

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Šíření hluku z větrných elektráren**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Roman KADLEC**  
Osobní číslo: **E13B0361P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Šíření hluku z větrných elektráren**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte způsoby šíření hluku z větrných elektráren a proveďte krátký úvod do problematiky hluku.
2. Porovnejte hygienické limity hluku v jednotlivých zemích EU a povolené vzdálenosti umístění větrných elektráren od lidského obydlí.
3. Popište účinky hluku generovaného větrnými elektrárnami na lidský organismus.
4. Připravte simulaci hlukové situace v dané lokalitě v programu Hluk+.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zuzana Kabešová**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je na téma hluk z větrných elektráren a jeho vliv na lidský organizmus. Celá práce je rozčleněna do šesti kapitol. V první kapitole jsou rozebrány základní vlastnosti zvuku. V další části je uveden rozbor hluku, jeho obecné zdroje a vliv klimatických podmínek na šíření hluku. Ve třetí části jsem uvedl za pomoci odborné literatury možné zdroje hluku z větrných elektráren, intenzity a jejich frekvenční rozsahy. Na to navazuje základní právní ustanovení týkající se větrných elektráren v České Republice a srovnání s některými státy EU. V páté části jsem uvedl, jak člověk vnímá hluk a vlivy nadměrného hluku na lidský organizmus vztaženo k větrným elektrárnám. Poslední kapitola se zabývá simulací šíření hluku v programu Hluk + na konkrétním místě.

## **Klíčová slova**

Větrné elektrárny, zdroje hluku, zvuk, hluk, zdraví, program Hluk +

## **Abstract**

This bachelor thesis is addressing problem about noise from wind power plants and their influence on human organism. This bachelor work is split into six parts. The first part is dealing with the basic characteristics of sound. In the next part there is an analysis of noise, it's basic sources and influence of climatic conditions on spreading of the sound. In the third part I have stated, with help of technical literature, some of the possible sources of noise from wind power plants, intensities and their frequency range. That links this work to the basic legal establishment considering wind power plants in Czech republic and it's comparison with some other countries in EU. In the fifth part I have stated the effect of noise on humans and influence of excessive noise on human organism with connection to wind power plants. The last part is dealing with a simulation of noise spreading on platform Hluk+ at a particular location.

## **Keywords**

Wind power plants, noise source, sound, noise, health, program Hluk +

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2014

Roman Kadlec

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Zuzaně Kabešové za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZVUK</b> .....	<b>12</b>
1.1 AKUSTICKÁ RYCHLOST.....	12
1.2 VLNOVÝ ODPOR.....	12
1.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ZVUKU .....	13
1.4 AKUSTICKÝ TLAK A STUPNICE PRO MĚŘENÍ HLUKU .....	13
1.5 ZPŮSOB POČÍTÁNÍ S HLADINAMI ZVUKU V DB.....	14
1.6 AKUSTICKÝ VÝKON .....	15
<b>2 HLUK</b> .....	<b>16</b>
2.1 OBECNÉ ZDROJE HLUKU .....	16
2.2 ŠÍŘENÍ ZVUKU V KLIMATICKÝCH PODMÍNKÁCH .....	16
2.3 ÚTLUM VLIVEM VĚTRU .....	17
2.4 ÚTLUM VLIVEM TEPLOTNÍCH GRADIENTŮ.....	17
2.5 ÚTLUM VLIVEM PŘEKÁŽKY .....	18
2.6 ÚTLUM VLIVEM PRŮCHODU PŘEKÁŽKOU .....	18
2.7 VLIV POČASÍ A DENNÍ DOBY .....	18
2.8 ŠÍŘENÍ ZVUKU PROSTŘEDÍM.....	19
<b>3 ŠÍŘENÍ HLUKU Z VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN</b> .....	<b>20</b>
3.1 AERODYNAMICKÝ ZDROJ HLUKU.....	20
3.2 MECHANICKÝ ZDROJ HLUKU .....	20
3.3 SROVNÁNÍ INTENZIT HLUKŮ .....	21
<b>4 HYGIENICKÉ LIMITY TÝKAJÍCÍ SE VTE</b> .....	<b>22</b>
4.1 HYGIENICKÉ LIMITY V ČESKÉ REPUBLICE .....	22
4.2 HYGIENICKÉ LIMITY V ZEMÍCH EU .....	22
<b>5 VLIV HLUKU NA LIDSKÝ ORGANIZMUS</b> .....	<b>24</b>
5.1 VNÍMÁNÍ ZVUKU.....	24
5.2 HLUK A ZDRAVÍ.....	24
5.3 PSYCHOLOGICKÉ PROJEVY.....	25
5.4 SYNDROM VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN .....	26
<b>6 SIMULACE ŠÍŘENÍ HLUKU VE VYBRANÉ OBLASTI</b> .....	<b>27</b>
6.1 OBEC VÝSLUNÍ U CHOMUTOVA.....	27
6.2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA VESTAS V 90, 2 MW .....	28
6.3 PROGRAM HLUK + .....	29
6.4 ZKUŠEBNÍ SIMULACE .....	30



---

6.5	VLASTNÍ SIMULACE V OBCI VÝSLUNÍ .....	31
6.6	HODNOCENÍ SIMULACE.....	32
<b>ZÁVĚR:</b>	.....	<b>33</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b>	.....	<b>35</b>
SEZNAM POUŽITÝCH INTERNETOVÝCH ZDROJŮ	.....	35
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ:</b>	.....	<b>37</b>
<b>SEZNAM TABULEK:</b>	.....	<b>37</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH:</b>	.....	<b>37</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	.....	<b>38</b>

## Seznam symbolů a zkratek

c.....	Rychlost šíření zvuku [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
CNS.....	Centrální nervová soustava
E.....	Modul pružnosti prostředí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ]
EU .....	Evropská unie
I.....	Akustická intenzita [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
k .....	Konstanta
$L_p$ .....	Hladina akustického tlaku [dB]
$L_{WA}$ .....	Akustický výkon [dB]
$L_{Aeq}$ .....	Ekvivalentní hladina akustického tlaku [dB]
P .....	Elektrický výkon [MW]
p .....	Sledovaný akustický tlak [Pa]
$p_0$ .....	Referenční akustický tlak [Pa]
r .....	Směr pohybu částice
S .....	Plocha [ $\text{m}^2$ ]
SPL.....	Hladina akustického tlaku [dB]
t .....	Čas [t]
u .....	Akustická rychlost
USA .....	Spojené státy americké
VtE.....	Větrné elektrárny
x, y, z.....	Souřadnice [m]
W.....	Akustický výkon [W]
WHO.....	The World Health Organization, Světová zdravotnická organizace
$\alpha$ .....	Činitel zvukové pohltivosti
$\beta$ .....	Činitel zvukové odrazivosti
$\rho$ .....	Hustota prostředí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\rho_h$ .....	Měrná hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

## Úvod

V dnešní době většina lidí vlastní velké množství elektronických zařízení, ať už se jedná o chytré telefony či velkoformátové televize. Každý tento přístroj potřebuje ke svému fungování elektrickou energii. Bez dodávky elektrického proudu by nejspíše naše společenství zkolabovalo, a proto závislost na tomto druhu energie je veliká. Výroba elektrické energie v České Republice se zajišťuje především uhelnými a jadernými elektrárnami. Uhelné elektrárny vyrábějí elektrickou energii tím, že spalují velké množství fosilních paliv. V horizontu několika dekád tedy hrozí výrazný úbytek či nedostatek tohoto zdroje energie. Proto se v poslední době přechází na alternativní zdroje energie, jako jsou například větrné elektrárny, fotovoltaika, geotermální elektrárny, přílivové elektrárny, využití biomasy a jiné.

Větrné elektrárny představují čistý, ekologický zdroj energie, nicméně i toto řešení má svá negativa. Největším problémem využívání této energie je emitovaný hluk a jeho vliv na přilehlé okolí. Hluk, kterým se budu zabývat, je obtěžující zvuk, který negativně působí na lidský organismus či psychiku. Hluk může vyvolat tyto obtíže: poruchy spánku, bolesti hlavy, tlak v uších, závratě, nevolnost, rozmazané vidění či podrážděnost. Míra obtěžování vždy závisí na věku a pohlaví. Emitovaným hlukem jsou nejvíce zasaženy ženy a lidé pracující ve třísměnném provozu, také největší emitované hladiny se projevují v noci.

Z těchto důvodů bude tato bakalářská práce zaměřena právě na problematiku šíření hluku a jeho vlivu na lidský organismus. Nejprve budou uvedeny základní zákonitosti zvuku jako akustická rychlost, vlnový odpor, rychlost šíření zvuku. Dále bude zde definován hluk a obecné poznatky o šíření klimatickým prostředím, vliv počasí na šíření, vliv překážek, teplotní gradienty a vliv větru. V kapitole šíření hluku z větrných elektráren budou určeny zdroje emitovaného hluku, a to zdroje původu aerodynamického a zdroje mechanického. Následovat budou hygienické limity týkající se větrných elektráren v ČR a některých zemích EU. V kapitole vliv hluku na lidský organismus budou probrány nejčtenější obtíže spojené s větrnými elektrárnami. Poslední kapitola se bude zabývat konkrétní hlukovou studií na určeném místě a vyhodnocení simulace.

