quad (29)$$

Vztah hraničních pásem a mezního pásma je dán rovnicemi:

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}} \quad (30)$$

$$f_2 = f_m \sqrt[6]{2} \quad (31)$$

Celé rozdělení frekvencí do oktávových a třetinooktávových pásem a jejich hraniční frekvence jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 1 - Tabulka frekvencí oktávných a třetinooktávných pásem a jejich hraniční frekvence.

Střední frekvence pásma $f_m$ [Hz]		Mezní frekvence pásma $f$ [Hz]	
oktávnové	třetinooktávnové	dolní $f_1$	horní $f_2$
31,5	25	22	28
	31,5	28	35
	40	35	44
63	50	44	57
	63	57	71
	80	71	88
125	100	88	113
	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1414	1414	1760
	1760	1760	2250
	2250	2250	2825
4000	2825	2825	3530
	3530	3530	4400
	4400	4400	5650
8000	5650	5650	7070
	7070	7070	8800
	8800	8800	11300
16000	11300	11300	14140
	14140	14140	17600
	17600	17600	22500

### 3. Parametry měření a mikrofону

#### 3.1. Frekvenční filtry[6]

Protože náš sluch vnímá jednotlivé frekvence a intenzity zvuku s rozdílnou citlivostí, bylo pro posuzování vlivu zvuku na lidské zdraví zavedeno několik filtrů. Tyto filtry zohledňují změnu citlivosti lidského sluchu, který při poklesu frekvence pod 4 kHz snižuje vnímání intenzity zvuku v závislosti na klesající frekvenci. Hladina akustického tlaku  $L$  [dB] je tedy korigována příslušnou váhovou křivkou-filtrem. Tyto filtry se volí dle typu měření

Filtr A je dnes jediným používaným filtrem pro měření v komunálním prostředí. Původně byl určen pro měření slabších zvuků do 40 fónů, což odpovídá akustickému tlaku v rozsahu 20 až 55 dB v závislosti na frekvenci. Zesiluje frekvence mezi 1 a 4 kHz, neboť v tomto frekvenčním rozsahu je lidský sluch nejcitlivější. To je dáno rezonancí zvukových vln uvnitř zvukovodu.

Filtry B a D jsou historické pozůstatky a dnes se již nepoužívají. Filtr B byl mezičlánkem mezi filtry A a C. Filtr D byl navržen speciálně pro měření leteckého hluku a zohledňoval rozdílnou vnímavost lidského ucha na nepravidelný hluk oproti čistému tónu. Tyto filtry již nejsou ošetřeny mezinárodní normou.

Filtry C stále zůstává v mezinárodních normách, jeho využití je však již velmi omezené. Původně byl určen do velmi hlasitých prostředí, ale v současnosti se používá pouze k ověřování přístrojů.

Filtr Z nezesiluje ani nezeslabuje žádnou z frekvencí, je tedy lineárním filtrem s nulovým vlivem na výsledek měření. Z této skutečnosti také pochází označení Z, které znamená „zero“, tedy anglicky nula.

#### 3.2. Časové vážení [9,12]

Časové vážení je další veličinou, kterou je při různých akustických měřeních brát v potaz. Je definováno v mezinárodní normě IEC 61672-1 a definuje rychlost odezvy zvukoměru na změny akustického tlaku.

Potřeba takto definovat odezvu zvukoměru vznikla v době, kdy se používala analogová technika. Ručičky ukazující hladinu akustického tlaku na stupnici kmitaly odlišně v závislosti na jejich konstrukci (rozdílné délky, hmotnosti, atd.), tento fakt v kombinaci s neustálou proměnlivostí akustických veličin tak způsobil, že výsledky z různých měřících zařízení byly špatně porovnatelné. [12]

Byly tak zavedeny časové konstanty označené jako Fast, Slow a Impulse. Tyto konstanty definovaly dobu reakce analogových zvukoměrů na změny akustických veličin.

Fast (z angličtiny, Rychlý) – je časová konstanta 125 ms. Tato konstanta přibližně odpovídá reakční době lidského sluchu a využívá se, když je účelem měření zachytit všechny zvuky prostředí.

Slow (z angličtiny, Pomalý) – je časová konstanta o délce 1000 ms. Hlavní využití je při sledování průměrných hodnot hluku.

Dnešní profesionální zvukoměry provádějí vyčítání hodnot a záznam v obou režimech najednou. Uživatel se může následně dle potřeby rozhodnout, jaké údaje potřebuje zobrazit.

Impulse (z angličtiny, Impulz) – tato metoda vážení se skládá ze dvou časových konstant časového vážení. První konstanta je tzv. rychlá – 35 ms, po ní následuje druhá, tzv. pomalá konstanta, která má kopírovat dobu reakce lidského ucha. Tyto konstanty se používají při měření situací s extrémně rychlým a silným náběhem. Typickým příkladem je měření explozí nebo hluk střelby.

### **3.3. Šum [13]**

Šum je obecně definován jako nežádoucí zvukové nebo obrazové znečištění. Toto označení se přeneslo i do elektroniky, kde šum označuje signál, který se podobá právě záznamu šumů výše zmíněných. Ačkoliv je obecně považován za nežádoucí jev, má v praxi mnoho využití.

**Bílý šum** – je tak označován signál s rovnoměrně rozděleným výkonem pro všechny pásma. Výkonová spektrální hustota je tedy konstantní. Teoreticky je bílý šum spektrálně neomezený, avšak v praxi se pracuje s pásmově omezeným bílým šumem. Bílý šum pak nejlépe reprezentuje nahodilý hluk, který chci ve svém měření simulovat.

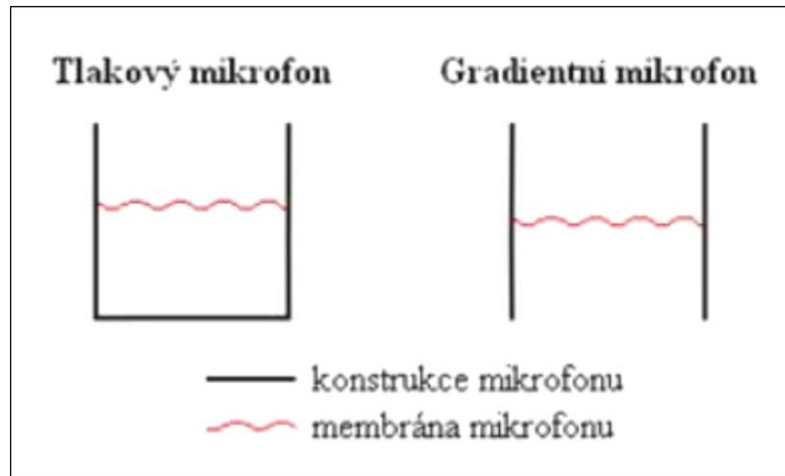
### **3.4. Mikrofon [8,14]**

Čím přesnější a náročnější měření zvuku chceme provádět, tím kvalitnější vybavení budeme potřebovat. Toto tvrzení platí dvojnásob, pokud jej vztáhneme na samotný mikrofon. Ten je totiž prostředníkem mezi zvukovým polem a zvukoměrem a jen na něm závisí, jak přesných výsledků jsme schopni dosáhnout. Z toho důvodu je výběr vhodného mikrofonu pravděpodobně nejdůležitějším krokem při plánování měření zvuku.

#### **3.4.1. Dělení mikrofonů**

Mikrofonů existuje několik druhů a každý má své specifické vlastnosti například odezva na jednotlivé frekvence, dynamický rozsah, směrovost, odolnost a další. Dělení mikrofonů tak vychází z jejich konstrukce, na níž závisí jejich vlastnosti.

Mikrofony lze rozdělit podle způsobu detekce na tlakové a gradientní. Jejich jednoduchý náčrt je viditelný na Obrázek 5 níže.



Obrázek 5 - Schéma tlakového a gradientního mikrofonu.[8]

Tlakové mikrofony mají membránu vystavenou venkovnímu akustickému tlaku pouze z jedné strany. Amplituda tlakem rozkmitané membrány tak není závislá na směru a vzdálenosti zdroje zvuku. Tato konstrukce je tedy ideální pro všesměrové mikrofony.

U gradientních mikrofonů je membrána vystavena akustickému tlaku z obou stran a svou výchylkou tak reprezentuje nárůst respektive pokles akustického tlaku, tedy jeho gradient. To, jak se akustický tlak šířící se zvukové vlny rozdělí mezi dvě strany membrány, záleží na úhlu dopadu a poloměru zakřivení akustické vlnoplochy. Z toho vyplývá, že gradientní mikrofony jsou citlivé na vzdálenost a polohu zdroje zvuku.

Další metoda dělení mikrofonů je podle způsobu přeměny dopadající zvukové vlny na elektrický impuls odpovídající velikosti.

**Krystalové (piezoelektrické) mikrofony** jsou konstruovány tak, že membrána reagující na akustický tlak je pevně spojena se soustavou piezoelektrických krystalů. Záchvěvy membrány působí tlak na krystaly a ty generují proud na elektrodách, které skrz krystaly procházejí. Tyto mikrofony jsou obecně odolné vůči náročnějšímu zacházení a atmosférickým vlivům. Nejlépe se tak hodí na dlouhodobá venkovní měření a pro terénní využití.

**Elektrostatické (kondenzátorové) mikrofony** využívají membránu jako jednu z elektrod kondenzátoru. Druhá elektroda je pevná a na desky je přiveden náboj. Vlivem akustického tlaku mění membrána svou vzdálenost vůči druhé elektrodě a tím mění kapacitu kondenzátoru. Vysokým vnitřním odporem je zpomaleno vyrovnávání náboje na elektrodách kondenzátoru a tak se změny polohy membrány projevují výkyvy v napětí.

Kondenzátorové mikrofony lze dále ještě rozdělit na dva typy, a to v závislosti na původu náboje na kondenzátoru. První možností je kondenzátor polarizovat externě

přivedeným napětím. Druhou možností je použití tzv. elektretu (=dielektrický materiál nesoucí permanentní elektrický náboj), ten se nanáší na jednu z elektrod a není třeba externího polarizačního napětí.

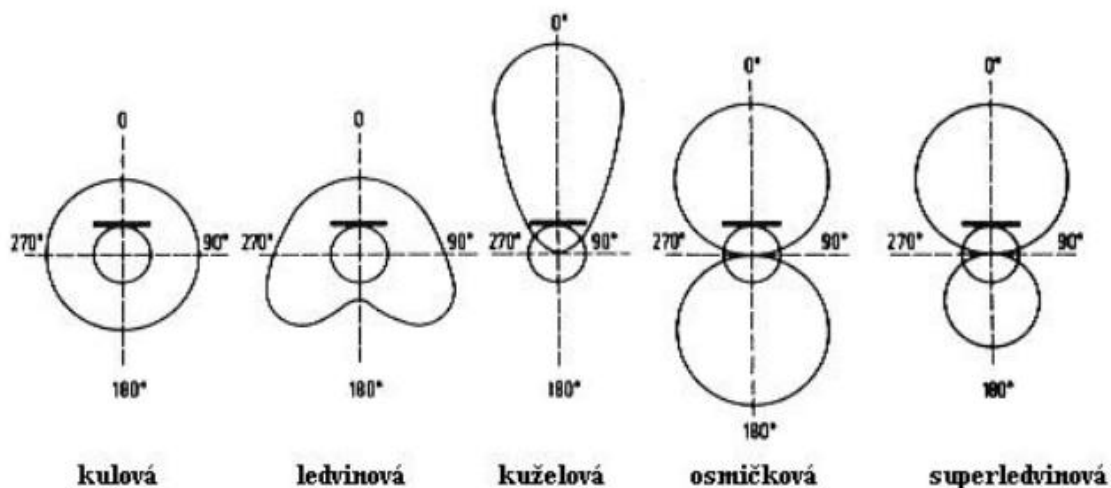
Kondenzátorové mikrofony jsou stabilní a disponují vyrovnanou frekvenční charakteristikou, dosahují vysoké citlivosti při minimálním zkreslení. Oproti ostatním mikrofonům jsou mnohem citlivější na vlhkost a prach, které ovlivňují jejich přesnost. Vhodnější jsou proto spíše do laboratorních podmínek.

**Elektrodynamické a elektromagnetické mikrofony** využívají ve své konstrukci cívky. V případě elektrodynamického mikrofonu je pomocí membrány pohybováno cívkou uvnitř magnetického pole a v cívce se indukuje napětí odpovídající časovým průběhem přenášenému zvuku. Elektromagnetické mikrofony cívkou nepohybují, místo toho se membrána využívá k vyvolání změn v magnetickém poli a tak se v cívce generuje nízkofrekvenční signál. Tyto mikrofony se často konstruují jako gradientní. Jsou odolné a levné, ale mají poměrně malý frekvenční rozsah.

### 3.4.2. Hlavní parametry

Aby bylo možné zvolit správný mikrofon, je potřeba porozumět parametrům udávaným výrobcem.

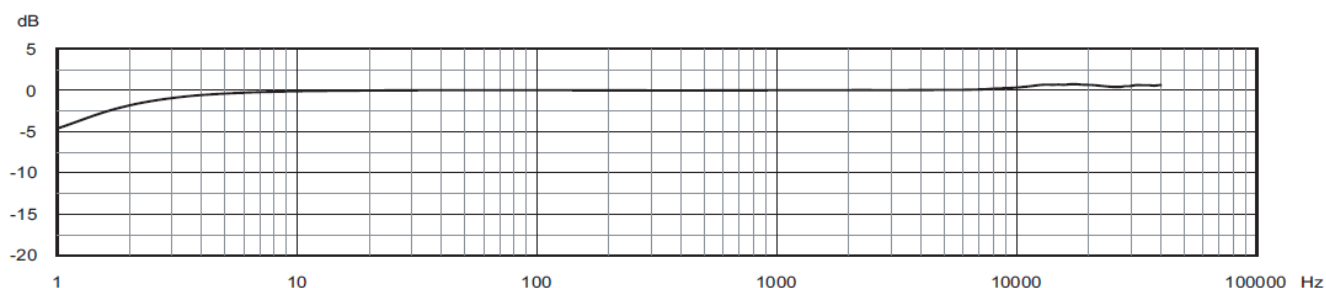
Prvním parametrem, který při výběru mikrofonu zohlednit je směrová charakteristika. Ta záleží na konstrukci mikrofonu a je potřeba ji volit v závislosti na plánovaném využití mikrofonu. Většinou se znázorňuje typizovanými nákresey, které vypovídají možné vzdálenosti a úhlu vzhledem k mikrofonu, kde bude zvuk zachycen. Příklad takovýchto charakteristik je vidět na obrázku níže.