## 1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění, šířící se v prostředí plynném, pevném či kapalném. Celou touto problematikou vzniku, šíření a účinky se zabývá věda akustiky. Člověk je schopen vnímat rozsah frekvence zhruba od 16 Hz do 20 kHz. Avšak tato představa je subjektivní, protože každý jedinec má toto pásmo posunuté. Zvuk o frekvenci nižší než 16 Hz nazýváme infrazvukem a vnímají ho např. sloni. A naopak vyšší než 20 kHz je ultrazvuk slyšitelný pro psy. Ve společnosti má zvuk několik důležitých funkcí. Je to hlavní prostředek k dorozumívání mezi jedinci či skupinami. Prostředek k ohlášení nebezpečí (vznik požáru, bezpečný průjezd policejních či hasičských složek atd.). Také prostředek k relaxaci ve formě hudby. Může sloužit k hodnocení prostředí, ve kterém žijeme. [1]

### 1.1 Akustická rychlost

Částice vzduchu kmitá okolo své rovnovážné polohy a postupně předává svou energii další částici vedle ní. Tato energie se šíří ve formě vlnění, tedy přítomnost pružného media je nezbytná. Rychlost  $\vec{u}$  má směr pohybu kolmý k ploše šířící se akustické vlny. Jelikož tato rychlost  $\vec{u}$  má směr a velikost, považujeme ji za vektor. Akustická rychlost  $\vec{u}$  je právě rychlostí této částice (pozn. rychlost šíření zvuku  $c$  má jiný charakter a bude probrána v kapitole 1.3). [2]

$$\vec{u} = -\frac{1}{\rho} \int \frac{dp}{dr} dt, \quad (1)$$

kde:  $\rho$  ..... hustota prostředí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $p$  ..... tlak [Pa],  
 $r$  ..... směr pohybu částice.

### 1.2 Vlnový odpor

Vlnový odpor, taktéž impedance prostředí, nám říká, jak moc dobře či špatně se šíří zvuk. Poměr mezi akustickým tlakem  $p$  a akustickou rychlostí  $u$  je stálý, při postupném vlnění ve volném prostředí. Tento poměr je závislý pouze na charakteru prostředí. Např. pro vzduch při 20 °C o hustotě 1,21  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  platí, že vlnový odpor je roven 414  $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ . [1]

$$\frac{p}{u} = \rho_0 \cdot c = \text{konstanta} [\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}], \quad (2)$$

kde:  $\rho_0$  ..... hustota prostředí,  
 $c$  ..... rychlost šíření zvuku [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

### 1.3 Rychlost šíření zvuku

Na rozdíl od akustické rychlosti, která uvažuje jen rychlost elementárních částic  $u$ , rychlost zvuku řeší prostup vlnění prostředí jako celek. Rychlosti šíření zvuku se taktéž jen obecně říká „rychlost zvuku“ a je uvažována nejčastěji s teplotou  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato rychlost se ve většině případů se změnou teploty velmi málo mění. Pro prostředí vzduch je rychlost zvuku  $c = 343\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [1]

$$c = k \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}, \quad (3)$$

kde:  $k$  ..... konstanta,  
 $E$  ..... modul pružnosti prostředí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  
 $P$  ..... hustota prostředí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

### 1.4 Akustický tlak a stupnice pro měření hluku

Zvuková vlna při svém šíření vyvolává změnu tlaku a tato změna je zachycena člověkem ve formě zvuku. Akustický tlak je působení tlaku na membránu sluchového orgánu a lidský zdravý sluch je schopen zachytit hodnotu  $20\text{ }\mu\text{Pa}$  při  $1\text{ kHz}$ . Z této hodnoty se také vychází, jako z referenční vztažné hodnoty a nazýváme ji prahový akustický tlak. Při hodnocení síly zvuku musíme tedy vycházet z prahového akustického tlaku referenční hodnoty, jinak by každé hodnocení bylo zkreslené a nesouměrné.  $L_p$  hladinu akustického tlaku, nebo také SPL můžeme definovat vztahem:

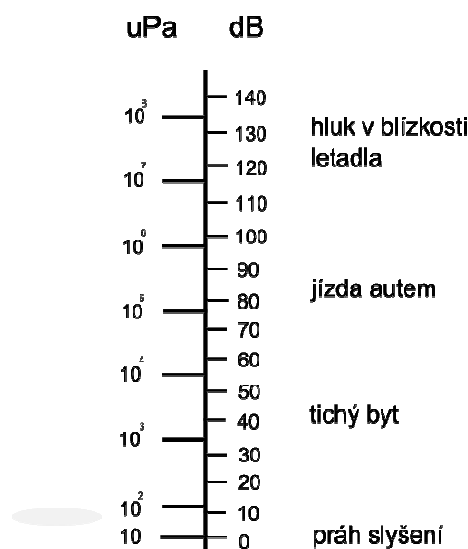
$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (4)$$

kde:  $L_p$  ..... hladina akustického tlaku [dB],  
 $p$  ..... sledovaný akustický tlak [Pa],  
 $p_0$  ..... referenční akustický tlak [Pa].

Zavádíme logaritmickou soustavu, které odpovídá při  $20\text{ }\mu\text{Pa}$  a  $1\text{ kHz}$   $0\text{ dB}$ . Kdybychom zvětšili tlak desetinásobně, hladina by vzrostla o  $20\text{ dB}$ . Přístup zavedením logaritmické stupnice se stupnicí v dB přináší lepší pohled a rozlišení jednotlivých hladin hluku než stupnice lineární v  $\mu\text{Pa}$ .

Jako příklad můžeme uvést porovnání tichého bytu a jízdu autem. V bytě bychom za určitých podmínek naměřily zhruba  $10^3\text{ }\mu\text{Pa}$ , tomu by odpovídalo  $30 - 40\text{ dB}$ , tuto hodnotu porovnáme s jízdou autem a zjistíme  $10^5\text{ }\mu\text{Pa}$ , tomu by odpovídalo  $70 - 80\text{ dB}$ . Z hlediska

vnímání člověka bychom řekli, že zvuk v autě se zvětšil zhruba dvakrát oproti bytu, ale tomu by neodpovídala stupnice v  $\mu\text{Pa}$ . Z obrázku 1 je patrné porovnání obou stupnic. [2]



Obr. 1 Hladina akustického tlaku v různém prostředí [2]

## 1.5 Způsob počítání s hladinami zvuku v dB

Pokud používáme k výpočtu veličiny, které jsou v jednotkách dB nelze je jednoduše sčítat. Například dva stejné zdroje o hladině zvuku 50 dB ve stejné oblasti nedají dohromady 100 dB, ale jen 53 dB. To je dáno tím, jak se počítá ekvivalentní hladina akustického tlaku. Výsledek bude určen okamžitým součtem dvou zdrojů, kdy  $p_1 = p_2$  je  $p^2 = 2 \cdot p_1^2$  a po dosazení do vzorečku pro výpočet hladiny akustického tlaku dostaneme: [1]

$$L_p = 10 \log \left( 2 \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) + 10 \log 2 = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) + 3 \quad (5)$$

kde:  $L_p$  ..... hladina akustického tlaku [dB],  
 $p$  ..... sledovaný akustický tlak [Pa],  
 $p_0$  ..... referenční akustický tlak [Pa].

Obecně platí, že působení dvou stejných zdrojů pro rozpoznání člověkem bude takřka nezatelné. Výpočet proběhne jen přidáním 3 dB k původní hladině. Působení 4 stejných zdrojů povede k zesílení o 6 dB atd.

## 1.6 Akustický výkon

Aby bylo možné srovnávat několik zvukových zdrojů, zavádíme akustický výkon  $P$ , nebo s označením  $W$ . Tato veličina udává nejdůležitější fyzikální vlastnost zdroje a není závislá na vnějších vlivech. Určení akustického výkonu lze dosáhnout měřením akustické intenzity, měřením akustického tlaku ve volném poli nebo měřením v dozvukové komoře. [2, 3]

$$W = \oint \vec{I} dS, \quad (6)$$

kde:  $W$  ..... akustický výkon [W],  
 $I$  ..... akustická intenzita [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  
 $S$  ..... plocha [ $\text{m}^2$ ].

## 1.7 Akustická intenzita

Tato veličina představuje energii vyzářenou v určitém bodě od zdroje a je vztažena k vlnové ploše v bodě. Akustická intenzita je vektorová veličina a proto znázorňuje kromě velikosti energie i její směr působení. Lze ji definovat vztahem: [2, 3]

$$\vec{I} = \frac{W}{S} = p \cdot \vec{u}, \quad (7)$$

kde:  $I$  ..... akustická intenzita [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  
 $W$  ..... akustický výkon [W],  
 $p$  ..... sledovaný akustický tlak [Pa],  
 $u$  ..... akustická rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $S$  ..... plocha [ $\text{m}^2$ ].

## 2 Hluk

Při hodnocení prostředí, ve kterém žijeme, hodnotíme také zvukové znečištění. To znamená, jak moc je prostředí kolem nás hlučné a jak zatěžuje kvalitu života. Tyto hladiny hluku by měly být v blízkosti obydlí nižší z důvodu zdraví. V této kapitole se budeme zabývat možnými obecnými zdroji hluku a vlivy na jejich šíření. [4]

### 2.1 Obecné zdroje hluku

Nejjednodušším zdrojem je bodový zdroj tzv. zdroj nultého řádu. Uvažujeme-li, že zdrojem bude koule velmi malých rozměrů (bod), dostaneme právě takovýto zdroj. Zvuk se šíří všemi směry rovnoměrně ve tvaru soustředných koulí a intenzita klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje. Pokud zvětšíme vzdálenost dvakrát, intenzita klesne na jednu čtvrtinu. [1]

Bodový zdroj prvního řádu tzv. akustický dipól. Jedná se např. o tuhou kouli, která kmitá v jedné rovině, nebo dvě pružné koule kmitající v protifázi.