Obrázek 6 - Směrové charakteristiky mikrofonů.[8]



Důležitými parametry jsou frekvenční rozsah a frekvenční charakteristika. Frekvenční rozsah udává které frekvence je s mikrofonom možné zachytit a charakteristika vypovídá o jeho přenosových schopnostech, tedy jak mikrofón zeslabuje, případně zesiluje jednotlivé frekvence. Příklad přenosové charakteristiky pro mikrofón, jenž byl použit pro naše měření je vidět na obrázku níže.



Obrázek 7 - Přenosová charakteristika mikrofónu 4191. [15]

Dalším parametrem, který je potřeba sledovat dynamický rozsah. Ten udává jak minimální a maximální hodnoty je mikrofón vůbec schopen zachytit a při níž nehrozí poškození. Hranice se standardně uvádějí v decibelech a jako hraniční hodnoty lze označit 30 dB a 130 dB. Mikrofóny měřící pod 30 dB musí být vysoce citlivé s minimálním vnitřním šumem. Mikrofóny určené pro měření nad 130 dB jsou nízko citlivé a jsou odolné proti saturaci signálu.

Citlivost mikrofónu vypovídá, jakým výstupním napětím se projeví mikrofón při vstupním daném akustickém tlaku. Pro porovnávání mikrofónů se používá akustický tlak 94 dB při frekvenci 1 kHz nebo tlak 1 Pa. Výstup se uvádí ve voltech v podobě  $V/Pa$  nebo jej lze převést na decibely dle následující rovnice:

$$\text{Citlivost [dB]} = 20 \cdot \log \frac{V p_0}{V_0 p} \quad (32)$$

$p_0$  je tlak 1 Pa a  $V_0$  napětí 1 V.

Tento parametr je důležitý především pro vhodnou volbu předzesilovače k mikrofónu a pro zpracování výstupního signálu.

## 4. Šíření zvuku ve venkovním prostoru [16,17,18,19,20]

Šíření zvuku záleží na mnoha faktorech, obecně je lze rozdělit do těchto pěti kategorií – zdroj, meteorologické podmínky, atmosférické podmínky, terén v místě měření a překážky. [17] V normě ČSN ISO 9613 jsou jednotlivé vlivy rozděleny a jejich vliv na šíření, konkrétně útlumu, je vyjádřen následující rovnicí:

$$A = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{gr}} + A_{\text{bar}} + A_{\text{misc}} \quad (33)$$

Kde  $A_{\text{div}}$  vyjadřuje útlum způsobený geometrickou divergencí.

$A_{\text{atm}}$  reprezentuje útlum pohlcením zvuku v atmosféře.

$A_{\text{gr}}$  je útlum závislý na povrchu země a umístění zdroje hluku a zvukoměru vůči zemi.

$A_{\text{bar}}$  je útlum způsobený bariérou mezi zdrojem zvuku a zvukoměrem.

$A_{\text{misc}}$  je vyhrazeno pro útlum způsobený jinými jevy, například šířením skrze les, apod.

Je vidět, že v rovnici chybí zmíněný meteorologický faktor, ten vyžaduje dlouhodobé sledování meteorologických podmínek a jejich statistické zpracování a v případě potřeby se ošetřuje meteorologickou korekcí.

### 4.1. Zdroj

Nejvýraznějším faktorem šíření zvuku je samotná povaha jeho zdroje. Primárně lze tyto zdroje rozdělit na lineární a bodové. Lineární zdroj vytváří zvukové vlny podél celé své délky, vlnoplochy tak mají cylindrický tvar. Zvuk z bodového zdroje naproti tomu vytváří vlnoplochy sférického tvaru.

Pro ideální bodový zdroj hluku lze použít následující rovnici pro výpočet změny akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje.

$$L_{p1} - L_{p2} = 20\text{dB} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (34)$$

Z rovnice vyplývá, že provedu – li dvě měření, přičemž  $r_2 = 2r_1$ , pak pokles akustického tlaku ve vzdálenějším místě bude 6 dB nižší než v místě prvním. Tento pokles bude u lineárního zdroje 3 dB. Platí zde rovnice (35). [16,20]

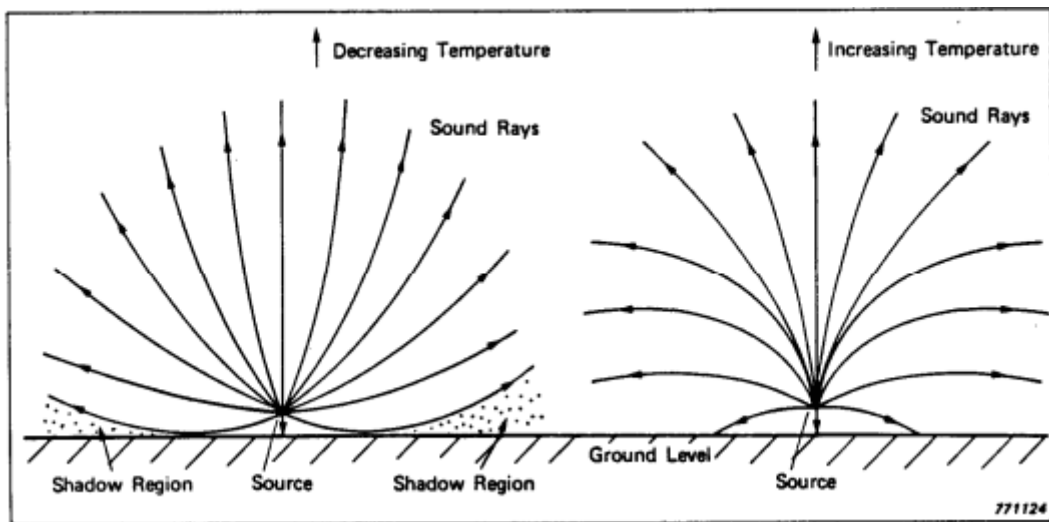
$$L_{p1} - L_{p2} = 10\text{dB} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (35)$$

## 4.2. Meteorologické faktory

Mezi meteorologické faktory se řadí teplota a vítr, konkrétněji jeho rychlost a směr.

Teplota se v problematice propagace zvukové vlny projevuje hned dvěma způsoby. Prvním je ovlivnění samotných vlastností atmosféry přenášet zvuk.

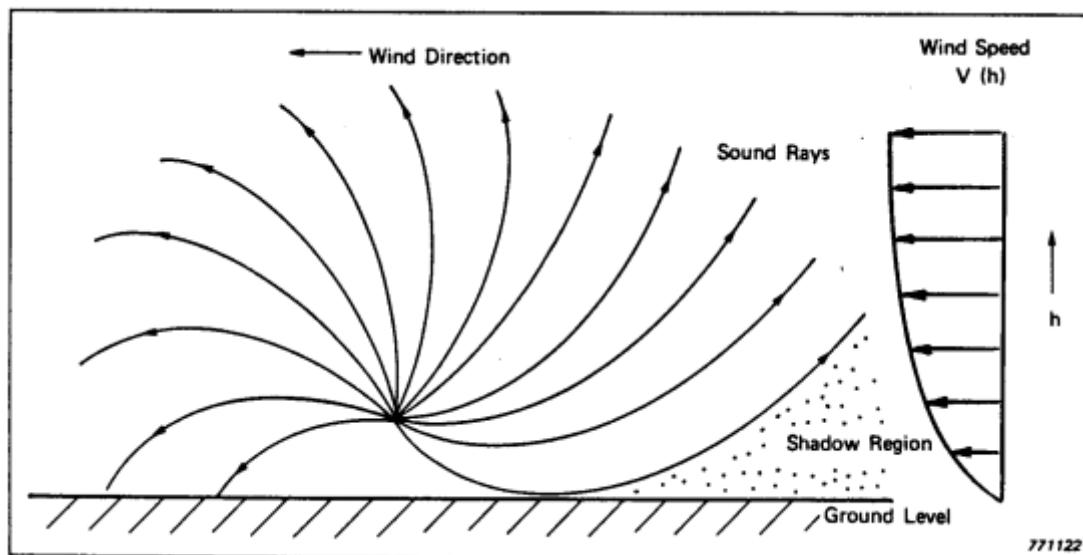
Druhým projevem je ohýbání zvukových vln v závislosti na směru a velikosti teplotního gradientu. Protože je rychlost zvuku závislá na teplotě (viz (5)) dochází při přechodu mezi jednotlivými teplotními pásy k ohybu dráhy zvukové vlny. Tento jev je zobrazen na obrázku níže.



Obrázek 8 – Ohýbání zvukových vln v závislosti na teplotním gradientu. [17]

Levá část obrázku by mohla reprezentovat běžný letní den, povrch je výrazně zahříván dopadajícím slunečním zářením, přičemž se teplo rychle uvolňuje do atmosféry. Teplotní gradient je pak vzhledem k růstu nadmořské výšky obrácený. Zvukové vlny jsou ohýbány směrem vzhůru a celkové zatížení okolí hlukem je sníženo. Naproti tomu pravá část obrázku představuje typickou noc, kdy je teplo pohlcováno povrchem a dochází k rychlému ochlazení nižších vrstev vzduchu. Zvukové vlny jsou vlivem pozitivního teplotního gradientu ohýbány k zemi, což se může projevit výrazným nárůstem hluku v nedalekých oblastech. Je potřeba uvést, že tento jev se projevuje až ve vzdálenostech několika stovek metrů od zdroje hluku a pokud se teplota atmosféry mění o  $0,98^{\circ}\text{C}$  na 100 m a méně [17], lze atmosféru považovat za neutrální a k ohybu nedochází.

Vítr svým působením také ohýba zvukovou vlnu. Působení efektu je znázorněno na obrázku níže. Vzhledem k tření je rychlost větru u země nejnižší a s výškou od země rychlost větru roste. Tento rychlostní gradient způsobuje, že zvukové vlny směřující proti větru jsou ohýbány vzhůru, zatímco zvukové vlny směřující po větru jsou ohýbány dolů k zemi. Studie uvádí, že v extrémních případech může být vliv teploty a větru způsobit rozdíl v měření až 20 dB [16], ale je již bylo zmíněno, tyto jevy se projevují až ve vzdálenostech od stovek metrů.



Obrázek 9 - Vliv větru na ohyb zvukových vln. [17]

### 4.3. Atmosférický faktor

Dalším faktorem, který ovlivňuje šíření zvukových vln je samotná atmosféra, tedy vlastně médium, kterým se zvuk šíří. V atmosféře dochází k absorpci a rozptylu energie zvukových vln a tedy k útlumu zvuku. Na útlumu se podílejí dva jevy – tzv. viskózní ztráty a relaxační procesy, přičemž relaxační procesy v absorpčních vlastnostech atmosféry projevují mnohem výrazněji. [16]

Viskózní ztráty vznikají vzájemným třením kmitajících molekul vzduchu, které zvukovou energii přenáší. Takto ztracená energie se mění na teplo.

Při relaxačních procesech molekuly plynu, který slouží jako médium, nepřenáší energii okamžitě, ale dočasně ji pohltí. Pohlcená energie následně ovlivňuje rotace a vibrace těchto molekul. Takto vybuzené molekuly mohou zvukovou energii opět vyzářit, a takto vzniklá zvuková vlna může částečně interferovat s okolním zvukem.

Absorpční vlastnosti atmosféry při standardním tlaku lze reprezentovat koeficientem  $\alpha$ , který reprezentuje útlum zvuku v decibelech na sto metrů. Jednotkou je dB/100m a je závislý na frekvenci zvuku, teplotě a molární koncentraci vodních par.

$$\alpha = 869 \cdot f^2 \left[ 1,84 \cdot 10^{-11} \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{1/2} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \cdot \left( 0,01275 \frac{e^{-2239,1/T}}{F_{r,O} + f^2/F_{r,O}} + 0,1068 \frac{e^{-3352/T}}{F_{r,N} + f^2/F_{r,N}} \right) \right] \quad (36)$$

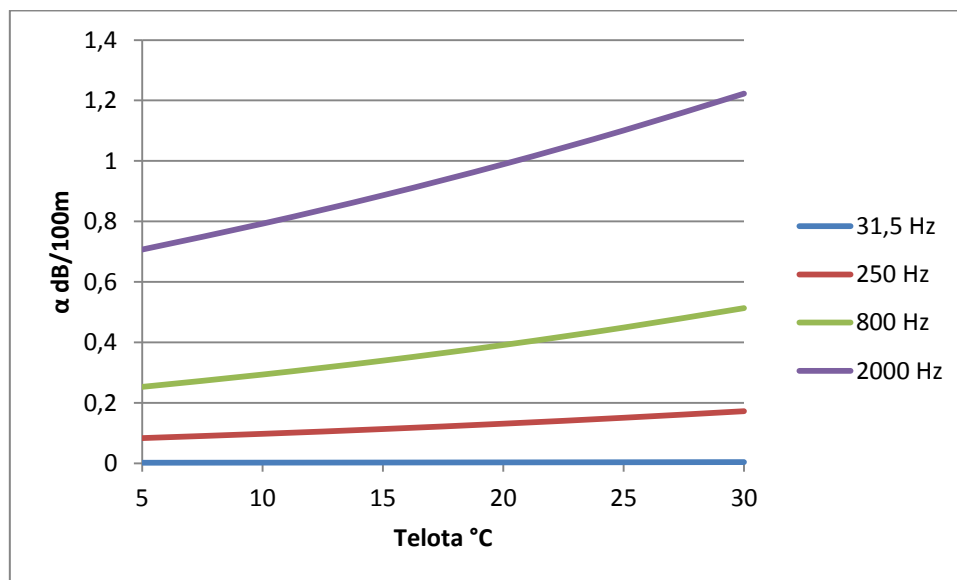
$T$  je teplota v kelvinech za  $T_0$  je brána teplota 293,15 K (20°C). Protože se atmosféra skládá převážně z dusíku (chemické označení N) a kyslíku (chemické označení O), je potřeba počítat s jejich relaxačními frekvencemi. Ty jsou do jisté míry závislé na již zmíněné koncentraci vodních par a lze spočítat podle rovnic níže.

$$F_{r,O} = \left( \frac{p_a}{p_r} \right) \left( 24 + 4,04 \cdot 10^4 h \frac{0,02+h}{0,391+h} \right) \quad (37)$$

$$F_{r,N} = \left( \frac{p_a}{p_r} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \left( 9 + 280h e^{\left\{ -4,17 \left[ \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\}} \right) \quad (38)$$

V rovnicích (37) a (38) se vlhkost vzduchu projevuje veličinou  $h$ , ta označuje molární koncentraci vodní páry v atmosféře. Postup pro převod lze nalézt například v ČSN ISO 9613-1, příloha B. Zdroj rovnic (36), (37) a (38) viz [18].

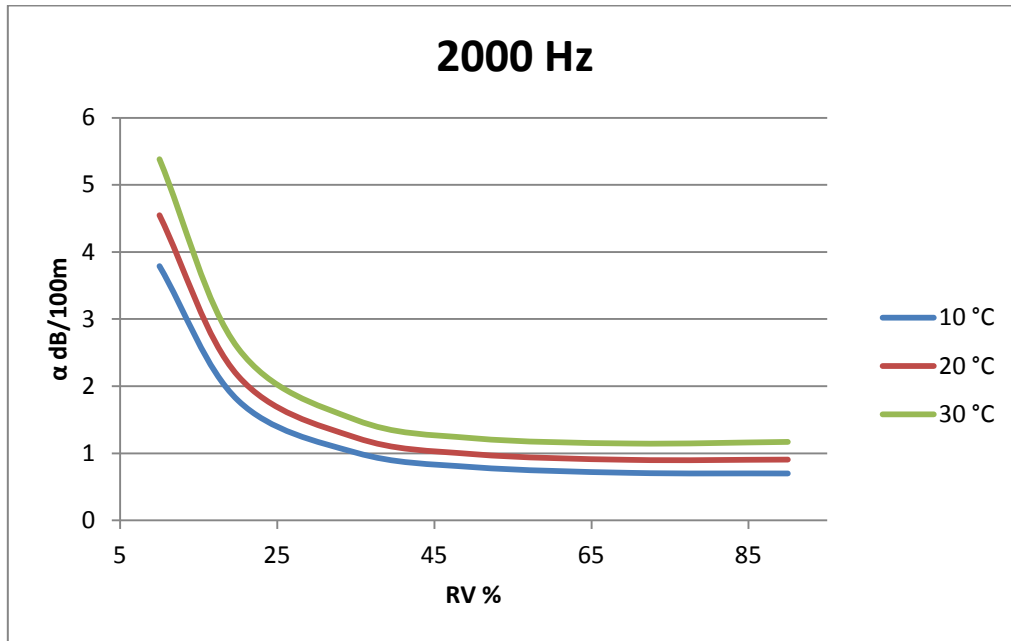
Graf 1 - Závislost koeficientu absorpce na teplotě při konstantní vlhkosti a tlaku.



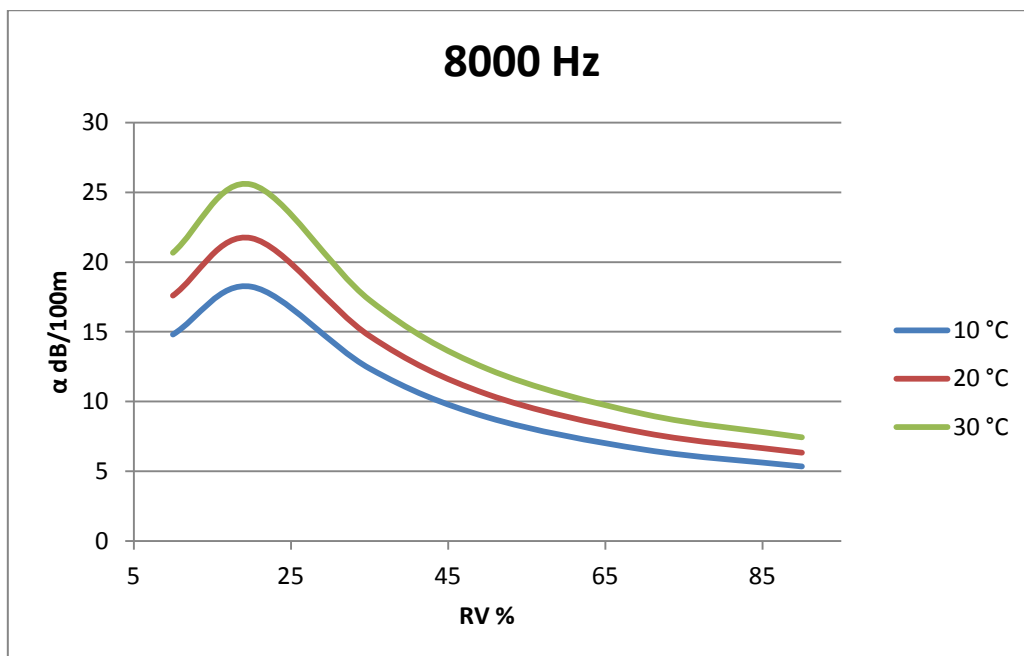
Jak lze vyčíst z grafu výše, absorpce atmosféry pro jednotlivé frekvence roste s teplotou. Na nízké frekvence nemá atmosféra prakticky žádný vliv, ale s rostoucím kmitočtem roste i velikost a proměnlivost koeficientu atmosférické absorpce.

Na grafech 2 a 3 je znázorněna závislost koeficientu absorpce na proměnlivé relativní vlhkosti při konstantní teplotě. Grafy jsou vytvořeny pro dvě různé frekvence a je na nich vidět výrazný rozdíl ve vlivu na útlum atmosféry.

Graf 2 - Závislost koeficientu absorpce na relativní vlhkosti při konstantní teplotě a tlaku pro zvuk o frekvenci 2000 Hz.



Graf 3 - Závislost koeficientu absorpce na relativní vlhkosti při konstantní teplotě a tlaku pro zvuk o frekvenci 8000 Hz.



#### 4.4. Vliv terénu

Při šíření zvukových vln, hraje svou roli i terén, nad kterým se zvukové vlny šíří. Záležet bude na jeho fyzickém uspořádání, například svažitosti nebo poloze zdroje a přijímače zvuku. Dále záleží na jeho povrchu. Ten se v normě ČSN ISO 9613-2 dělí na akustický tvrdý povrch, akusticky porézní povrch a akusticky smíšený povrch. Za akustický tvrdý povrch lze označit povrchy hladké s minimální pohltivostí zvuku. Jako příklad si lze uvést vybetonované a dlážděné plochy, vodní a ledové plochy nebo i upěchovanou zemi. Naproti tomu akusticky porézní povrch se vyznačuje například výskytem vegetace. Akustický smíšený povrch je tvořen kombinací tvrdého a porézního povrchu.

S pomocí výše uvedených znalostí lze vypočítat pohltivost terénu. V normě ČSN ISO 9613-2 jsou uvedeny dva možné postupy výpočtu. První jednodušší předpokládá rovný terén s akusticky porézním povrchem a zvuk bez charakteru čistých tónů.

$$A_{gr} = 4,8 - (2h_m/d) \cdot (17 + 300/d) \quad (39)$$

$A_{gr}$  je označení pro utlum země,  $h_m$  označuje střední výšku (=průměr mezi výškou zdroje a výškou přijímače) a  $d$  je vzdálenost mezi zdrojem a přijímačem.

Norma ovšem také uvádí, že pro malá  $d$  lze lepších výsledků dosáhnout metodou, která počítá útlum pro jednotlivé frekvence dle oktávového rozdělení spektra. U této metody se  $A_{gr}$  skládá ze tří složek, pohltivost u zdroje –  $A_s$ , pohltivost u přijímače –  $A_r$  a pohltivost střední oblasti –  $A_m$ . Přičemž:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m. \quad (40)$$

Důvod tohoto rozdělení vychází z poznatku, že nejnápadnější vliv na šíření zvuku má prostor povrch okolo zdroje a přijímače, cca do velikosti 30 násobku jejich výšky nad terénem. Zde dochází k výrazným podstatným odrazům a případným interferencím. Pro moje měření nebude vzhledem k vzdálenosti mezi zdrojem a přijímačem výpočet  $A_m$  potřeba.

Jak lze vidět na obrázku 10, výpočet pracuje i s typy povrchů. Těm je přiřazena veličina  $G$ , která je pro akusticky tvrdé povrchy rovna 0 a pro akusticky porézní povrchy se  $G$  rovná 1. Akustický smíšený povrch dosahuje hodnot od 0,1 po 0,9 v závislosti na poměrném zastoupení obou předchozích.

Nominal midband frequency Hz	$A_s$ or $A_r^{1)}$ dB
63	- 1,5
125	- 1,5 + $G \times a'(h)$
250	- 1,5 + $G \times b'(h)$
500	- 1,5 + $G \times c'(h)$
1 000	- 1,5 + $G \times d(h)$
2 000	- 1,5( 1 - $G$ )
4 000	- 1,5( 1 - $G$ )
8 000	- 1,5( 1 - $G$ )

NOTES

$$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2})$$

$$b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

$$c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

$$d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$$

Obrázek 10 - Postup výpočtu útlumu vlivem povrchu. [19]

#### 4.5. Překážky

Na závěr je potřeba uvést poslední kategorii a to překážky. U těch jsou důležité jejich rozměry, poloha a materiál. Jak již bylo zmíněno, platí pro šíření zvukových vln, že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu a při dopadu je pohlcena část energie v závislosti na odrazivosti/pohltivosti povrchu. Běžně mohou být jako překážky brány domy, dlouhodobě odstavené vagóny, terénní úpravy, husté zalesnění, atd. U takovýchto překážek je při tvorbě hlukových modelů důležité přesné zakreslení a dobrý odhad pohltivosti.

U některých překážek pak nelze předpokládat, že dojde k odrazu, ale předpokládá se útlum způsobený průchodem. Tento předpoklad platí například pro les nebo průmyslový areál.

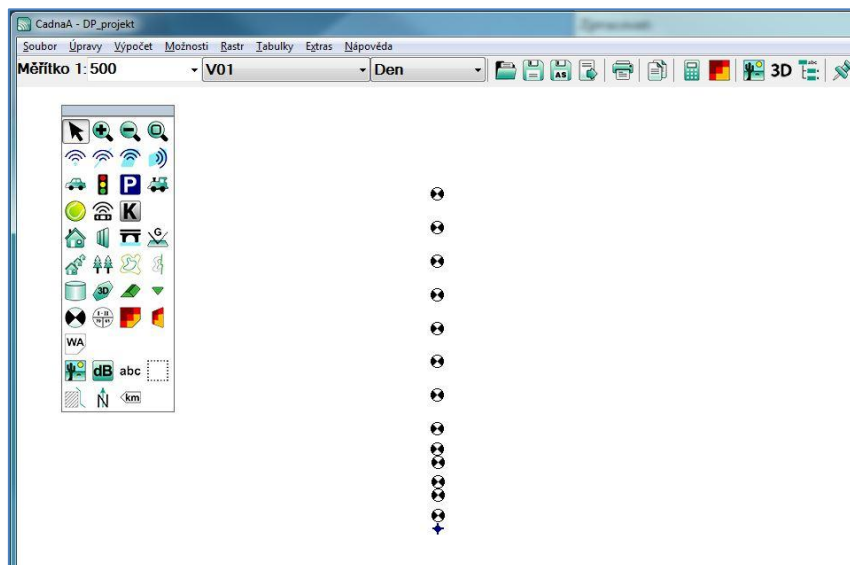


## 5. Model

Dalším krokem mé práce byla simulace mého měření v programu CadnaA verze pro rok 2019. Program CadnaA je profesionální software německé firmy Datakustik a byl vyvinut k tvorbě hlukových modelů ve venkovním prostředí.

### 5.1. Zjednodušený model

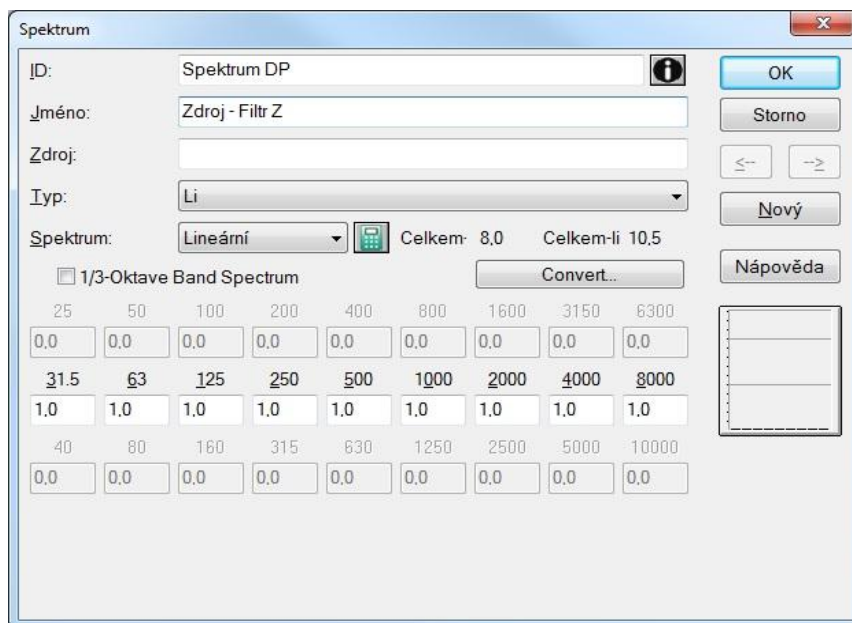
Nejprve byl vytvořen jednodušší zkušební model, který nebyl situován v terénu, ale pouze na ideálně rovné zemi. V tomto modelu jsme otestovali funkčnost programu a reakci na změnu parametrů.



Obrázek 11 - Náhled na zjednodušený model v programu CadnaA.

Na obrázku výše je vidět první verze modelu. Tato verze sestává ze stacionárního zdroje zvuku a řady detektorů umístěných ve vzdálenostech 2, 5, 7, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 a 50 metrů. Vše umístěno ve výšce 2,3 metrů nad zemí. Pohltivost terénu byla nastavena na 75%.

Bodovému zdroji byly nastaveny takové váhové konstanty pro jednotlivá spektra, aby odpovídali filtru Z. Náhled nastavení je na obrázku níže. Akustický výkon jednotlivých oktáv byl nastaven na 95 dB a celkový výkon byl  $L_{WZ} = 104,5$  dB.



Obrázek 12 - Nastavení zdroje hluku v modelu.

Před spuštěním samotného výpočtů bylo potřeba nastavit ještě jeho parametry, v tomto případě to znamenalo zvolit výpočtovou metodu, podle které bude výpočet proveden a následně doplnit parametry vyžadované samotnou metodou. Náš model využívá metodiku označovanou 9613, ta vychází z požadavků a výpočtových vzorců uváděných v ČSN ISO 9613. Program dále vyžaduje pouze doplnění meteorologických podmínek, konkrétně teploty a vlhkosti.



Obrázek 13 - Zjednodušený model se zobrazenými izoplochami.

Při spuštění výpočtu a vykreslení izoploch je na obrázku 13 vidět, že použitý stacionární zdroj hluku v modelu se chová jako bodový zdroj a vykreslení vlnoploch tvoří pravidelné

soustředné kružnice. Lze tedy předpokládat, že v terénu nebo šíření není žádný kaz a model by měl tedy pracovat správně. Model si také můžeme zobrazit ve 3D s podkladovým vykreslení izoploch vypočítaných pro výšku 2,3 metrů.