Liniový zdroj (přímkový) představuje řadu zdrojů spojených za sebou. Může se jednat o projíždějící vlak nebo o dálnici s hustým provozem. Zde zvuk se vzdáleností neklesá kvadraticky, ale lineárně. To je problém s hlukem okolo dálnic či železniční traktce.

Plošný akustický zdroj je tvořen například kmitající rozměrnou deskou. Tento zdroj ve směru vyzařování vytváří rovné vlnoplochy, které se šíří pouze jedním směrem.

### 2.2 Šíření zvuku v klimatických podmínkách

Pro popis se používá Eulerova vlnová rovnice zvukových jevů v čase a prostoru. Je zavedena pro pravoúhlý souřadný systém ve tvaru:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (8)$$

kde:  $x, y, z$  ..... souřadnice [m],  
 $t$  ..... čas [t],  
 $c$  ..... rychlost zvuku v daném prostředí [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Pro zjednodušení dále budeme uvažovat jednorozměrné šíření zvuku ve směru  $x$ . Za tlak  $p$  dosadíme rychlost kmitání částic  $u$  ze vztahu:  $\frac{p}{u} = \rho \cdot c$  tedy  $u = \frac{p}{\rho \cdot c}$ . Po dosazení a zjednodušení dostáváme rovnici:



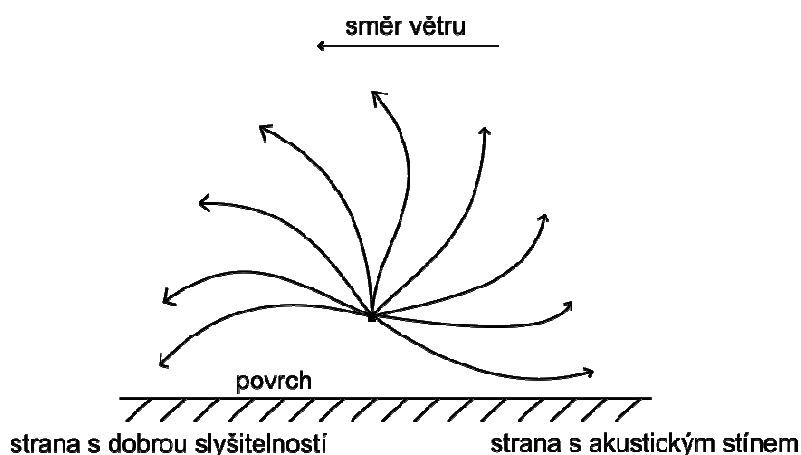
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho_h}{E} \cdot \frac{\partial^2 p}{dt^2} \quad (9)$$

kde:  $E$  ..... modul pružnosti v tahu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  
 $\rho_h$  ..... měrná hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Vliv klimatických podmínek má značný dopad na šíření hluku. Směr a rychlost větru například značně ovlivňuje velikost paprsků zvuku, také atmosféra funguje jako nízkofrekvenční propustný filtr. Dále viskozita a vlhkost prostředí způsobují zeslabování vlnění. V neposlední řadě také turbulence, teplotní gradienty atd. [2]

### 2.3 Útlum vlivem větru

V atmosféře proudí neustále masa částic vzduchu, která značně ovlivňuje šíření. Může působit na oblasti s akustickým stínem, nebo také na oblasti s dobrou slyšitelností. Obě tyto situace znázorňuje obrázek 2. Pokud zdroj šíření působí proti větru, na té straně pozorovatel vnímá zeslabený zvuk. Děje se tak proto, že se v této oblasti vytváří buď částečný, nebo úplný akustický stín. Naopak oblast s dobrou slyšitelností leží po větru zdroje zvuku. To také může znamenat, že pokud bude obydlí ležet po větru od VtE a přitom dostatečně daleko, obyvatelé budou vystaveni zvýšené intenzitě hluku. To je dáno tím, že s rychlostí větru se mění zisk/útlum hluku zhruba o tolik dB/100m, o kolik desítek m/s je změněna rychlost vzduchu (např. pro 15 m/s uvažujeme asi 1,5 dB/100m). [2]

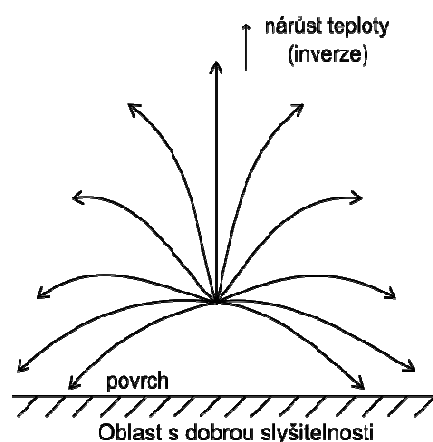
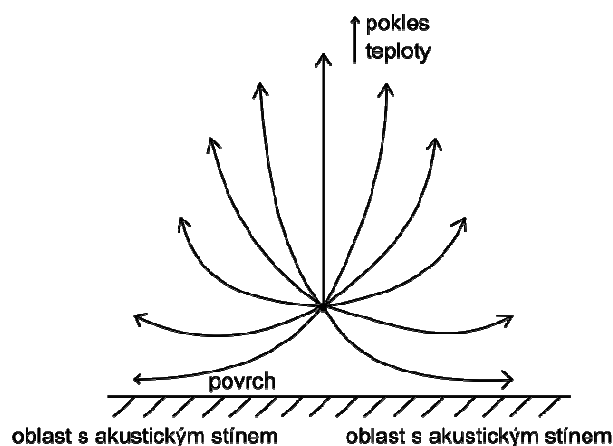


Obr. 2 Útlum vlivem větru [2]

### 2.4 Útlum vlivem teplotních gradientů

S rostoucí teplotou rychlost zvuku mírně stoupá a také s nadmořskou výškou teplota klesá, to ovlivňuje chování šíření hluku. Pokud budeme uvažovat konstantní vítr, dojdeme k situaci ohýbání siločar směrem vzhůru, jak je patrné z obrázku 3. Také zde pozorujeme oblasti akustického stínu. Naproti tomu inverze způsobuje jev opačný. Tedy se stoupající

nadmořskou výškou stoupá teplota a ta zapříčiní částečný ohyb směrem k zemi. Celá tato situace je znázorněna na obrázku 4. U inverze v oblastech s dobrou slyšitelností pozorovatel vnímá zřetelný zvuk zdroje. [2]



Obr. 3 Vliv poklesu teploty na šíření zvuku [2]

Obr. 4 Vliv nárůstu teploty na šíření zvuku [2]

## 2.5 Útlum vlivem překážky

Postavíme-li pozorovatele za překážku, jeho vnímání zvuku bude zmenšeno vlivem ohybu zvuku za překážkou. Buď se jedná o jednostranný ohyb, například protihluková stěna, nebo o případ dvoustranného ohybu (Huygensův princip). Příkladem může být pozorovatel stojící za stavením. Obecně těsně za překážkou dochází k vytvoření akustického stínu. V akustice platí, že čím větší frekvence vlnění, tím hůře se vlna ohýbá. Obecně u VtE lze říci, že sledovaný zvuk je ve frekvenčním pásmu v 0 - 1000 Hz a tedy se bude dobře šířit za překážky. [3]

## 2.6 Útlum vlivem průchodu překážkou

Šířící se vlnění dopadá na překážku s otvorem a podle tvaru otvoru je dál vlna šířena. Pokud štěrbinu má kruhový tvar, bude za překážkou vnímána jako zdroj nultého řádu (bodový zdroj). Avšak jedná-li se o tvar obdélníkový, například pootevřené okno v bytě, přenesou se zvuk za překážku jako liniový zdroj. V obou popisovaných případech bude průchod zvuku značně utlumen. [3]

## 2.7 Vliv počasí a denní doby

Také je známo, že zvuky o nízkých frekvencích se v prostředí šíří lépe než zvuky o vysokých frekvencích. Například zvuk o frekvenci 500 Hz bude mít zhruba útlum 0,1 dB/100 m, naopak frekvence 10 000 Hz má 10 dB/100 m (to vše při relativní vlhkosti

50%). Na šíření hluku má také značný vliv počasí. V případě deště, mlhy a nebo vánice, dochází k dvojnásobnému útlumu zvuku oproti prostředí, ve kterém se tyto vlivy nevyskytují (vycházíme z předešlého příkladu 500 Hz 0,2 dB/100 m a 10 000 Hz 20 dB/100 m). Patrně v určitou dobu lze vysledovat jiné intenzity hluku na sledovaném místě, než v době na tom samém místě před několika hodinami. To je dáno tím, jak se mění atmosférické teploty, a jak moc se uplatňují teplotní gradienty viz. kapitola 2.4 Útlum vlivem teplotních gradientů. [2]

## 2.8 Šíření zvuku prostředím

Bude-li se zvuk šířit mezi překážkami například v zastavěném území obce, lze říci, že zvuk o frekvencích řádově kHz se bude šířit hůře než zvuk o nižším kmitočtu. To je dáno vlnovou délkou sledovaného zvuku. Pokud bude vlnová délka větší než velikost předmětu bránící průchodu vlnoplochy, zvuk se ohne a projde dále za překážku téměř netlumen. Naproti tomu pokud bude vlnová délka zvuku mít nižší rozměr než je velikost překážky, bude značně utlumen. Ve vztahu k větrným elektrárnám se vyskytuje hluk o nižších kmitočtech (řádově stovky Hz), můžeme předpokládat, že se hluk bude šířit takřka bez tlumení na velké vzdálenosti. Pokud bychom měli pootevřené okno (cca 30 cm), tomu by odpovídala frekvence 1000 Hz, zjistíme, že se za překážkou budou dobře šířit zvuky o nižších frekvencích než právě zmiňovaných 1000 Hz. [2, 3]

Také pohltivost prostředí má značný vliv na šíření zvuku prostředím. Akustické vlnění dopadající na povrch bude po odrazu značně utlumen, tedy energie dopadu se nebude rovnat energii odrazu. Tento jev lze kvantifikovat pomocí činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ , nebo činitelem zvukové odrazivosti  $\beta$ . Pojem akustické zrcadlo, se používá při označení povrchu nepohltivého, tedy činitel zvukové pohltivosti se blíží 0. Naproti tomu povrch, který má hodnotu vyšší (v intervalu 0 až 1), nazýváme pohltivý (například bezodrazová komora). [2, 3]

$$\alpha = \frac{W_{\text{pohlčená}}}{W_{\text{celková}}}, \quad (10)$$

kde:  $\alpha$  ..... činitel zvukové pohltivosti,  
 $W_{\text{pohlčená}}$  .. akustický výkon [W],  
 $W_{\text{celková}}$  .... akustický výkon [W].

$$\beta = 1 - \alpha, \quad (11)$$

kde:  $\beta$  ..... činitel zvukové odrazivosti.

### 3 Šíření hluku z větrných elektráren

Konstrukce těchto elektráren má přímý vliv na intenzitu emitovaného hluku. Starší typy dosahují velikosti přibližně 40 m, mají tedy menší délku listů než modernější VtE s výškou až 140 m. Menší délka listu zapříčiní menší turbulenci a tedy i menší hluk. Také strojovna a převodovka jsou menší oproti modernějším větším větrným elektrárnám. Toto má v dnešní době velký vliv na prostředí okolo těchto větrných farem. Hluk z větrných elektráren lze rozdělit na širokopásmový, impulzní, nízkofrekvenční (1 - 200 Hz) a hluk s tónovými složkami, původu mechanického nebo aerodynamického. V případě VtE se nebude jednat o bodový zdroj, a tedy emitované vlnoplochy nebudou mít kulovitý tvar, ale budou ve tvaru kuželovitého. Vrchol kužele bude mít počátek ve zdrojovém místě hluků, což je především gondola a míjení lopatek se stožárem. Toto je dáno tím, jak větrná elektrárna funguje, tedy vítr pohání listy rotoru, a také unáší vlnoplochy směrem jeho proudění. Jinými slovy tok větru formuje zdroj právě do tvaru vyzařování komolého kužele. Proto pozorovatel bude v těsné blízkosti vystaven mnohem menší hladině akustického tlaku, než v bodě před vlnoplochou. [4]

#### 3.1 Aerodynamický zdroj hluku

Právě u moderních typů větrných elektráren je aerodynamický zdroj dominantní složkou hluku a s rostoucí výškou stoupá jeho vliv. Vzniká na základě obtékání vzduchu kolem listů rotoru a turbulentních vírů za rotorem. Takto vznikající hluk má širokopásmový charakter 500 až 1 000 Hz. Pozorovatel je vnímá jako hučení. K tomuto hluku se amplitudově moduluje další složka signálu tvořená frekvencí míjení lopatek se stožárem o frekvenci 1 až 2 Hz (nízkofrekvenční signál). Výsledek amplitudově modulovaného hluku je vnímám jako svištění, které obyvatelé v okolí větrných elektráren vnímají nejvíce. [4]

#### 3.2 Mechanický zdroj hluku

U tohoto typu šíření hluku došlo v průběhu let ke značnému snížení emitovaného hluku pod úroveň aerodynamického hluku, protože části s největším podílem na zvukovém znečištění byly nahrazeny, nebo za použití moderních technologií upraveny. To vše mělo za následek, že u mechanického zdroje hluku s výškou větrné elektrárny nestoupá množství emitovaného hluku. Zdroj tohoto původu vzniká nejčastěji v gondole ve strojovně, působením mechanických součástí např.: převodovka, generátor, servomotory k natáčení gondoly a chladicí ventilátory. Takto vznikající hluk se může šířit dvěma způsoby a) přímo do okolí větrné elektrárny tzv. "air borne", nebo za b) do jiných částí větrné elektrárny, které se pak

chovají jako zdroj hluku např.: plášť gondoly tzv. "structure borne". Avšak v dnešní době, jsou převodovky nahrazeny planetovou převodovkou, nebo nejsou instalovány vůbec. Tímto krokem se snížil mechanický hluk nejvíce. Regulace otáček je zajištěna natáčením gondoly proti větru, nebo částečným natočením a tím se snižuje účinnost lopatek. Také je možnost natáčení samotných lopatek rotoru. [4]

### 3.3 Srovnání intenzit hluků

Jak už bylo řečeno v předešlé kapitole, hluk se z VtE šíří přímo, nebo konstrukcí. V tabulce 1 jsou uvedeny základní části strojovny, jejich intenzity a cesty šíření. Přímou cestou šíření se rozumí taková cesta, která vede od zdroje k obydlí. Nepřímá cesta je taková cesta, která napřed musí projít pláštěm gondoly či ochranným krytem a až poté vede k obydlí. [4]

Tab. 1 Přehled intenzit hluků částí strojovny [4]

Zdroj hluku	$L_{WA}$ [dB]	přenosová cesta
Aerodynamický hluk	92,2	Přímá
Náboj	89,2	Přímá
Lopatky	91,2	Přímá
Tubus	71,2	Nepřímá
Převodovka	97,2	Nepřímá
Převodovka	84,2	Přímá
Generátor	87,2	Přímá
Další komponenty	76,2	Přímá

## 4 Hygienické limity týkající se VtE

Hygienické limity vycházejí z doporučení WHO „The World Health Organization“ (Světové zdravotnické organizace) a lze nalézt v zemích EU tři typy přístupu hodnocení hlukových limitů. [6]

- 1) stanovení limitu jedním číslem, jedná se o nejrozšířenější systém v členských zemích EU
- 2) stanovení limitu v závislosti na rychlosti větru tzv. vícečíselné hodnocení
- 3) hlukový limit je odvozena od hluku pozadí a v čase se mění

### 4.1 Hygienické limity v České Republice

Veškeré hygienické limity o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací jsou obsaženy v nařízení vlády č. 272 / 2011 Sb. Hlukový limit lze sledovat ve venkovním prostoru budov a ve vnitřním prostoru budov. Další členění je na denní dobu od 6:00 do 22:00 a dobu noční od 22:00 do 6:00. Údaje o hodnotách limitů stanovené ve ekvivalentních hladinách akustického tlaku  $L_{Aeq,T}$  jsou obsaženy v tabulce 2. [9]

Tab. 2 Přehled intenzit hluků v chráněném prostoru [9]

Chráněný prostor	Denní doba	$L_{Aeq}$ [dB]
Venkovní prostor	6:00-22:00	50
	22:00-6:00	40
Vnitřní prostor	6:00-22:00	40
	22:00-6:00	30

Vzdálenostní limity VtE od obydlí zákon v České Republice nestanovuje. Pouze stavební úřad v dané lokalitě může nařídit minimální vzdálenost stavebního díla od obydlí. Takovéto nařízení vydává na základě environmentálních studií v příslušné lokalitě.

### 4.2 Hygienické limity v zemích EU

V tabulce 3 lze vidět hygienické limity některých států EU. Největší toleranci hluků připouští Francie a to 62 dB. Naopak nepřísňější zvukový limit je v Nizozemí, jehož hodnota je srovnatelná s hodnotou limitu v České Republice. Taktéž v mnoha zemích EU se nestanovuje zákonem vzdálenostní limit VtE od obydlí, ale funguje na bázi doporučených vzdálenostech. V posledních letech se například Velká Británie snaží o vytvoření zákona, který jasně stanoví vzdálenostní limit od obydlí za určitých podmínek prostředí a terénu. [10]

Tab. 3 Přehled intenzit hluků některých zemí EU [10]

<b>Země EU</b>	<b>L<sub>Aeq</sub> [dB]</b>
Francie	62
Německo	49
Španělsko	45
Nizozemí	40
Rakousko	50
Švédsko	50
Velká Británie	45

## 5 Vliv hluku na lidský organizmus

V dnešní době je hluk nedílnou součástí našich životů, ať už je způsoben výstavbou nových silnic a dálnic, zvětšením hustoty dopravy letecké nebo automobilové, či budováním větrných farem. Tyto nadměrné zvuky zatěžují nejenom sluchový aparát, ale také celkově lidský organizmus. To může vést k poruchám spánku, Tinnitu nebo-li pískání v uších, závratím, nevolnostem, tachykardii, nespavosti, podráždění atd. [7]

### 5.1 Vnímání zvuku

Nejvíce zatěžovaná část těla, co se zvuku týká, je ucho. Sluchové ústrojí se skládá z periferní části, což je zevní, střední, vnitřní ucho a sluchově-rovnovážný nerv a dále z centrální části. Ta obsahuje sluchovou a rovnovážnou dráhu s příslušnými centry. Celé toto ústrojí v podstatě převádí mechanické kmitání na soubor vjemů, které dále interpretuje mozků jako zvuk. Sluchový orgán taktéž obsahuje rozpoznávání rovnováhy. Rovnovážný orgán zaznamenává pohyby hlavou, potažmo pohyby celého těla.