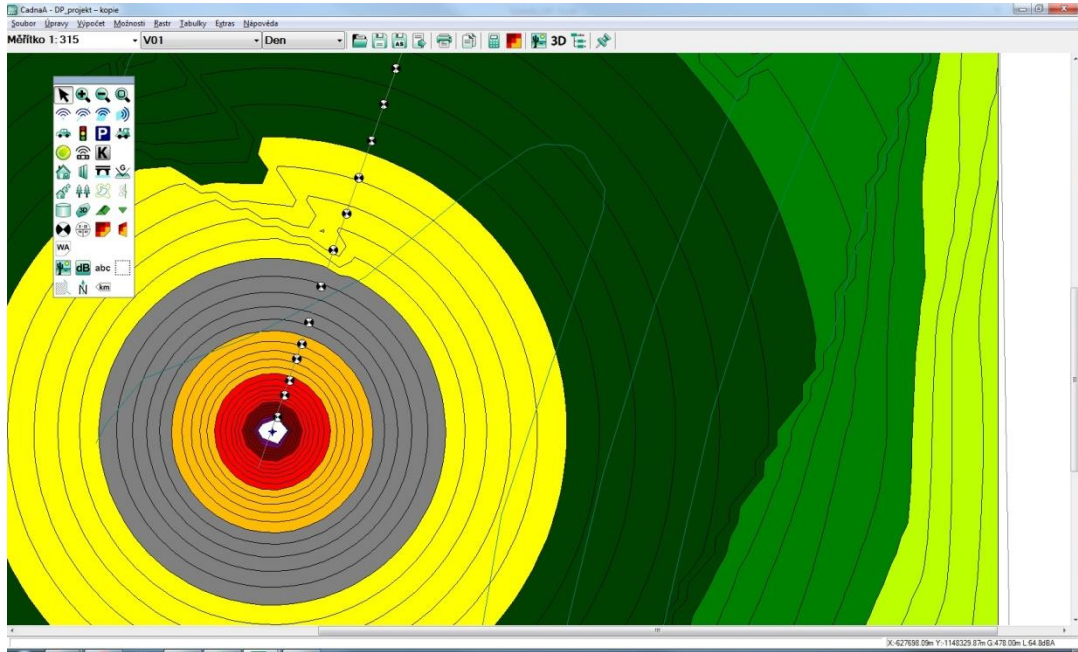


Obrázek 14 - Zjednodušený model vykreslený ve 3D

Modrý kříž na obrázku výše představuje zdroj zvuku, modrobílé koule představují zvukoměry.

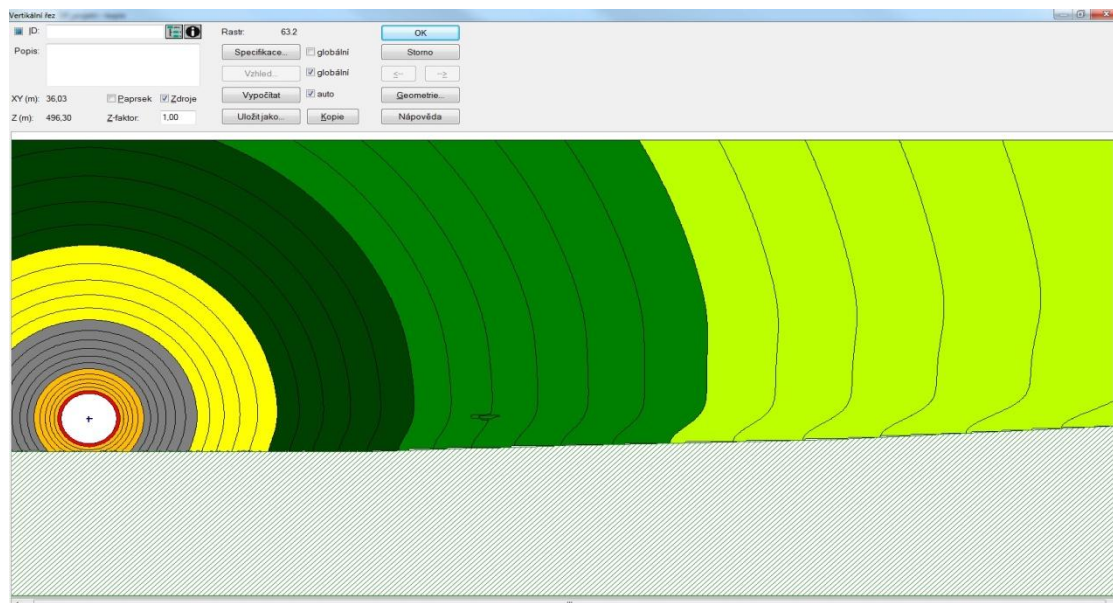
## 5.2. Reálný model

Realističtější verze modelu vyžadovala, aby byly přidány terénní prvky. Díky zvolenému místu nebylo potřeba modelování překážek nebo zakomponování zeleně. Hlavním rozdílem oproti zjednodušenému modelu je doplnění vrstevnic do terénu. Ty byly získány na stránkách Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního. Náhled na model je na obrázku níže.



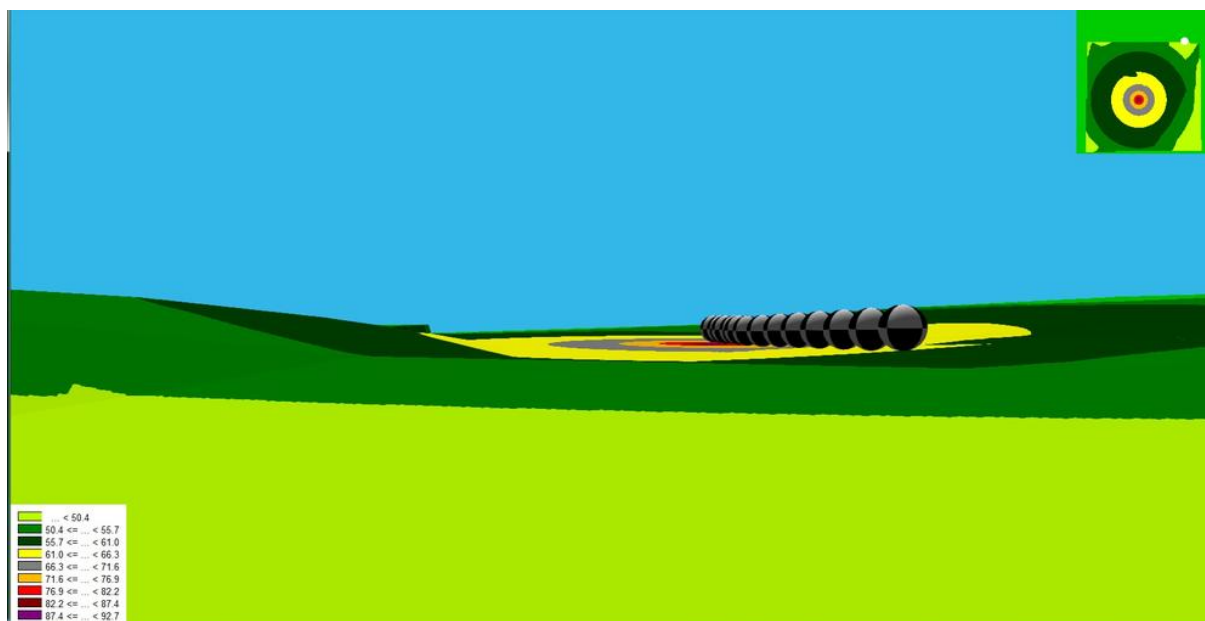
Obrázek 15 - Reálný model s vykreslenými izoplochami.

Pro kontrolu modelu byl zobrazen ještě svislý řez na spojnici zdroje zvuku a přijímačů.



Obrázek 16 - Svislý řez modelem.

Jak je na obrázku svislého řezu vidět, terén se od zdroje hluku mírně svažuje, a izoplochy při zemi se lehce deformují. Pro představu je přiložen pohled na 3D vykreslení, který zachycuje proměnlivost terénu.



Obrázek 17 - Náhled na 3D model.

## 6. Experiment

### 6.1. Požadavky na měření (dle norem a metodického návodu MZ ČR)[11,21,22]

Chceme – li měřit tak, aby výsledky měření byly platné i z pohledu legislativního je potřeba postupovat podle českých norem a metodologického návodu MZ ČR. Takto získané výsledky jsou přesné, reprezentativní a reprodukovatelné.

Měření hluku v komunálním prostředí je možné provádět s měřicími přístroji 1. třídy, které splňují požadavky ČSN EN 61672-1. Všechny tyto přístroje musí mít platný ověřovací list. [11,22] Pro měření ve venkovním prostředí je vždy nutné použít ochranný kryt mikrofonu proti větru. [11,22] Měřicí přístroje pak přítomnost tohoto krytu zohledňují korekcí.

Před a po měření je nutné měřicí sestavu kalibrovat, přičemž odchylka sestavy nesmí mezi jednotlivými kalibracemi překročit 0,5 dB. V takovém případě nelze měření považovat za platné. [22] Kalibrace probíhá za pomoci akustického kalibrátoru s platným kalibračním listem. Také všechna další pomocná měřidla, která jsem během měření použil, musí mít platné kalibrační listy. Hlavně se jedná o teploměr, vlhkoměr, anemometr a délková měřidla.

V našem experimentu probíhalo měření ve volném prostoru, na takováto měření nejsou kladeny příliš vysoké nároky, co se rozložení experimentu týče. Je potřeba, aby se mikrofon měřicí sestavy nacházel v minimální vzdálenosti 3,5 m od plochy, která by mohla odrazet zvuk k mikrofonu. [11,22]

Během samotného měření lze zaznamenávat celou řadu informací, základním veličinou je ovšem hladina akustického tlaku v decibelech. Pro svůj experiment budu sledovat tuto veličinu:

- Ekvivalentní hladina akustického tlaku  $L_{Z_{eq,T}}$

Dle metodického návodu pro měření hluku za účelem posouzení hygienických limitů se  $L_{eq,T}$  vyhodnocuje s A-filtrem místo Z-filtru, který nezkrsluje výsledky. Požadavky norem tak nebyly splněny, ale samotné výsledky budou mít přesnější vypovídající hodnotu a případný A-filtr lze započítat dodatečně.  $L_{Z_{eq,T}}$  bylo zaznamenáváno pro konkrétní frekvence na škále od 12,5 Hz až do 20 kHz. Data byla zaznamenávána v módu Slow. [11,22]

## 6.2. Popis a cíle experimentu

Cílem experimentu bylo změřit šíření zvuku na kratší vzdálenosti při různých meteorologických podmínkách, které ale lze snadno určit a porovnat. Sledované podmínky byly teplota a vlhkost vzduchu. Tyto podmínky jsou obecně dostatečně stálé, aby se v průběhu jednoho stavu dala provést série měření.

Z profesionálního všesměrového zdroje zvuku byl přehráván zvuk generovaný ze signálu bílého šumu. Tento zvuk byl měřen v různých vzdálenostech. Cele měření se následně opakovalo v jiný den tak, aby byly zajištěny odlišné meteorologické podmínky.

## 6.3. Umístění

Pro výběr místa měření bylo stanoveno několik parametrů, které muselo splňovat, aby bylo měření proveditelné a byl zajištěn jeho hladký průběh a snadné vyhodnocení. Pro měření jsem hledal dostatečně rozsáhlý rovný terén bez překážek nebo výrazných terénních nerovností. Vzhledem k váze a rozměrům vybavení, byla důležitá dobrá dopravní dostupnost, avšak minimální vytiženost blízké komunikace. Dalším požadavkem byla dostatečná vzdálenost od všech zdrojů zbytkového hluku. V našem případě se jednalo hlavně o nedalekou dálnici, jejíž hluk se nesl daleko do krajiny. U potenciálního místa měření byl také požadavek na časovou konzistentnost, tedy aby se výrazně neměnil povrch či jiné další parametry. Pro provedení experimentu byl nakonec vybrán zatravněný pozemek, v katastrálním území Jestřábí u Velké Bíteše, který všechny výše uvedené požadavky splňoval.

## 6.4. Vybavení

Všesměrový zdroj zvuku sestávající z generátoru signálu Minirator MR-PRO, zesilovače značky Bittner a speciální soustavy reproduktorů – tato sada umožňuje přehrání totožného zvukového signálu. Výhodou použití tohoto vybavení je možnost simulovat bodový zdroj zvuku s konstantní kvalitou přehrávaného signálu.

Meteorologická stanice Viking 02541 – s její pomocí byly monitorovány meteorologické podmínky přímo během jednotlivých měření. Stanice obsahovala stíněný teploměr, vlhkoměr, barometr a anemometr s růžicí pro určení rychlosti a směru větru.

Zvukoměr firmy Brüel & Kjær, model 2250 s originálním příslušenstvím – byl použit k zaznamenání ekvivalentních hladin akustického tlaku jednotlivých měření. Příslušný kalibrační list viz Příloha 1.

Mikrofon typ 4191 firmy Brüel & Kjær, jedná se o kondenzátorový všesměrový mikrofon. Příslušný kalibrační list viz Příloha 2.

Ověřená délková pásma – sloužila k přesnému umístění zvukoměru v průběhu jednotlivých měření



## 6.5. Rozložení experimentu

Na obrázku níže je vidět rozložení experimentu.



Obrázek 18 - Pohled na přístroje v místě měření.

Vpředu lze vidět zapojený všesměrový zdroj hluku a meteorologickou aparaturu. V pozadí je vidět šipkou označený zvukoměr, jehož poloha se průběžně měnila. Všesměrový zdroj zvuku, zvukoměr i meteorologická stanice jsou umístěni na stativích ve výšce 2,3 metry nad zemí.

Všesměrový zdroj s příslušenstvím byl napájen energií z přenosné elektrocentrály. Ta byla vzdálená cca 15 metrů opačným směrem, než probíhalo měření. Dále byla za účelem minimalizace vlivu na měření ukryta za stojícím vozidlem.

Na obrázku 19 lze vidět nastavení generátoru signálu Minirator MR-PRO. Z generátoru jde nastavený signál do zesilovače značky Bittner. Nastavení zesilovače lze vidět na obrázku 20. Zesilovač je propojený se soustavou reproduktoru, která simuluje bodový zdroj zvuku. Energetická náročnost a technické parametry zdroje zvuku neumožňují jeho nepřetržitý provoz, proto byl všesměrový zdroj průběžně spínán na dobu cca 10 vteřin.





Obrázek 19 - Generátor signálu pro všesměrový zdroj zvuku.



Obrázek 20 - Analogový zesilovač Bittner a jeho nastavení.