Nejen rovnovážné ústrojí ve sluchovém orgánu rozpoznává polohu či pohyb těla. Ale také svaly po celém těle, které obsahují napínací receptory, které dokážou identifikovat zrychlení, potažmo tlakové receptory v hrudníku a v břiše. Tento systém vjemů slouží především k určování polohy a pohybu v prostoru, avšak dokáže také vnímat vibrace (zvuk) přicházející z okolí prostupující tělem. [7, 8]

### 5.2 Hluk a zdraví

Specifickým projevem nadměrného hluku je špatná činnost sluchového orgánu, naopak nespecifický projev ukazuje na poruchy ostatních funkcí lidského těla.

Tinnitus je specifický projev poruchy sluchového orgánu, který zapříčiňuje ušní šelest. V podstatě člověk slyší zvuk, který není fyzicky uskutečňován, ale příčina této poruchy může být způsobena prostředím a neustálým vystavením rušivému zvuku (pozn.: nemusí se jednat o nadměrný hluk). Osoba postižená touto nemocí vnímá pískání, šumění či syčení na základě chybného zpracování.

Další nemocí může být nedoslýchavost a snížení prahu citlivosti ucha. To je problém celé populace, protože pokud bychom si porovnali člověka z vyspělé země některého státu Evropy a člověka z některého afrického kmene zjistíme, že sluch Evropana ve 35 letech je srovnatelný se sluchem Afričana v 85 letech. Příčina tkví v každodenním přetěžování sluchového aparátu a to vede ke snížení celkové citlivosti vnímaného zvuku. Nedoslýchavost může také zapříčinit únavu CNS (centrální nervové soustavy) a snahu se přizpůsobit okolí.



Člověk považuje 20 dB za hluboké ticho, 30 dB už vnímáme jako ticho s hlukem nevýznamným v pozadí. Toto pozadí mozek interpretuje tak, že příjemné či zajímavé zvuky zesílí a ty rušivé se snaží potlačit. Pokud ale bude VtE působit dlouhodobě na člověka, a to i když se dodrží hygienické limity, tak se CNS unaví neustálým potlačováním rušivého pozadí (hučení způsobeno míjením lopatek se stožárem, nebo turbulentním hlukem lopatek). Všechny tyto okolnosti mohou zapříčinit snížení prahu citlivosti nebo psychologické projevy.

Nespecifickým projevem je závrať, způsobená zvukem prostupujícím tělem, která při určitých frekvencích významně ovlivňuje rovnovážné ústrojí. Pokus, kdy se ke spánkové kosti přiloží rozvibrovaná tyč zhruba okolo 100 Hz, prokázal, že právě tato frekvence dokáže významně stimulovat rovnovážné ústrojí ve sluchovém orgánu. Tento způsob stimulace je prováděn s mnohem menší energií, než kdybychom chtěli dosáhnout stejného efektu přes sluchový orgán (přenos vzduchem). Člověk pak má pocit, že se pohybuje a trpí závratěmi, jako je tomu u mořské nemoci. Avšak toto vnímání není vztaženo jen na rovnovážné ústrojí, ale také na celé tělo viz kapitola 5.1 Vnímání zvuku.

Působení hluku o nízkých frekvencích dokáže způsobit tachykardii, což je zrychlení tepové frekvence, nebo ischemickou chorobu srdeční. Ischemická choroba srdeční vzniká při nedokrvení srdečního svalu (bolest na hrudi).

Následkem hluku může být i narušení spánkového režimu, čímž tímto trpí nejvíce lidé pracující na směny a ženy. Při spánkové depresi je člověk nedostatečně soustředěný, podrážděný a to vede k psychologickým projevům.

Ostatními projevy hluku na lidský organizmus mohou být například narušení biochemických reakcí, ovlivnění vyšších nervových funkcí, anebo špatné fungování neurohumorální a neurovegetativní regulace. [7, 8]

### 5.3 Psychologické projevy

Psychologické obtíže jsou sekundárním projevem stavu člověka, způsobené nespecifickými chorobami jako je např. spánková deprese, celková únava CNS, závratě a jiné. Nedostatek spánku vede k obtížím se soustředěním, které se mohou projevit například chybami v zaměstnání. Celá situace může vyvrcholit i depresemi, podrážděností, nebo změnami nálad. Vždy bude záležet na zvukovém pozadí a na tom, co právě jedinec vykonává. Lze tedy sledovat rozmrzelost při neustálém rušení ze soustředěného stavu obtěžujícím zvukem. Pokud tento stav přetrvává, jedinec začne být odtažitý vůči společnosti, bude se u něj projevovat vztek, pocit nespokojenosti či naprostého vyčerpání.

Pokud se v blízkosti rušivého pozadí nachází člověk s nějakým druhem duševní nemoci, může tato zátěž napomoci k rozvoji dané choroby. [7]

#### 5.4 Syndrom větrných elektráren

Syndrom větrných elektráren seskupuje nemoci a negativní jevy, které se vyskytují u lidí, kteří jsou vystaveni hluku z větrných elektráren. Hlavním problémem je přímý vliv na vnímání pohybu receptory v lidském těle. Tyto pohybové receptory obsažené například ve svalech a kostech, jsou působením hluku oklamány a vysílají signál o pohybu do mozku. Tedy jedinec při klidné poloze vnímá pohyb vyvolaný právě tímto klamným signálem způsobený hlukem.

Tento jev definovala Nina Pierpont, MD, PhD na základě studie 10ti rodin bydlících v blízkosti VtE s výkony od 1,5 MW až 3 MW, seskupila negativních projevů na lidský organismus: [8]

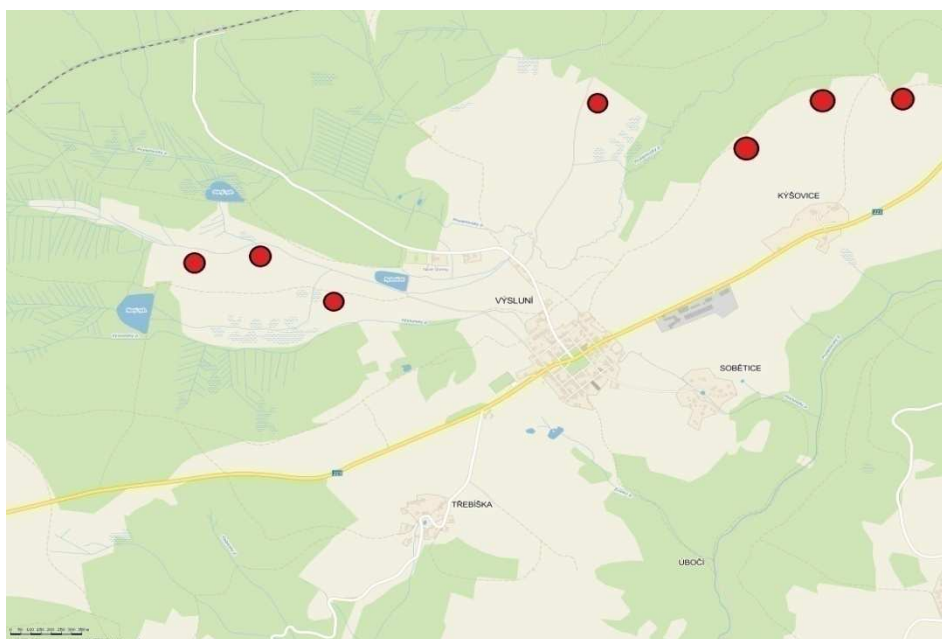
- Poruchy spánku
- Bolesti hlavy
- Tinnitus
- Tlak v uších
- Závratě
- Vertigo
- Nevolnost
- Rozmazané vidění
- Tachykardie
- Podrážděnost
- Problémy se soustředěním a pamětí
- Panické ataky spojené s pocitem vnitřní pulzace nebo třesu

Pokud by tento syndrom byl brán na vědomí lékařskou komorou, došlo by k rychlejšímu a efektivnějšímu diagnostikování pacientů, kteří trpí některým z výše popsaných jevů či obtíží. Tím by se zabránilo vzniku dalších negativních projevů a proces léčby by se značně urychlil.

## 6 Simulace šíření hluku ve vybrané oblasti

V rámci praktické části bakalářské práce byla provedena simulace v konkrétní oblasti, a to v obci Výsluní u Chomutova.

Roku 2007 započal projekt s názvem “Větrný park Chomutov“, který má za cíl vystavět v Krušných horách kolem 200 větrných elektráren. Vzhledem k velikosti projektu se rozdělil na samostatné větrné farmy, které jsou samostatně posuzovány. Z uvažovaných oblastí právě v obci Výsluní by mělo být postaveno 9 až 15 větrných elektráren, z toho 7 v bezprostřední blízkosti obce. Jedná se o elektrárny typu VESTAS V 90, 2 MW, které jsou blíže popsány v kapitole 6.2. Konkrétní rozmístění větrných elektráren v obci je zakresleno na obrázku 5. Občané Výsluní s výstavbou větrného parku nesouhlasí. Jedním z důvodů je právě šíření hluku a jeho vliv na obyvatelstvo přilehlého okolí. Proto byla v této oblasti provedena zkušební simulace šíření hluku. Při níž jde především o dodržení hygienických limitů hluku. [12]