## 6.6. Průběh měření

Samotné měření bylo rozděleno na několik dní s cílem zachytit různé meteorologické podmínky. Měření probíhala nepřerušovaně po dobu několika hodin, přičemž byly neustále sledovány meteorologické podmínky. Zvukoměr byl vždy umístěn na vyznačenou značku vzdálenosti, byl spuštěn zdroj zvuku na dobu několika vteřin a poté byl zvukoměr přesunut na další pozici. Zvukoměr byl za stálého provozu opakovaně přesouván po přímce, viz náhled v obrázku 19. Měření tak získala časový rozestup, který má potvrdit opakovatelnost měření.



Obrázek 21 - Trasa pohybu zvukoměru

Díky přítomnosti meteorologické stanice, bylo možné odhalit a vyvarovat se nestandardním měřícím podmínkám způsobenými nárazovými porывy větru. Byly tak získány dva výrazně odlišné stavy a to jak po stránce teplotní a tak i po stránce vlhkosti.

Meteorologické podmínky byly:

Tabulka 2 - Meteorologické podmínky pro jednotlivá měření.

Měření číslo	Teplota	Vlhkost
1	20 °C	90 %
2	30 °C	50 %

## 6.7. Zpracování experimentu

Export měření ze zvukoměru a prohlížení surových dat lze provádět v programu BZ-5503 Measurement Partner Suite, náhled na program je na obrázku 22.

Pro další zpracování informací je nutné data dále vyexportovat do některého z běžně používaných formátů. V našem případě byl pro další zpracování zvolen MS Excel. Vyexportovaná data tvoří tabulku, která uvádí naměřené hodnoty pro každou vteřinu záznamu. S pomocí náhledu v programu BZ-5503, viz obrázek 22, je nutné dohledat a vyseparovat jednotlivá měření. Během separace jednotlivých měření byly zároveň odstraněny náběhové hrany a pro každé měření vznikl záznam podobný Tabulce 3, ovšem se všemi spektry třetinooktávového pásma, v kterém zvukoměr výsledky zaznamenává.



Obrázek 22 - Náhled na program BZ – 5503.

Tabulka 3 - Ukázka vyseparovaného jednoho měření pro jednu oktávovou frekvenci.

Datum a čas	Doba měření	LZeq 200Hz	LZeq 250Hz	LZeq 315Hz
28.7.2018 13:01:06	00:00:01	73,23	76,95	79,91
28.7.2018 13:01:07	00:00:01	73,79	76,51	79,48
28.7.2018 13:01:08	00:00:01	73,46	75,48	78,95
28.7.2018 13:01:09	00:00:01	73,49	74,86	79,62
28.7.2018 13:01:10	00:00:01	73,67	76,13	80,31
28.7.2018 13:01:11	00:00:01	73,03	75,41	79,61
28.7.2018 13:01:12	00:00:01	73,17	75,63	78,71
28.7.2018 13:01:13	00:00:01	72,21	76,01	79,83
28.7.2018 13:01:14	00:00:01	72,80	76,22	80,18

Výsledky v Tabulce 3 je nyní potřeba odlogaritmovat pro každou jednotlivou hodnotu a spočítat jejich aritmetický průměr. Výsledky vypadají podobně jako v Tabulce 4.

**Tabulka 4 - Příklad zprůměrovaného akustického tlaku.**

Frekvence [Hz]	200	250	315
∅ hodnota [dB]	73,2	76,0	79,7
∅ odlog $L_{Zeq}$	21033149	39374406	92257262

V této podobě jsou zpracovány veškeré záznamy pro všechna jednotlivá měření, ovšem pro celé frekvenční spektrum. Každé takovéto měření je navíc označeno meteorologickým popisem (teplota, vlhkost, rychlost a směr větru), podle kterého lze vybrat měření s totožnými podmínkami a jejich dalším průměrováním získat jedno měření, které reprezentuje naměřené hladiny akustického tlaku v dané vzdálenosti při konkrétních meteorologických podmínkách.

Posledním krokem je sumarizace odlogaritmovaných hodnot akustických tlaků mezi vybranými spektry tak, aby hodnoty třetinooktávových pásem daly ve svém součtu hodnotu oktávového pásma. Rozdělení jednotlivých frekvencí je rozepsáno v Tabulce 1.

**Tabulka 5 - Převod třetinooktávových  $L_{Zeq}$  na oktávové  $L_{Zeq}$ .**

Frekvence [Hz]	200	250	315
odlog $L_{Zeq}$	21033149	39374406	92257262
Suma	152664817		
Výsledný $L_{Zeq}$ (250 Hz)	81,84		

Takto zpracované hodnoty jednotlivých měření poslouží jako základ pro posouzení útlumu šířícího se zvuku. V další části této práce nebude pracováno s naměřenými hodnotami, ale s jejich rozdílem, přičemž jako prvotní hodnotu budeme uvažovat výsledky měření ve 2 metrech. Rozdílem akustického tlaku ve 2 metrech a v jiné vzdálenosti, získáme útlum, který lze vzhledem k výpočtu v decibelech dobře porovnávat s ostatními útlumy navzdory odlišným výsledkům naměřených akustických tlaků.

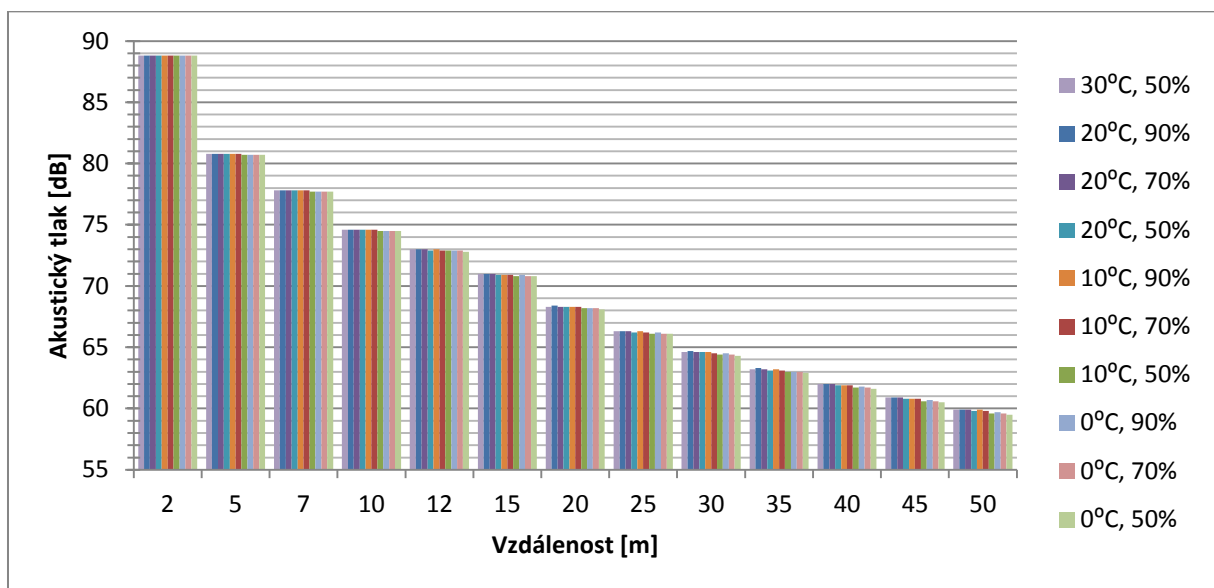
## 7. Vyhodnocení dat

### 7.1. Výsledky modelu

#### Zjednodušený model

Sestavením grafu s přehledem jednotlivých hodnot pro různé podmínky v daných vzdálenostech si lze prezentovat, jak se meteorologické podmínky v modelu projeví. V Grafu 4 lze vidět, jak se mění naměřené výsledky v různých vzdálenostech. Rozdíly jsou vzhledem k velikosti poklesu prakticky zanedbatelné, v 50 metrech je rozsah mezi největší a nejmenší hodnotou v rozmezí 1 dB.

Graf 4 - Hodnoty akustického tlaku pro různé meteorologické podmínky.



Protože velikost útlumu závisí na frekvenci zvuku, je v Tabulce 6 zobrazen útlum pro vybrané frekvence. Tyto frekvence byly zvoleny tak, aby reprezentovali různé části spektra. Meteorologické podmínky porovnávaných útlumů korespondují s meteorologickými podmínkami experimentu.

Tabulka 6 - Útlum vybraných frekvencí ve zjednodušeném modelu.

d [m]	Útlum pro 30°C, 50% RV				Útlum pro 20°C, 90% RV			
	frekvence [Hz]				frekvence [Hz]			
	63	250	1000	8000	63	250	1000	8000
2	0	0	0	0	0	0	0	0
5	7,96	8,42	7,99	8,19	7,96	8,42	7,98	8,15
7	10,89	11,63	10,94	11,26	10,89	11,63	10,92	11,21
10	13,99	15,15	14,06	14,58	13,99	15,14	14,05	14,5
12	15,57	16,99	15,66	16,31	15,57	16,98	15,64	16,2
15	17,51	19,3	17,62	18,47	17,51	19,29	17,6	18,33
20	20,01	22,37	20,16	21,33	20,01	22,36	20,13	21,14
25	21,95	24,82	22,14	23,64	21,95	24,82	22,1	23,39
30	23,54	26,88	23,76	25,59	23,53	26,87	23,71	25,29
35	24,87	28,64	25,14	27,29	24,87	28,63	25,08	26,94
40	26,03	30,18	26,34	28,82	26,03	30,17	26,27	28,42
45	27,06	31,56	27,4	30,21	27,06	31,54	27,32	29,75
50	27,97	32,79	28,35	31,49	27,97	32,77	28,26	30,98

## Reálný model

Úkolem reálného modelu, bylo odhalit, jak zavedení reálného terénu ovlivní šíření zvuku. Za tímto účelem je potřeba spočítat útlumy reálného modelu stejně jako v Tabulce 6 a následně je vzájemně porovnat.

Tabulka 7 - Útlum vybraných frekvencí v reálném modelu.

d [m]	Útlum pro 30°C, 50% RV				Útlum pro 20°C, 90% RV			
	frekvence [Hz]				frekvence [Hz]			
	63	250	1000	8000	63	250	1000	8000
2	0	0	0	0	0	0	0	0
5	7,95	8,4	7,97	8,17	7,95	8,4	7,97	8,15
7	10,87	11,61	10,91	11,24	10,87	11,61	10,91	11,19
10	13,97	15,11	14,03	14,55	13,97	15,11	14,02	14,47
12	15,55	16,96	15,63	16,28	15,55	16,96	15,62	16,18
15	17,49	19,27	17,59	18,44	17,49	19,26	17,58	18,31
20	19,98	22,32	20,12	21,29	19,98	22,32	20,09	21,11
25	24,92	24,79	22,83	24,35	24,92	24,78	22,79	24,12
30	23,52	26,86	23,74	25,57	23,52	26,85	23,7	25,28
35	24,84	28,6	25,1	27,25	24,84	28,59	25,05	26,91
40	26,02	30,17	26,32	28,8	26,02	30,16	26,26	28,41
45	27,04	31,53	27,37	30,18	27,04	31,52	27,3	29,74
50	27,96	32,77	28,33	31,47	27,96	32,75	28,25	30,97

**Tabulka 8 - Rozdíl v útlumu mezi zjednodušeným a reálným modelem.**

$d$ [m]	Rozdíl mezi oběma modely (zjednodušený - reálný) [dB]			
	63 Hz	250 Hz	1000 Hz	8000 Hz
2	0	0	0	0
5	0,01	0,02	0,01	0
7	0,02	0,02	0,01	0,02
10	0,02	0,03	0,03	0,03
12	0,02	0,02	0,02	0,02
15	0,02	0,03	0,02	0,02
20	0,03	0,04	0,04	0,03
25	-2,97	0,04	-0,69	-0,73
30	0,01	0,02	0,01	0,01
35	0,03	0,04	0,03	0,03
40	0,01	0,01	0,01	0,01
45	0,02	0,02	0,02	0,01
50	0,01	0,02	0,01	0,01

Z Tabulky 8 lze vyčíst, že obecně je útlum zjednodušeného modelu vyšší v rámci několika desetin decibelu. Ve vzdálenosti 25 metrů můžeme pro frekvenci 63 Hz sledovat jistou abnormalitu. Útlum reálného modelu je větší a navíc při prozkoumání příslušných hodnot v Tabulce 7 je vidět, že hodnoty reálného modelu ve vzdálenosti 25 metrů jsou výrazně nižší, než by se dalo předpokládat. Ve 30 metrech hodnoty opět narostou a klesají tak jak by se dalo očekávat. Tento jev se projevuje pouze u frekvencí 31,5 Hz a 63 Hz. U některých dalších frekvencí je také viditelná drobná odchylka, ale nikde nedochází k tak výraznému útlumu akustického tlaku a jeho následnému nárůstu. Tento jev je zachycen na obrázku 15, kde lze vidět, že měřicí bod ve 25 metrech se nachází v oblasti s výraznější deformací izoploch.

Zavedení terénu má dle Tabulky 8 jen malý vliv na výsledky zjednodušeného modelu. Je ovšem vhodné podotknout, že místo experimentu bylo zvoleno právě tak, aby působilo minimální vliv na měření. Proto je takovýto minimální projev v souladu s očekáváním a mohl by být výrazně odlišný v případě akusticky tvrdších povrchů s komplikovanou morfologií.

## 7.2. Výsledky měření

Jak již bylo zmíněno, měření probíhalo ve dvou dnech, aby bylo možné zachytit odlišné meteorologické podmínky. Ty byly následující:

Tabulka 9 - Meteorologické podmínky měření.

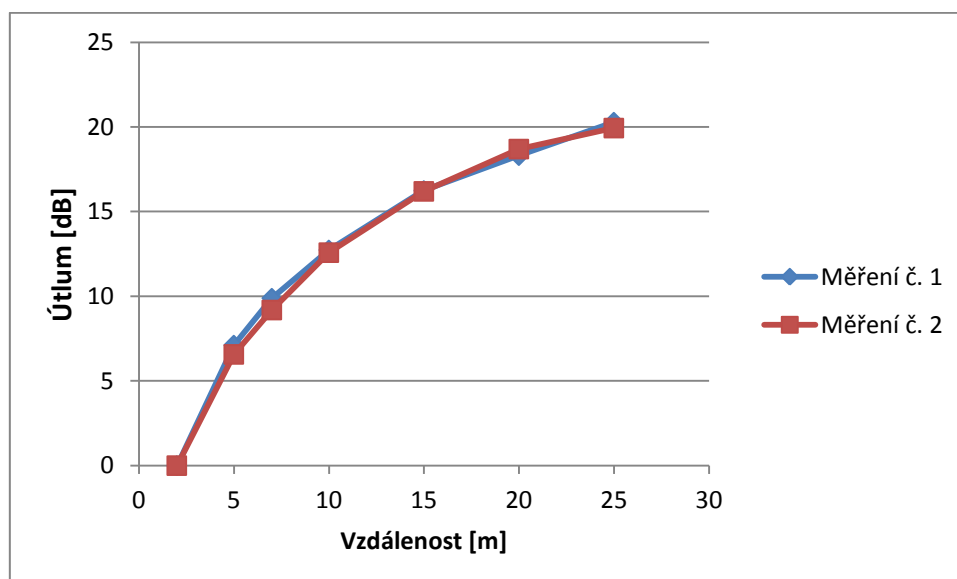
Měření číslo	Teplota	Vlhkost
1	20 °C	90 %
2	30 °C	50 %

Prvním krokem bude porovnání jednotlivých naměřených hodnot  $L_{Zeq}$ , přesněji jejich útlumů a zobrazení do grafu.