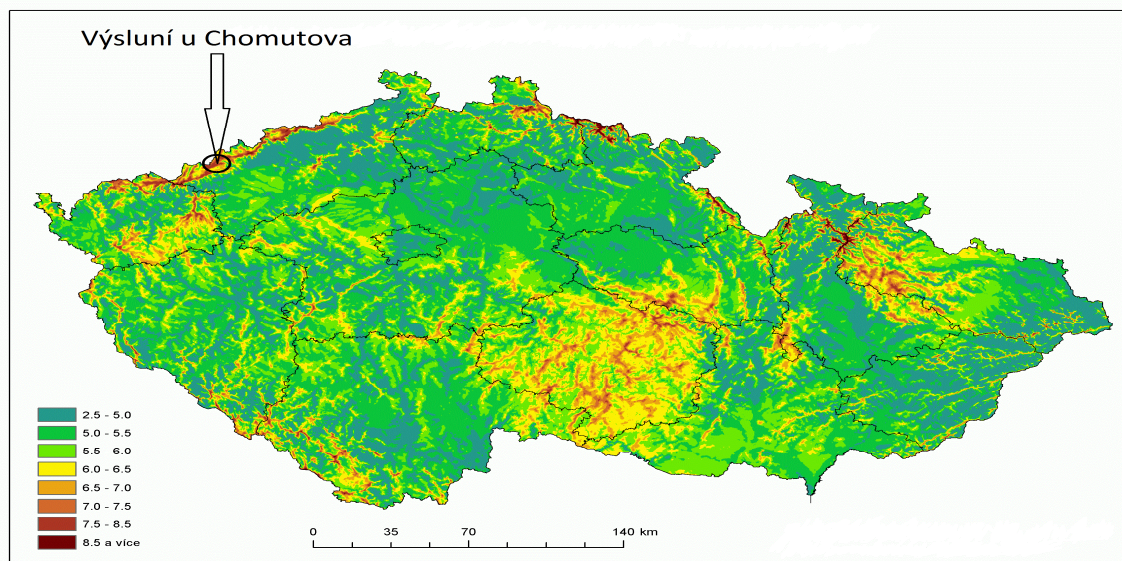
Obr. 5 Rozmístění VtE v obci Výsluní a přilehlého okolí [12]

### 6.1 Obec Výsluní u Chomutova

Obec Výsluní se nachází v Ústeckém kraji, nedaleko města Chomutov, kde se rozprostírá po náhorní planině Krušných hor. Počet obyvatel je poměrně nízký, k 28. srpnu 2006 činil pouhých 219 občanů. K Výsluní náleží také několik menších obcí, které se nacházejí v jeho bezprostřední blízkosti. Jedná se o obce Kyšovice, Sobětky, Třebíška a Volyně u Výsluní.

Jelikož se Výsluní nachází v nadmořské výšce 740-783 m.n.m. je v této oblasti velký

potenciál pro využití větrné energie. Oblasti, které jsou pro toto využití vhodné, jsou znázorněny v mapě České republiky na obrázku 6.



Obr. 6 Průměrná rychlost větru ve výšce 100 m nad povrchem [14]

## 6.2 Větrná elektrárna VESTAS V 90, 2 MW

Tento typ větrné elektrárny se skládá ze tří lopatek, gondoly a tubusu. Svoji konstrukcí odpovídá moderním vysokým větrným elektrárnám a celá konstrukce je upevněna k betonové základně. Lopatky elektrárny jsou plně polohovatelné, aby bylo možné účinně měnit pracovní plochu lopatek. Větrná elektrárna je řízena automaticky počítačem. Spouštěcí rychlost větru je okolo 3 m/s a při rychlosti větru vyšší než 25 m/s se elektrárna zastaví z důvodu možného zničení. Po vypnutí se gondola natočí čelem k větru a lopatky uvede do vlajkové polohy. Další podrobné informace o technických parametrech jsou v tabulce 4. [11]

Tab. 4 Technické parametry VESTAS V 90, 2 MW [11]

Jmenovitý výkon	2 MW
Výška věže	105 m
Rotor	průměr 90 m
List rotoru	45 m
Výška celková	150 m
Regulace naklání listu rotoru	aktivní
Počet otáček rotoru	variabilní, v rozsahu 9-19 ot/min
Plocha rotoru	6 326 m <sup>2</sup>
Výroba el. Energie	od 4 m/s
Jmenovitá rychlost větru	14 m/s
Vypínací rychlost větru	25 m/s
Plný jmenovitý výkon	v rozmezí 14-23 m/s
Generátor	Asynchronní
Provozní rozsah teplot	od - 20 °C do + 40 °C

Tento typ větrné elektrárny umožňuje redukcí výkonu tak, aby došlo ke snížení emisí hluku. VESTAS V 90, 2 MW disponuje třemi módy, mód 0 provoz bez omezení a módy 1 a 2 s omezením výkonu. Tabulka 5 obsahuje informace o rychlosti větru, elektrický výkon a k tomu emitovaný hluk. Z těchto hodnot byla provedena simulace ve vybrané oblasti při nejhorší možné situaci mód 0 při rychlosti větru 9 m/s a mód 2 při rychlosti větru 6 m/s, kdy očekáváme dodržení limitů. [12]

Tab. 5 Přehled módů a redukcí výkonů [12]

VESTAS 90 V, 2 MW		v (m/s)				
		6	7	8	9	10
MOD 0	Akustický výkon Lwa [dB]	102.5	103.2	102.8	101.8	
	Elektrický výkon P[MW]	1.135	1.625	1.951	2.007	
MOD 1	Akustický výkon Lwa [dB]	100.4	102.2	102.0	101.2	101.2
	Elektrický výkon P[MW]	1.039	1.594	1.928	2.002	2.005
MOD 2	Akustický výkon Lwa [dB]	98.6	99.9	100.8	101.1	101.0
	Elektrický výkon P[MW]	1.039	1.371	1.751	1.962	2.005

### 6.3 Program Hluk +

Program Hluk+ umožňuje nasimulovat konkrétní situaci ve venkovním prostoru pomocí objektového programování. Původně byl tento software navržen pro řešení hlukových situací silniční dopravy. V novějších verzích přibýlo i vkládání průmyslových zdrojů. Dále program od verze 7 pracuje pod OS Windows. Na trhu se lze setkat se třemi variantami tohoto programu - Basic, Normal a Profi. Každá verze má odlišné vlastnosti a od nich se odvíjí pořizovací cena programu. Všechny varianty však obsahují výpočty podle Novely 2004. Software se aktualizuje automaticky, ale je nutné připojení k internetu. Dále verze Normal a Profi umožňuje optimalizaci návrhu protihlukové clony a výpočet průmyslových zdrojů v oktávových pásmech podle ČSN ISO 9613-2.

Simulaci lze zhotovit vkládáním jednotlivých objektů na pracovní plochu a poté stačí spustit výpočet s předem nastavenými parametry. Pro přesnější vkládání objektů se využívá mapový podklad, na který se následně zakresluje simulovaná situace. Vkládat lze objekty jako například domy, lesy či místní komunikace. Jednotlivé objekty jsou číslovány od jedné až do maximálního počtu. Maximální počet objektů, které lze do mapy vložit, je dán verzí programu. Pokud uživatel vymaže nějaký z objektů, zůstane po něm v souboru prázdné místo. Lze využít funkci tzv. přečíslování, čímž dojde k novému očíslování objektů a dosažení přehlednosti. Za pomoci vrstevnic lze libovolně upravovat terén, aby simulace byla co nejpřesnější. Před každým spuštěním simulačního výpočtu program kontroluje, zda jsou

objekty správně vloženy. Pokud by se některé objekty překrývaly, systém zahlásí chybu a daný objekt vyznačí.

Do mapy lze umístit jednotlivé měřící body a zjistit pro ně konkrétní naměřené hodnoty. Tyto body lze zadat libovolně do prostoru či je připnout například k fasádě vybraného domu. Hodnoty, naměřené v jednotlivých bodech, lze přehledně vygenerovat do tabulky.

Další výhodou programu je schopnost znázornit výsledky graficky pomocí zobrazení izofon (pásma o stejné intenzitě) a tyto pásma barevně odlišit. Je nutné zadat parametr pro výpočet izofon, což je výška, ve které sledujeme hodnoty hluku. Pásma lze také názorněji zobrazit v decibelech  $L_{Aeq}$  s barevnou výplní. Právě toto zobrazení bylo využito v práci.

Program Hluk+ obsahuje mnoho dalších pomocných funkcí. Jednou z nich je možnost návrhu protihlukové clony. Tento návrh může být použit pro výpočet finanční náročnosti a je vázán zákonem č. 258/2000 Sb, o ochraně zdraví. Další funkcí je funkce čtyř oken. Ta je vhodná pro porovnání stejných situací s různými parametry. Pracovní plochu rozdělí na čtyři stejně velké části, kde je pouze jedna zvolená část aktivní. Velmi užitečná je také funkce 3D zobrazení, která umožňuje přehledné zobrazení celé situace.

Program Hluk+ umožňuje veškeré výsledky exportovat do MS Exelu, Wordu nebo přímo tisknout veškeré grafické či tabelární hodnoty. Pro vypracování simulace v této bakalářské práci byla použita profi verze programu Hluk+ číslo 10. [13]

## 6.4 Zkušební simulace

Aby bylo možné ze simulace v obci Výsluní vyvozovat určité závěry, bylo nezbytné nejprve provést simulaci zkušební. Zkušební simulace vznikne na základě porovnání reálně naměřených hodnot v blízkosti konkrétní větrné elektrárny a hodnot vzniklých simulací v programu Hluk+. Reálně hodnoty byly naměřeny v osadě Nová Víška, v jejíž blízkosti se nachází větrné elektrárny typu E-82, 2000kW. Měření bylo uskutečněno v březnu roku 2013 digitálním hlukoměrem SL-400 VOLTCRAFT a anemometrem s teploměrem a vlhkoměrem model 45158 EXTECH. Všechna skutečně naměřená data jsou uvedena v příloze E. Tyto hodnoty pro srovnání se zkušební simulací poskytl pan Václav Darink z občanského sdružení Krušno.