Tabulka 10 - Celkové hodnoty naměřeného  $L_{Zeq}$  a celkové útlumy.

$d$ [m]	Měření 1	Měření 2	Měření 1	Měření 2
	$\bar{\phi} L_{Zeq}$ [dB]		$\Delta(d_2 - d_x)$ [dB]	
2	89,77	90,43	0	0
5	82,65	83,86	7,12	6,57
7	79,9	81,24	9,89	9,19
10	77,03	77,85	12,74	12,58
15	73,52	74,23	16,25	16,2
20	71,46	71,73	18,31	18,7
25	69,48	70,49	20,29	19,94

Graf 5 - Průběhu útlumů obou měření.

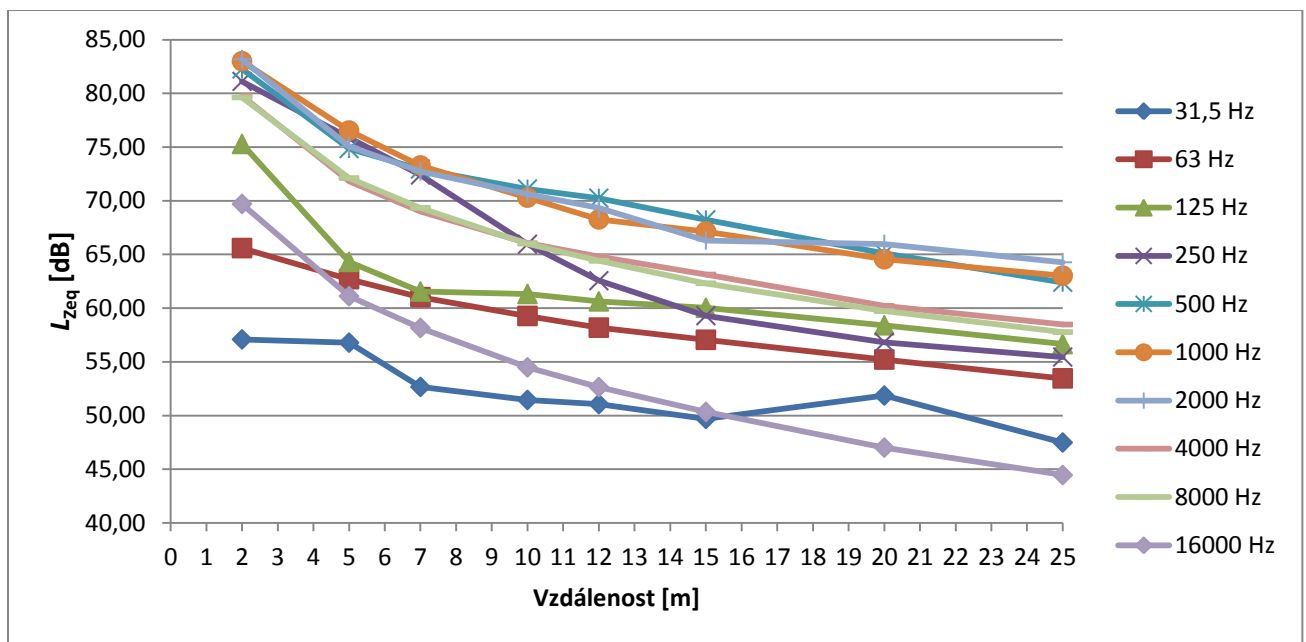




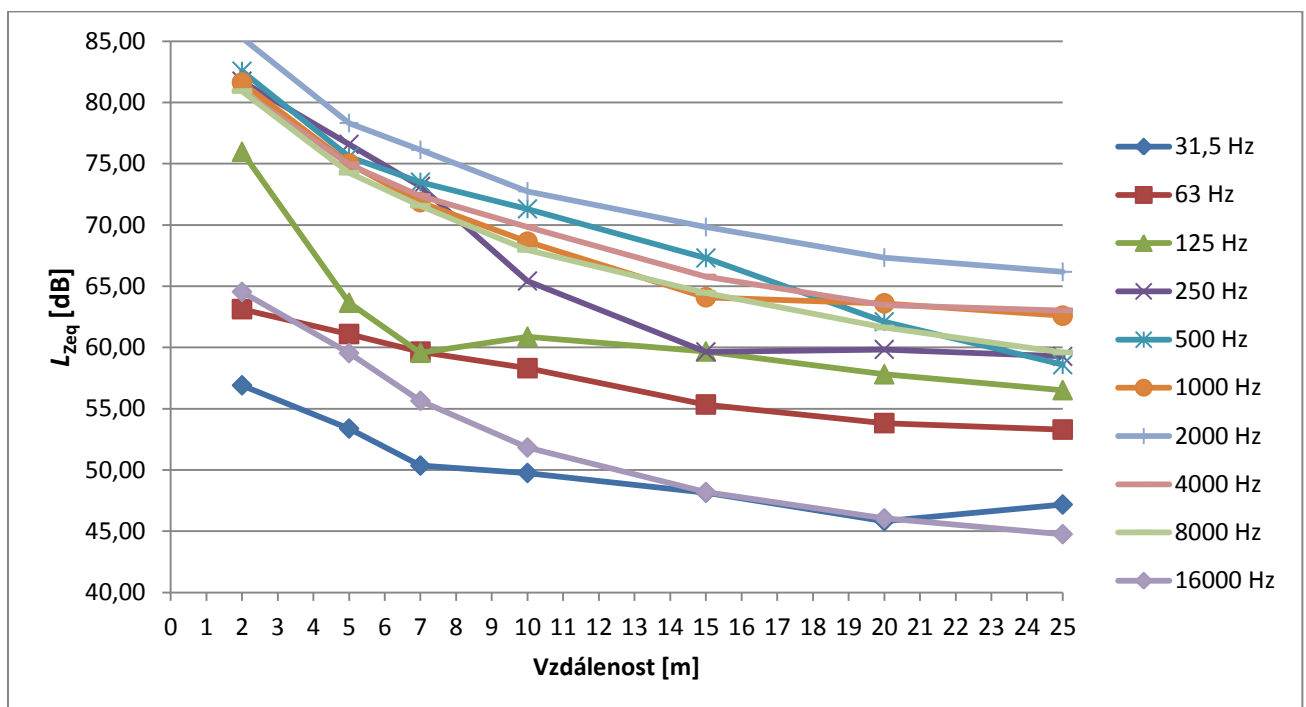
Jak lze vyčíst z Tabulky 10 a Grafu 5, útlumy obou měření jsou svým průběhem i hodnotami přibližně totožné. Protože se útlum projevuje pro jednotlivé frekvence různě, je stejně jako v případě modelu dalším krokem prozkoumání útlumu jednotlivých frekvencí.

Níže jsou zobrazeny grafy naměřených hodnot  $L_{Zeq}$  pro obě měření. Následuje tabulka útlumů pro jednotlivé frekvence.

Graf 6 - Záznam  $L_{Zeq}$  z měření číslo 1 pro jednotlivé frekvence a vzdálenosti.



Graf 7 - Záznam  $L_{Zeq}$  z měření číslo 2 pro jednotlivé frekvence a vzdálenosti.



Tabulka 11 - Útlumy jednotlivých frekvencí pro obě měření.

$d$ [m]	31,5 Hz		63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz	
	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,30	3,53	2,89	2,03	10,98	12,32	5,24	5,15	7,42	6,99
7	4,43	6,55	4,57	3,47	13,75	16,41	8,72	8,59	9,31	9,06
10	5,64	7,16	6,32	4,82	13,97	15,09	15,16	16,31	11,17	11,24
15	7,41	8,76	8,54	7,79	15,26	16,30	21,82	22,10	14,03	15,25
20	5,23	11,09	10,38	9,30	16,88	18,16	24,29	21,90	17,18	20,45
25	9,60	9,73	12,13	9,83	18,64	19,46	25,67	22,47	19,87	23,96
$d$ [m]	1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz		8000 Hz		16000 Hz	
	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2	M. 1	M. 2
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	6,46	6,61	8,13	6,96	7,95	6,01	7,51	6,67	8,59	5,00
7	9,71	9,76	10,45	9,15	10,76	8,60	10,28	9,36	11,55	8,90
10	12,70	13,00	12,55	12,54	13,72	11,13	13,61	12,97	15,22	12,71
15	15,86	17,53	16,87	15,45	16,64	15,17	17,31	16,46	19,37	16,35
20	18,45	18,02	17,21	17,95	19,56	17,51	19,90	19,30	22,69	18,49
25	19,97	19,04	18,91	19,11	21,29	17,93	21,85	21,34	25,25	19,78

V Tabulce 11 je vidět jak se jednotlivé útlumy různých měření pro stejnou frekvenci liší. Z tabulky lze vyčíst, že nízké frekvence (31,5 Hz a 63 Hz) dosahují obecně nižších útlumů. Dále však nelze vyčíst jakýkoliv obecně platný trend. Z grafů 6 a 7 je vidět, že šíření jednotlivých frekvencí probíhá odlišně. Nesplňují však předpokládanou logaritmickou křivku, místo toho jsou průběhy různě deformovány. Tyto deformace by na první pohled mohly působit jako pouhá chyba měření, ovšem při porovnání některých křivek (125 Hz, 250 Hz) je vidět, že jsou průběhy velice podobné pro oba měřící dny. To by naznačovalo, že se při měření projevil další faktor, s kterým teorie nepočítala, ale který je svázána s měřícím místem nebo konkrétním měřícím zařízením.

### 7.3. Zhodnocení a srovnání

Dle dostupných teoretických podkladů byl spočítán předpokládaný útlum pro jednotlivé frekvence. Ten by měl být pro vybrané frekvence následující:

Tabulka 12 - Vypočtený útlum vybraných frekvencí.

$d$ [m]	20°C, 90% RV				30°C, 50% RV			
	63,5 Hz	250 Hz	1000 Hz	8000 Hz	63,5 Hz	250 Hz	1000 Hz	8000 Hz
2	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4,96	8,63	8	8,15	6,46	8,64	8	8,15
7	7,88	11,98	10,94	11,2	9,38	11,99	10,94	11,5
10	10,98	15,7	14,06	14,49	12,48	15,7	14,07	14,97
12	12,56	17,66	15,66	16,19	14,06	17,67	15,67	16,79
15	14,5	20,15	17,63	18,32	16	20,16	17,64	19,11
20	17	23,51	20,18	21,14	18,5	23,52	20,19	22,22
25	18,94	26,21	22,16	23,4	20,44	26,23	22,18	24,78

Výpočet útlumu byl proveden podle vzorce (33) a výsledky útlumu jednotlivých faktorů jsou uvedeny v tabulkách níže.

Geometrický útlum v tabulce níže vychází z rovnice (34), za  $r_1$  jsou dosazovány 2 m. Útlum je tak porovnán právě vůči hodnotě ve 2 metrech. Tento útlum nezávisí na meteorologických podmínkách ani na frekvenci zvuku.

Tabulka 13 - Geometrický útlum.

$r_2$ [m]	2	5	7	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50
Útlum [dB]	0	7,96	10,88	13,98	15,56	17,5	20	21,94	23,52	24,86	26,02	27,04	27,96

Atmosférický útlum vypočítaný podle rovnic (36), (37) a (38). Jak lze vidět v Tabulce 14, atmosférický útlum se pro jednotlivé frekvence může výrazně lišit, přičemž na šíření některých frekvencí má výrazný vliv, zatímco pro jiné frekvence téměř zanedbatelný.

Tabulka 14 - Atmosférický útlum pro jednotlivé frekvence při různých meteorologických podmínkách.

Frekvence [Hz]	Koeficient útlumu $\alpha$ [dB/100 m]	
	20°C, 90% RV	30°C, 50% RV
31,5	0,002	0,004
63	0,007	0,016
125	0,027	0,057
250	0,096	0,173
500	0,27	0,362
1000	0,53	0,606
2000	0,908	1,222
4000	2,03	3,532
8000	6,344	12,35
16000	22,928	42,512

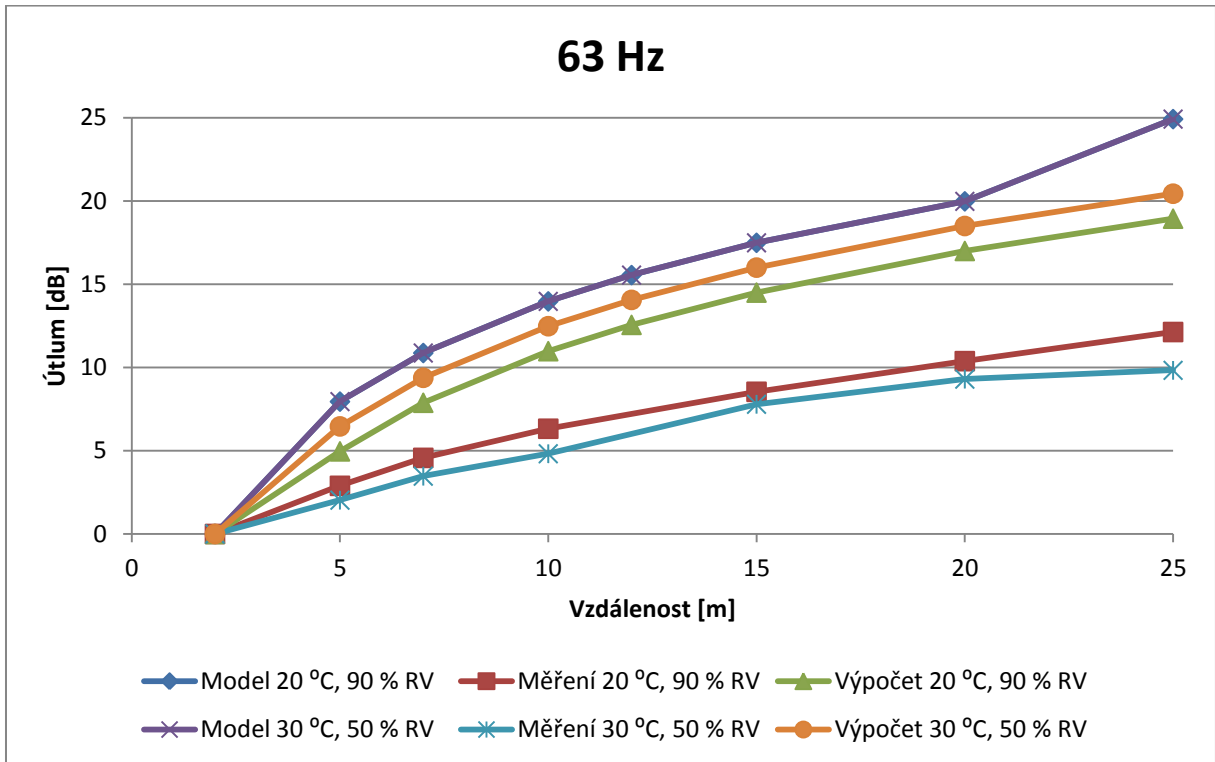
Poslední faktor – vliv země je výrazně závislý na charakteru povrchu, nad kterým se zvuk šíří. Mé výpočty pracovaly s akusticky porézním povrchem, tedy  $G = 1$  pro rovnice v Obrázku 10. Tím se výpočet do značné míry zjednoduší, hlavně pro vyšší frekvence. Dále je potřeba podotknout, že měření probíhalo na krátké vzdálenosti, při vzdálenostech řádově větších, by se útlum projevoval odlišně.