Při simulaci v programu Hluk+ byly nejprve použity emisní hladiny hluku stanovené výrobcem a posléze experimentálně upravené, pro zjištění skutečného stavu. Simulací bylo zjištěno, že hodnoty udávané výrobcem (10 m/s, 103,5 dB) způsobují v měřené oblasti 36,5 dB v měřícím bodě 1 a 38,5 dB v měřícím bodě 2. Měřící bod 2 je umístěn v bodě, který

je shodný s bodem skutečného měření a celou situace je znázorněna na obrázku v příloze F. Aby bylo dosaženo největší naměřené hladiny hluku, byla provedena korekce průmyslového zdroje na hodnotu 122 dB. Průměrná naměřená skutečná hodnota byla 56,8 dB, jedná se o případ kdy hluk překročil limit 50 dB. Nasimulovaná data jsou uvedena v tabulce 6.

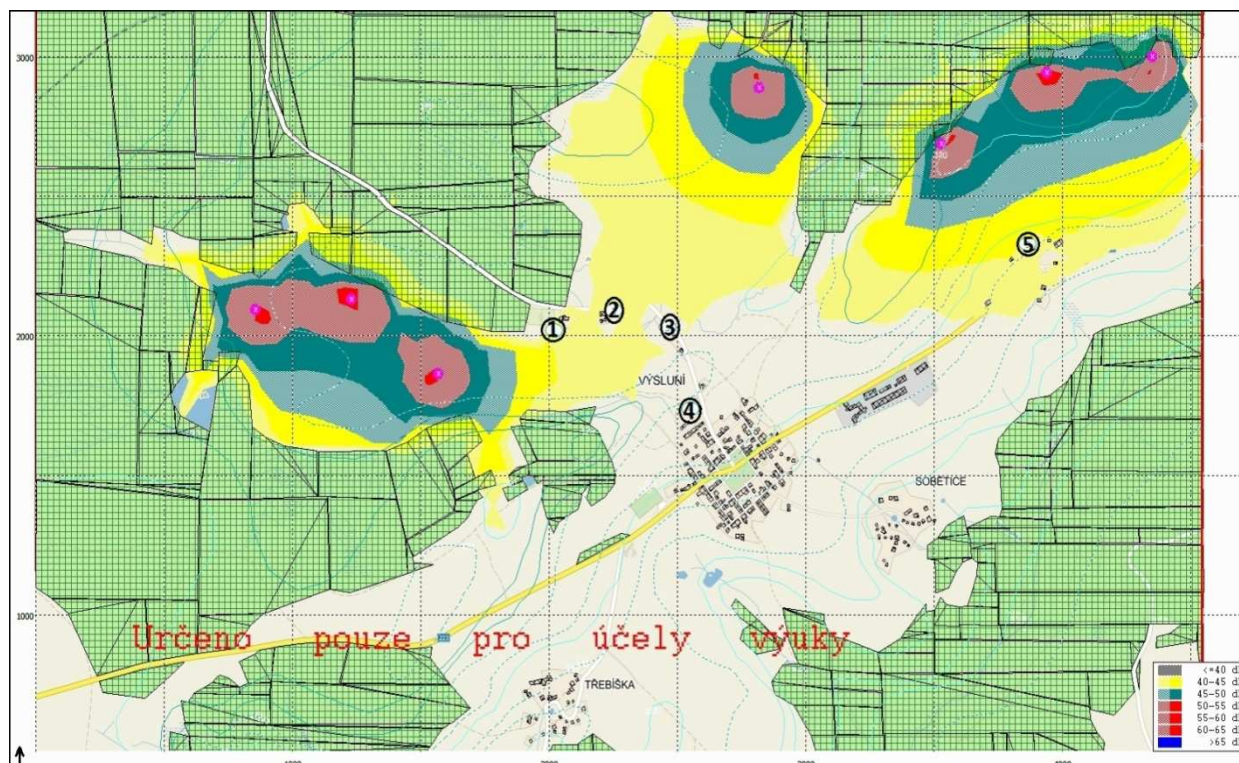
Tab. 6 Experimentální simulace

Hladiny emitovaného hluku	103,5 dB	120 dB	122 dB
Rychlost větru	10 m/s	10 m/s	10 m/s
Měřící bod 1	36,5	53	55
Měřící bod 2	38,5	53	57

Z tohoto experimentu vyplývá, že simulace v programu Hluk+ je pouze přibližná. Tento jev je způsoben především tím, že program nebere v potaz vliv větru ani vyzářovací charakteristiku větrné elektrárny. Proto bude následná simulace v obci Výsluní nasimulována mnohem optimističtěji než ve skutečnosti.

## 6.5 Vlastní simulace v obci Výsluní

V obci výsluní byly celkem provedeny čtyři druhy simulace. První dvě byly provedeny při rychlosti větru 9 m/s ve dne a v noci (mód 0) a zbylé dvě při větru 6 m/s opět ve dne a v noci (mód 2). Emitované akustické výkony, které byly v jednotlivých situacích použity, naleznete v tabulce 5. Tyto hodnoty jsou dány od výrobce. Na obrázku 7 je znázorněna orientační simulace v dané oblasti s parametry 9 m/s, noc a mód 0 ( $L_{wa}=101.8$  dB). Na tomto obrázku jsou také znázorněny polohy měřících bodů, které byly číselně označeny 1 až 5. Měřící body byly zvoleny v místech, kde očekáváme nedodržení hygienických limitů (jsou připnuty k fasádám jednotlivých domů). V simulované oblasti jsou větrné elektrárny znázorněny fialovým kolečkem a barevné oblasti kolem nich znázorňují jednotlivé izofony. Izofony jsou barevně odlišeny v závislosti na znečištění hlukem, kde červená značí nejvyšší hladinu hluku a žlutá nejnižší znečištění. Jednotlivé barevné značení je vždy uvedeno vpravo dole u každé mapy. Výsledky simulací měřených v jednotlivých bodech jsou uvedeny v tabulce 6.



Obr. 7 Grafické znázornění izofon a měřících bodů (MOD 0 a 9 m/s) v noci

Tab. 7 Přehled intenzit hluků v měřících bodech

Číslo měřícího bodu	Rychlost větru 9 m/s MOD 0		Rychlost větru 6 m/s MOD 2	
	Noc [dB]	Den [dB]	Noc [dB]	Den [dB]
1	43,6	42,2	40,4	39,7
2	39,6	37,0	36,4	36,4
3	38,8	36,3	35,6	35,6
4	40,2	37,9	37,0	36,4
5	43,1	41,7	39,9	39,9

## 6.6 Hodnocení simulace

Simulací bylo zjištěno, že hygienické limity pro oba módy ve dne by vyhověly zákonem stanoveným limitům (50 dB ve venkovním prostoru). A však situace v noci byla značně rozdílná. Pro rychlost větru 9 m/s (mód 0), by nevyhověly nasimulované hodnoty v měřících bodech 1, 4 a 5 (40 dB ve venkovním prostoru). Při rychlosti větru 6 m/s v odlehčeném módu 2 nevyhovuje pouze oblast měřícího bodu 1. V příloze A, B, C, a D lze nalézt všechny tyto čtyři situace modelované pomocí izofon v programu Hluk+. Je nutné podotknout, že všechny tyto simulace jsou optimističtější oproti reálné situaci, neboť existují již zmiňované nedostatky v programu Hluk+ (nebere v potaz vliv větru a vyzářovací charakteristiky VtE).



## Závěr:

Využívání technologie výroby elektrické energie pomocí větrných elektráren se jeví na první pohled, vzhledem k zhotovení a způsobu provozování, velice přínosným. Problém však nastává při výběru lokalit vhodných k umístění větrných elektráren a parků, neboť produkují velké množství hluku, které znečišťuje přilehlé okolí. Zákon v České Republice nestanovuje minimální vzdálenost od obydlí, ale je nutné dodržovat hygienické limity dle nařízení vlády (*Zákon č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*). Před každou stavbou tohoto typu by mělo proběhnout hlukové šetření a výsledky musí být schváleny příslušnými úřady například Ministerstvem životního prostředí.

Při srovnání hlukových limitů s ostatními zeměmi Evropské Unie bylo zjištěno, že ČR společně s Nizozemím přistupují k toleranci hluku nejpřísněji. Naopak mnohem benevolentnější jsou státy jako například Rakousko či Švédsko s 50 dB v chráněném venkovním prostoru. Nejvíce tolerantní, co se hluku týče, je Francie s hlukovým limitem 62 dB.

Nicméně i přes dodržování hygienických limitů, se v některých oblastech objevují zdravotní potíže. Projevy hluku na lidský organizmus byly probrány v kapitole 5 a obtíže spojené s hlukem, emitovaným větrnými elektrárnami, definovala Nina Pierpont, MD, PhD jako syndrom větrných elektráren.

Před samotnou simulací v obci Výsluní byla provedena simulace zkušební, při které bylo zjištěno, že simulace v programu Hluk+ jsou zkreslené, optimističtější. Tento fakt je dán samotným programem, neboť je konstruován především pro silniční dopravu a až v jeho novějších verzích bylo umožněno vkládání průmyslových zdrojů. Mnohem vhodnější program pro tento typ simulace je Nord2000, avšak i on bude vykazovat výsledky zkreslené. Terén, ve kterém bylo provedeno šetření, je značně členitý a okolní atmosférické vlivy prostředí jsou rychle proměnné. Program Nord2000 je vhodný pro simulace v prostředí málo členitým a za stabilních podmínek, nebo málo proměnných podmínek.