Tabulka 15 - Útlum země pro jednotlivé frekvence.

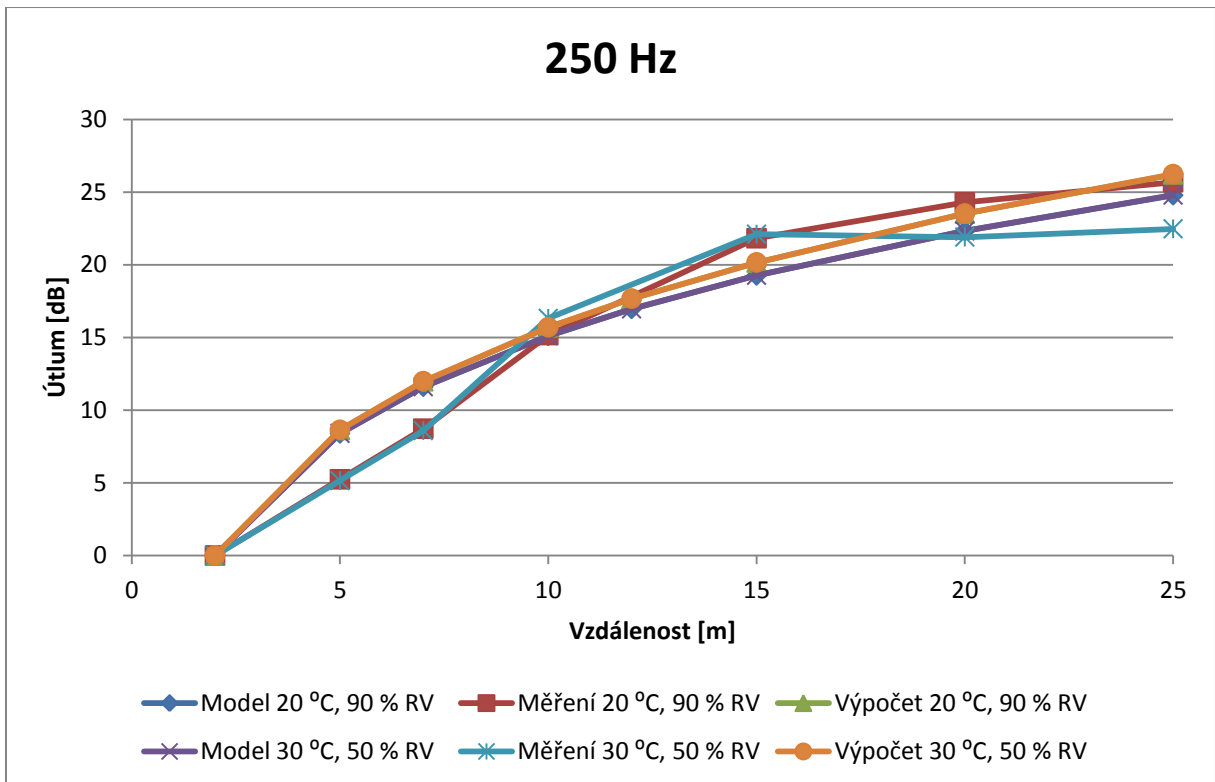
$d$ [m]	útlum							
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
2	-3	0,08	0,47	0,17	0,01	0	0	0
5	-3	0,19	1,14	0,42	0,03	0	0	0
7	-3	0,27	1,57	0,58	0,04	0	0	0
10	-3	0,37	2,18	0,81	0,05	0	0	0
12	-3	0,43	2,56	0,95	0,06	0	0	0
15	-3	0,53	3,11	1,15	0,07	0	0	0
20	-3	0,67	3,96	1,47	0,09	0	0	0
25	-3	0,8	4,72	1,75	0,11	0	0	0
30	-3	0,92	5,41	2,01	0,12	0	0	0
35	-3	1,03	6,04	2,24	0,14	0	0	0
40	-3	1,12	6,61	2,45	0,15	0	0	0
45	-3	1,21	7,12	2,64	0,16	0	0	0
50	-3	1,29	7,59	2,81	0,17	0	0	0

Na závěr lze srovnat útlumy některých vzorových frekvencí, které jsem v průběhu své práce získal z modelu, měření a výpočtem.

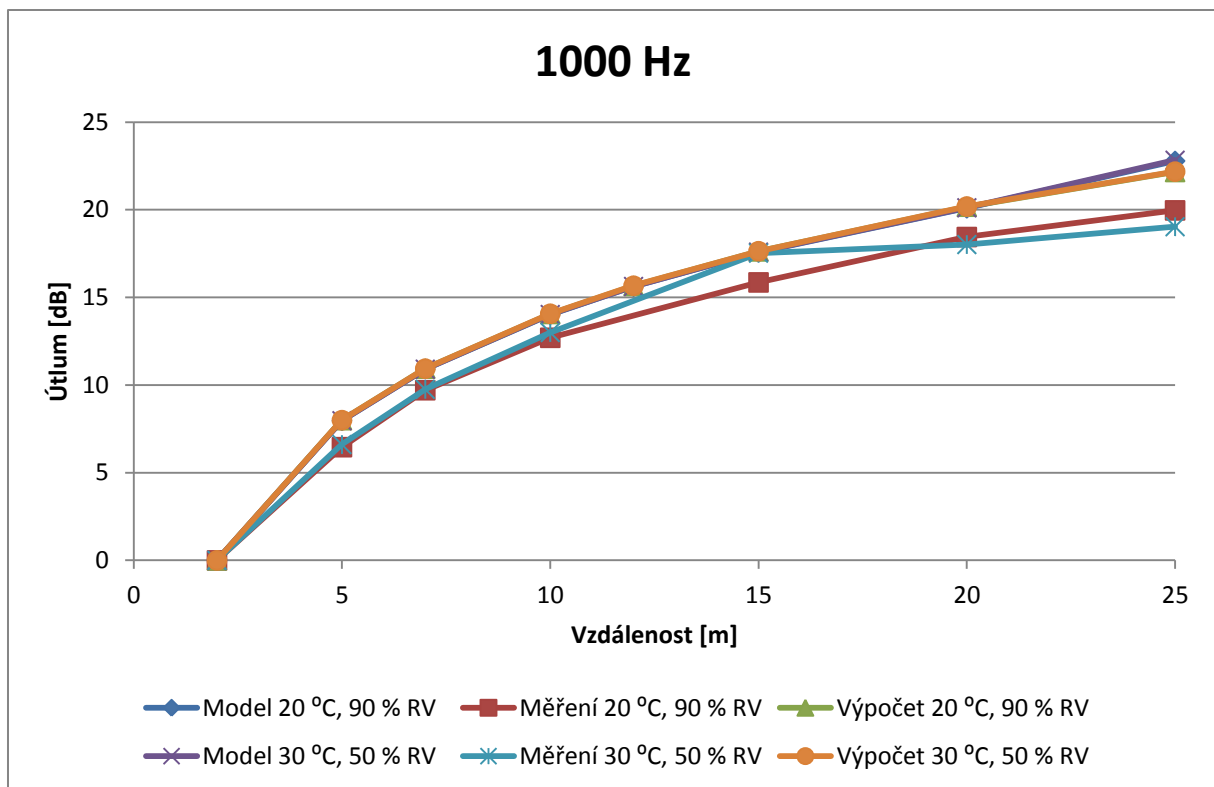
Graf 8 - Porovnání jednotlivých útlumů pro frekvenci 63 Hz.



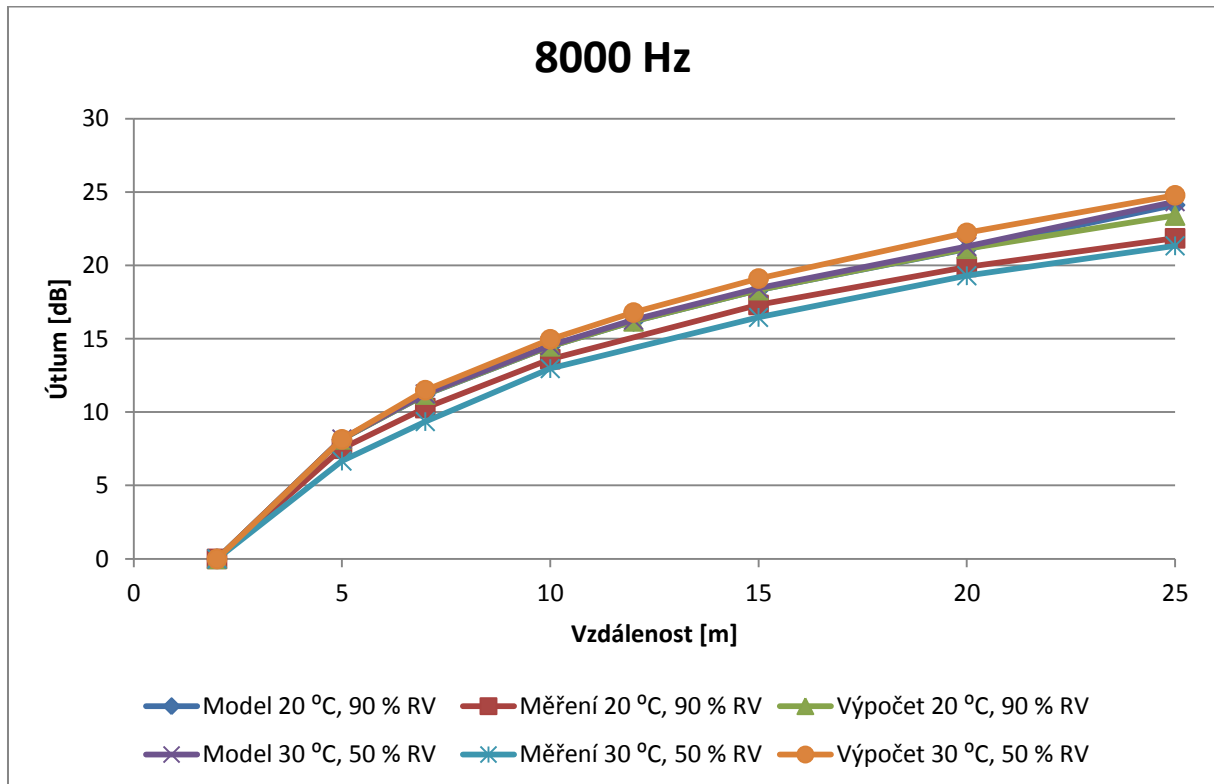
Graf 9 - Porovnání jednotlivých útlumů pro frekvenci 250 Hz.



Graf 10 - Porovnání jednotlivých útlumů pro frekvenci 1000 Hz.



Graf 11 - Porovnání jednotlivých útlumů pro frekvenci 8000 Hz.

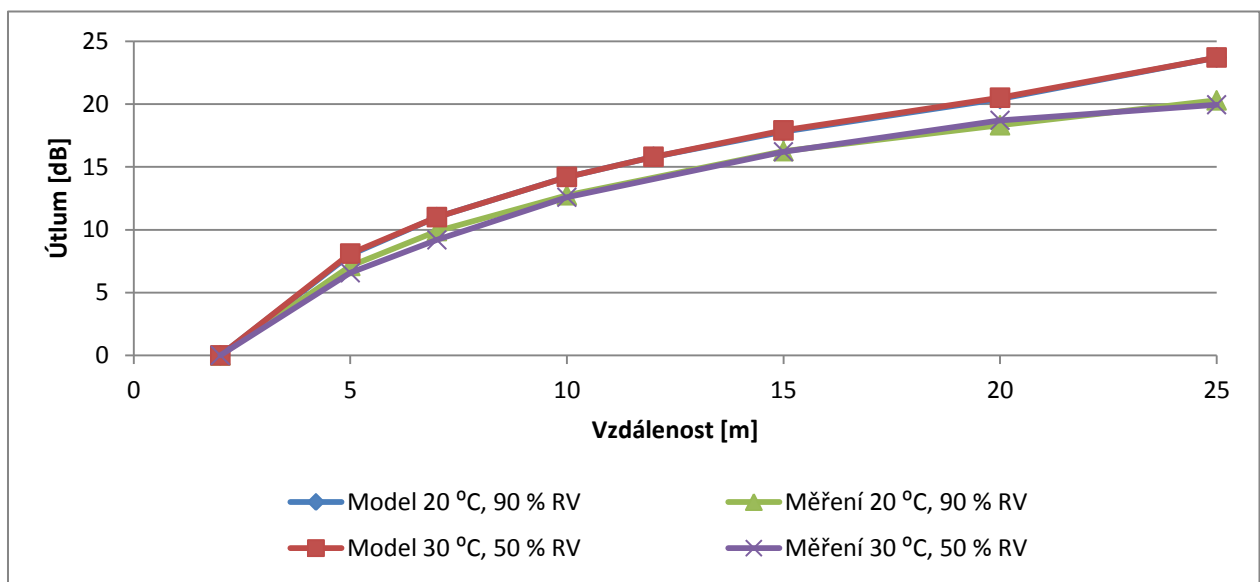


Jak je vidět na Grafech 8 až 11 útlum získaný z modelu je větší než útlum skutečně naměřený. Výsledky hlukového modelu tak mohou být obecně trochu podhodnocené.

V Grafu 8 lze vidět poměrně výrazný rozkol mezi jednotlivými metodami. Zatímco model příliš nezohlednil meteorologické podmínky, výpočtová metoda se naměřeným hodnotám podobá o trochu víc. Rozdíl mezi samotnými hodnotami je poměrně výrazný a dalo by se usuzovat, že zde působí další faktor, který nebyl identifikován.

Pro ostatní frekvence se průběhy jednotlivých útlumu vzájemně podobají již mnohem více, avšak je vidět, že i u těchto průběhů dochází postupně k rozkolu.

Graf 12 - Porovnání celkového útlumu mezi modelem a měřením.



Porovnáním celkového útlumu mezi modelem a měřeními se zdá, že pro kratší vzdálenosti je vliv meteorologických podmínek na šíření zanedbatelný. Dále se opět projevil větší útlum u modelu, což naznačuje, že modelové výsledky předpokládaného hluku mohou být lehce podhodnoceny. Při tvorbě hlukových modelů je tedy potřeba počítat s bezpečnostní rezervou, případně modely kalibrovat pomocí reálných měření.

Práce také ukazuje, že pro běžná měření celkového  $L_{Zeq}$  za účelem posouzení hygienických limitů, není potřeba se dopodrobna zabývat meteorologickými podmínkami. Obzvláště pokud měření probíhá při standardních hodnotách uvedených v příslušných normách.

## 8. Závěr

V této práci jsme zkoumali šíření zvuku na krátkou vzdálenost ve venkovním prostředí. V rámci tohoto zkoumání byly ve specializovaném softwaru CadnaA vytvořeny dva hlukové modely. První zjednodušený a druhý přesně kopírující podmínky následně provedeného měření.

Dále bylo provedeno terénní měření, kdy za použití speciálního vybavení byl měřen akustický tlak bílého šumu v různých vzdálenostech. Měření bylo rozděleno do dvou dnů, aby byly zajištěny odlišné meteorologické podmínky, které bylo možné následně porovnat.

Byly porovnány útlumy pro jednotlivá modelová a terénní měření. Také byl spočítán útlum, který vycházel z příslušných norem zabývajících se problematikou šíření zvuku v atmosféře. Tento útlum byl také porovnán s ostatními výsledky.

Byly tak porovnány různé meteorologické podmínky, reálná a teoretická data a různé frekvence.



## 9. Literatura

- [1] Schauer P., Vybrané statě z akustiky, Ústavu fyziky Stavební fakulty VUT v Brně (2008)
- [2] Introduction to acoustics, Encyclopedia Britannica, <https://www.britannica.com/science/acoustics/Introduction>; 24.7.2018
- [3] C. Boyer, U. Merzbach, A History of Mathematics, str. 55, Wiley (1991)
- [4] How Sound Propagates, Princeton University Press, vydáno 24. 2. 2016, vychází z Treatise on Sound and Hearing (Aristoteles)
- [5] D. Halliday, R. Resnick a J. Walker, Fyzika Wiley (1997), překlad kolektiv autorů, VUTIM 2000
- [6] Soubor přednášek Enviromentální fyziky, Fakulta technologická, UTB ve Zlíně, [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/), 15. 11. 2018
- [7] <https://www.wikiskripta.eu/w/Ultrazvuk>, 20. 5. 2019
- [8] Reichl, J., Všetická, M., Encyklopedie fyziky (2006), <http://fyzika.jreichl.com/> 15. 10. 2018
- [9] Mrštňný Jan, Studium percepčního dynamického rozsahu lidského hlasu (2018), Katedra biofyziky, Univerzita Palackého v Olomouci
- [10] Striegel Radim, Metodika měření vybraných dopravně-inženýrských parametrů hluku a imisím lokalitách Zóna 30, Ministerstvo dopravy České republiky

[11] Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí, Věstník ministerstva zdravotnictví, 18. 10. 2018

[12] Noise News, What are Fast, Slow & Impulse Time weightings?, <https://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2015/01/fast-slow-impulse-time-weightings/>, 15. 5. 2019

[13] Přednáška na téma Analýza a zpracování signálů, Katedra informatiky a výpočetní techniky, Fakulta aplikovaných věd Západočeské univerzity, <http://www.kiv.zcu.cz/~mautner/Azs/>, 20. 4. 2019

[14] Malchaire J., Sound measuring instruments - chapter 6, Unité Hygiène et Physiologie du Travail, Université Catholique du Louvain

[15] Microphone type 4191 datasheet, Brüel & Kjær , <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4191>, 20. 5. 2019

[16] Propagation of sound, its travel path, travel mediums and behavior in the mediums.

[17] Lamancusa J.S.: Outdoor Sound Propagation. Noise control – chapter 10 (2009), Penn State

[18] ČSN ISO 9613-1 Útlum při šíření zvuku ve venkovním prostoru - Část 1: Výpočet pohlcování zvuku v atmosféře, Listopad 1995

[19] ČSN ISO 9613-2 Útlum při šíření zvuku ve venkovním prostoru - Část 2: Obecná metoda výpočtu, Září 1998

[20] Zmrhal Vladimír Fundamentals of Noise Reduction (powerpointová prezentace) (2018), ČVUT, Ústav techniky prostředí, kurz Enviromental Engineering, <http://users.fs.cvut.cz/vladimir.zmrhal/language/en/courses/ee/>, 15. 5. 2019

[21] ČSN ISO 1996-1 Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí - Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení, Únor 2017

[22] ČSN ISO 1996-2 Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí - Část 2: Určování hladin akustického tlaku, Září 2018

[23] Brüel & Kjær <https://www.bksv.com/en/>

[24] Návod zvukoměru typ 2250, výrobce Brüel & Kjær

[25] Návod pro program CadnA, dostupné na <https://www.datakustik.com/>

# 10. Přílohy

## Příloha 1 - kalibrační list zvukoměru

**Český metrologický institut**  
Okružní 31, 638 00 Brno  
tel. +420 545 555 111  
www.cmi.cz

**Pracoviště:**  
Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno  
Odběrní akustiky, tel. +420 545 555 212, fax. +420 545 555 183

**OVĚŘOVACÍ LIST**  
**6035-OL-Z0014-18**

**Ověření tohoto měřidla bylo provedeno v omezeném rozsahu !**

List 1 ze 2 listů

**Datum vystavení:** 15.03.2018

**Zákazník:** Ecological Consulting a.s.  
Na Sítelnici 48  
779 00 OLOMOUC

**Měřidlo:** Zvukoměr s 1/1 a 1/3 oktávovými filtry Předzesilovač  
**Výrobce:** Brüel & Kjær, Dánsko  
**Typ:** 2250  
**Výrobní číslo:** 2600467 ZC-0032 6346

**Naměřené výsledky se vztahují k technickému stavu měřidla v době provedení ověření.**

**Použité etalony:** Kalibrační systém pro ověřování zvukoměrů B&K, typ 3630 s metrologickou návazností prostřednictvím Data Acquisition/Switch unit Agilent, typ 34970A, v.č. MY41022651, kalibrační list č. 6011-KL-L0216-16  
Multifunkční akustický kalibrátor B&K, typ 4226, v.č. 2305113, kalibrační list č. 8012-KL-10266-17  
NF Generátor B&K, typ 1051, v.č. 1846834, kalibrační list č. 6035-KL-S0001-16  
Multimetr Datron, typ 1281, v.č. 27126, kalibrační list č. 6011-KL-L0514-17

**Datum provedení:** 15.03.2018  
**Ověření provedl:**

**Ředitel ČMI OI Brno:**  
  
Ing. Radovan Wicek

Ing. Zdeněk Vyhlička

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

**OVĚŘOVACÍ LIST**      **6035-OL-Z0014-18**

List 2 ze 2 listů

**Metoda měření:** Zvukoměr s 1/1 a 1/3 oktávovými filtry byl při periodických zkouškách zkonštruován podle postupu 635-MP-C108 a podle postupů uvedených v ČSN EN 61672-3, popř. ČSN EN 61260.

**Podmínky měření:** Teplota v laboratoři: (23 ± 1,0) °C  
Relativní vlhkost vzduchu: (40 ± 15) %  
Atmosférický tlak: (98,5 ± 2) kPa

**Výrok o výsledcích zkonštrukt:**

Zvukoměr s 1/1 a 1/3 oktávovými filtry, předložený ke zkouškám úspěšně vyhověl zkouškám pro skupinu X, provozní kategorie třídy 1 podle ČSN EN 61672-3 při podmínkách prostředí, za kterých byly zkoušky provedeny.  
Protože byl k dispozici veřejný důkaz \*) nezávislé zkušební organizace odpovědně za schválení výsledků typových zkoušek provedených v souladu s IEC 61672-2 prokazujících, že typ zvukoměru plně vyhovuje požadavkům ČSN EN 61672-1, zvukoměr předložený ke zkouškám požadavkům pro skupinu X, provozní kategorie třídy 1 podle ČSN EN 61672-1 **vyhovuje**.

Splnění požadavků normy ČSN EN 61260, třída přesnosti 1, bylo ověřeno pro 1/3 - oktávové pásmové filtry v rozsahu 10 Hz - 20 kHz.

Indikovaná hladina akustického tlaku při vážení A vlivem vnitřního generovaného šumu včetně mikrofonu byla 17,3 dB.

**Poznámka:** Na přání zákazníka nebyly ověřeny 1/1 - oktávové filtry.  
Na přístroj byl umístěn štítek s textem „**Omezený rozsah ověření**“.

Ověření je provedeno vystavením tohoto ověřovacího listu a nalepením ověřovací značky **CM 18** s evidenčním číslem 3040586 a štítku s označením **6035-OL-Z0014-18** a dobou platnosti ověření na měřidlo.



Doba platnosti ověření je stanovena vyhláškou Ministerstva průmyslu a obchodu č. 345/2002 Sb. ve znění vyhlášky č. 65/2006 Sb. ve znění vyhlášky č. 259/2007 Sb. ve znění vyhlášky č. 204/2010 Sb. ve znění vyhlášky č. 285/2011 Sb. a ve znění vyhlášky č. 120/2015 Sb.  
Platnost ověření zaniká dne **14.03.2020** a v případech uvedených v §7, odst. 2 vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb. ve znění vyhlášky MPO č. 344/2002 Sb. ve znění vyhlášky MPO č. 229/2010 Sb. ve znění vyhlášky MPO č. 125/2015 Sb.





\*) Dostupnost veřejného důkazu na: [www.prtb.de/en/org/11\\_index.htm](http://www.prtb.de/en/org/11_index.htm)  
[www.cmi.cz](http://www.cmi.cz)

Konec ověřovacího listu.

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.

# Příloha 2 – kalibrační list mikrofonu

<b>OVĚŘOVACÍ LIST</b>	<b>6035-OL-M0013-18</b>	List 2 ze 2 listů
<b>Metoda měření:</b>	Měřicí mikrofon byl zkoušen podle postupu 635-MP-C109 a podle norem PNU 1802.1 a PNU 1802.2 metodikou popsanou v „Calibration Laboratory Procedure, Bruel & Kjaer, January 1991“.	
<b>Podmínky měření:</b>	Teplota v laboratoři: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ Relativní vlhkost vzduchu: $(40 \pm 15) \%$ Atmosférický tlak: $(98,5 \pm 2) \text{ kPa}$	
<b>Výrok o výsledku:</b>	Výsledky metrologických zkoušek prokázaly, že předložený měřicí mikrofon splňuje požadavky normy PNU 1802.1 Ověření je provedeno vystavením tohoto ověřovacího listu a nalepením ověřovací značky <b>CM 18</b> s evidenčním číslem 0035561.  Citlivost měřicího mikrofonu napřizáno: <b>-37,5 dB</b> re 1V/Pa t.j. 13,3 mV/Pa Rozšířená nejistota měření citlivosti $U = 0,2 \text{ dB}$ na kmitočtu 250 Hz při atmosférickém tlaku 101,325 Pa.  Doba platnosti ověření je stanovena vyhláškou Ministerstva průmyslu a obchodu č. 345/2002 Sb. ve znění vyhlášky č. 665/2006 Sb. ve znění vyhlášky č. 259/2007 Sb. ve znění vyhlášky č. 204/2010 Sb. ve znění vyhlášky č. 285/2011 Sb. a ve znění vyhlášky č. 120/2015 Sb. Platnost ověření zaniká dne <b>11.03.2020</b> a v případech uvedených v §7, odst. 2 vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu č. 262/2000 Sb. ve znění vyhlášky MPO č. 344/2002 Sb. ve znění vyhlášky MPO č. 229/2010 Sb. ve znění vyhlášky MPO č. 125/2015 Sb.  Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu $k$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření $k = 2$ .	
	Konec ověřovacího listu.	
		
<i>Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.</i>		

	<b>Český metrologický institut</b> Okružní 31, 638 00 Brno tel. +420 545 555 111 www.cmi.cz	List 1 ze 2 listů
<b>Pracoviště:</b>	Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno Oddělení akustiky, tel. +420 545 555 212, fax. +420 545 555 183	
<b>OVĚŘOVACÍ LIST</b> <b>6035-OL-M0013-18</b>		
<b>Datum vystavení:</b>	12.03.2018	
<b>Zákazník:</b>	Ecological Consulting a.s. Na Střelnici 48 779 00 OLOMOUC	
<b>Měřidlo:</b>	Mikrofon	
<b>Výrobce:</b>	Brüel & Kjær, Dánsko	
<b>Typ:</b>	4191	
<b>Výrobní číslo:</b>	2720605	
Naměřené výsledky se vztahují k technickému stavu měřidla v době provedení ověření.		
<b>Použité etalony a zařízení:</b>	Čítač HP, typ 53131A, v.č. 3736A21085, kalibrační list č. 6011-KL-L0257-17 Mikrofon B&K, typ 4160, v.č.1248107, kalibrační list č. 8012-KL-91021-17 Mikrofon B&K, typ 4160, v.č.1144826, kalibrační list č. 8012-KL-91091-17 NF Generátor B&K, typ 1051, v.č. 1846834, kalibrační list č. 6035-KL-S0001-16 Pistonfon B&K, typ 4220, v.č. 756850 + 40 cm Coupler, typ WA 0242 Mikrofonní předzesilovač B&K, typ 2627, v.č. 797340 + vložný modul, typ WB 0850 Měřicí zesilovač B&K, typ 2636, v.č. 982057, kalibrační list č. 6035-OL-S0002-16 Multimetr HP, typ 34401A, v.č. 3146A20987, kalibrační list č. 6011-KL-L0324-17	
<b>Datum provedení:</b>	12.03.2018	
<b>Ověření provedl:</b>	 Alexander Hrnsko	<b>Vedoucí oddělení akustiky:</b>  Ing. Zdeněk Vyhlička
		
<i>Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.</i>		