Konkrétní simulace byla provedena v obci Výsluní. Z důvodu velkého potenciálního využití větrné energie, se kolem této obydlené části Krušných hor chystá výstavba několika větrných elektráren. Vybraný typ větrné elektrárny by měl být schopen provozu v několika módech tak, aby došlo k omezení emitovaného hluku. Jednotlivé módy byly popsány v kapitole 6.2 a dva z nich byly použity v konkrétní simulaci. Jelikož denní doba má značný vliv na šíření zvuku (viz. kapitola 2), bylo měření provedeno ve dne a v noci. Simulace provedené ve dne, byly vyhodnoceny jako pozitivní, tudíž splnily hygienické limity. V noci

byly naměřeny hodnoty vyšší než zákon povoluje.

V případech, kdy nejsou splněny hygienické limity hluku, by se mělo uvažovat o přepracování návrhu na umístění jednotlivých elektráren. Pokud změna lokality není možná, lze také uvažovat o změně typu větrné elektrárny či kompenzaci pro obyvatele. Takovou kompenzací by mohlo být náhradní bydlení a odkoupení majetku ležícího v nevyhovující oblasti. Toto řešení lze využít pouze v případě, kdy se jedná o jednotlivce (jeden dům), nelze přemísťovat celé obce.

Obyvatelé Výsluní se v nejbližší době hluku z větrných elektráren obávat nemusí, neboť tento projekt byl pozastaven z důvodů promeškání termínu zahájení stavby a nedořešení svodové cesty k bodu napojení na energetickou soustavu.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 202 s.
- [2] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1995. 389 s.
- [3] SMETANA, Ctirad et al. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998. 188 s.
- [4] TŮMOVÁ, Olga a VEJVODOVÁ, Eva. *Vyšetřování hluku z větrných elektráren*. *Elektro*, 2009, 19(8-9), s. 50-53.
- [5] VEJVODOVÁ, Eva. *Vliv hluku z větrných elektráren na člověka*. In: *Elektrotechnika a informatika 2007. Část 1., Elektrotechnika: 8. ročník přehledky doktorských prací, zámek Nečtiny, 31.10. - 1.11.2007*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2007. s. 121-124. ISBN 978-80-7043-572-4.
- [6] CETKOVSKÝ, Stanislav a kol. *Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí*. 1. vyd. Brno: Ústav geoniky Akademie věd ČR, 2010. 208 s. *Studia geographica*, 101. ISBN 978-80-86407-84-5.
- [7] THEAKSTON, ed. by Frank. *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2011. ISBN 978-928-9002-295.
- [8] PIERPONT, Nina. *Wind turbine syndrome: a report on a natural experiment*. Santa Fe, N.M: K-Selected Books, 2009. ISBN 978-098-4182-701.
- [9] Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. *o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*
- [10] HURTLEY, Charlotte. *Night noise guidelines for Europe*. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Europe, c2009, xviii, 162 p. ISBN 92-890-4173-0.

## Seznam použitých internetových zdrojů

- [11] VESTAS. [online]. [cit. 2014-06-06]. Dostupné z: [http://www.vestas.com/en/products\\_and\\_services/turbines/v90-2\\_0\\_mw#!related-products](http://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v90-2_0_mw#!related-products)
- [12] MACHÁČEK, Milan. *EKOEX JIHLAVA. Větrný park Chomutov – změna záměru*. [cit. 2014-06-06]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/166078867/MINISTERSTVO-%C5%BDIVOTNIHO-PROST%C5%98EDNI-APB-PLZE%C5%87-V%C4%9ATR%C3%9D-PARK-CHOMUTOV>

- [13] *WEB RABBIT. Hluku+ [online]. 2005 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z:*  
*<http://www.hlukplus.cz/>*
- [14] *AUTOR NEUVEDEN. [online]. Ústav fyziky atmosféry AV ČR. [cit. 2014-06-02].*  
*Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>*

## Seznam obrázků:

<i>OBR. 1 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU V RŮZNÉM PROSTŘEDÍ [2]</i> .....	14
<i>OBR. 2 ÚTLUM VLIVEM VĚTRU [2]</i> .....	17
<i>OBR. 3 VLIV POKLESU TEPLoty NA ŠÍŘENÍ ZVUKU [2]</i> .....	18
<i>OBR. 4 VLIV NÁRŮSTU TEPLoty NA ŠÍŘENÍ ZVUKU [2]</i> .....	18
<i>OBR. 5 ROZMÍSTĚNÍ VTE V OBCI VÝSLUNÍ A PŘÍLEHLÉHO OKOLÍ [12]</i> .....	27
<i>OBR. 6 PRŮMĚRNÁ RYCHLOST VĚTRU VE VÝŠCE 100 M NAD POVRCHEM [14]</i> .....	28
<i>OBR. 7 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ IZOFON A MĚŘÍCÍCH BODŮ (MOD 0 A 9 M/S) V NOCI</i> .....	32

## Seznam tabulek:

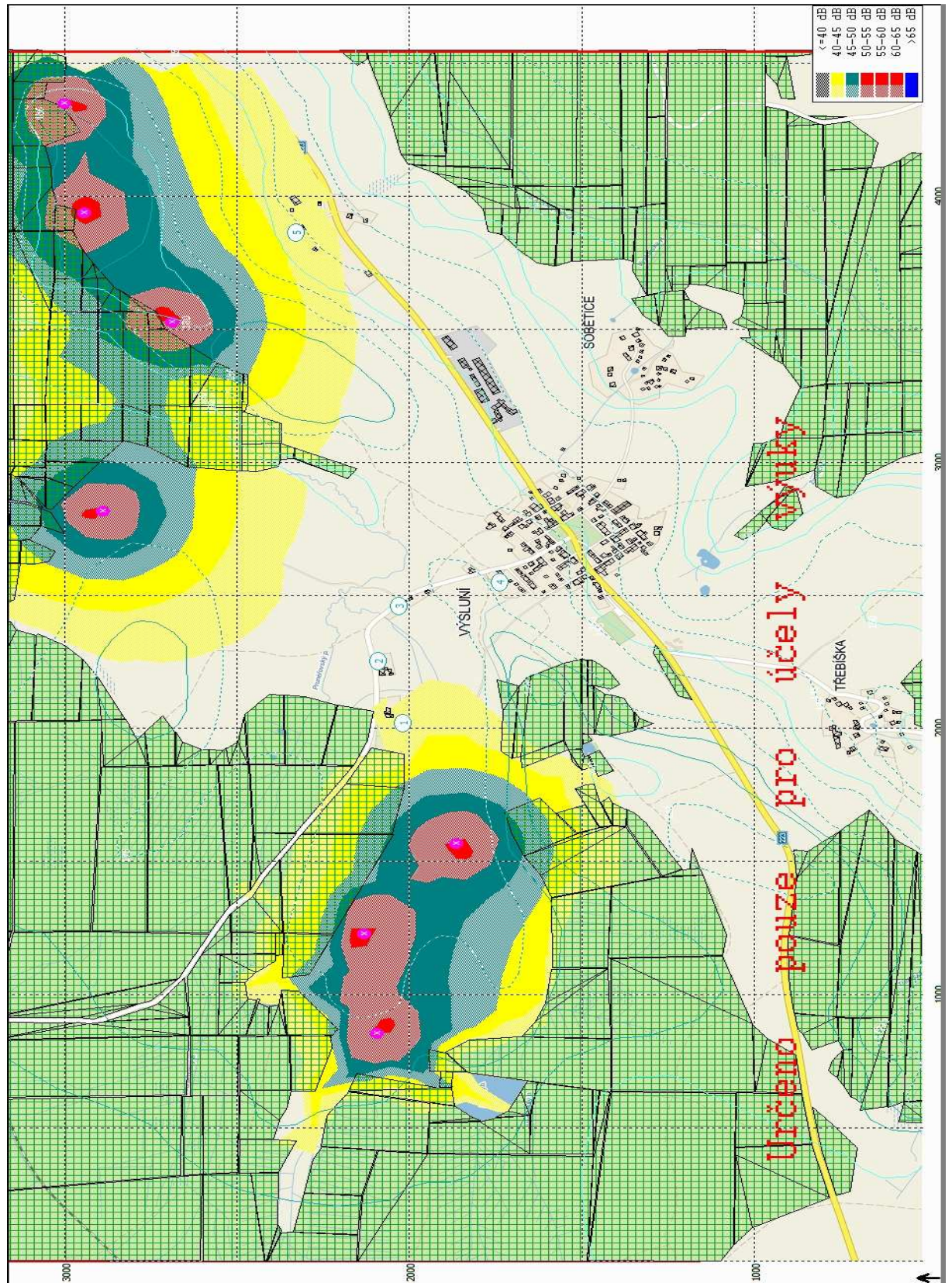
<i>TAB. 1 PŘEHLED INTENZIT HLUKŮ ČÁSTÍ STROJOVNY [4]</i> .....	21
<i>TAB. 2 PŘEHLED INTENZIT HLUKŮ V CHRÁNĚNÉM PROSTORU [9]</i> .....	22
<i>TAB. 3 PŘEHLED INTENZIT HLUKŮ NĚKTERÝCH ZEMÍ EU [10]</i> .....	23
<i>TAB. 4 TECHNICKÉ PARAMETRY VESTAS V 90, 2 MW [11]</i> .....	28
<i>TAB. 5 PŘEHLED MÓDŮ A REDUKCÍ VÝKONŮ [12]</i> .....	29
<i>TAB. 6 EXPERIMENTÁLNÍ SIMULACE</i> .....	31
<i>TAB. 7 PŘEHLED INTENZIT HLUKŮ V MĚŘÍCÍCH BODECH</i> .....	32

## Seznam příloh:

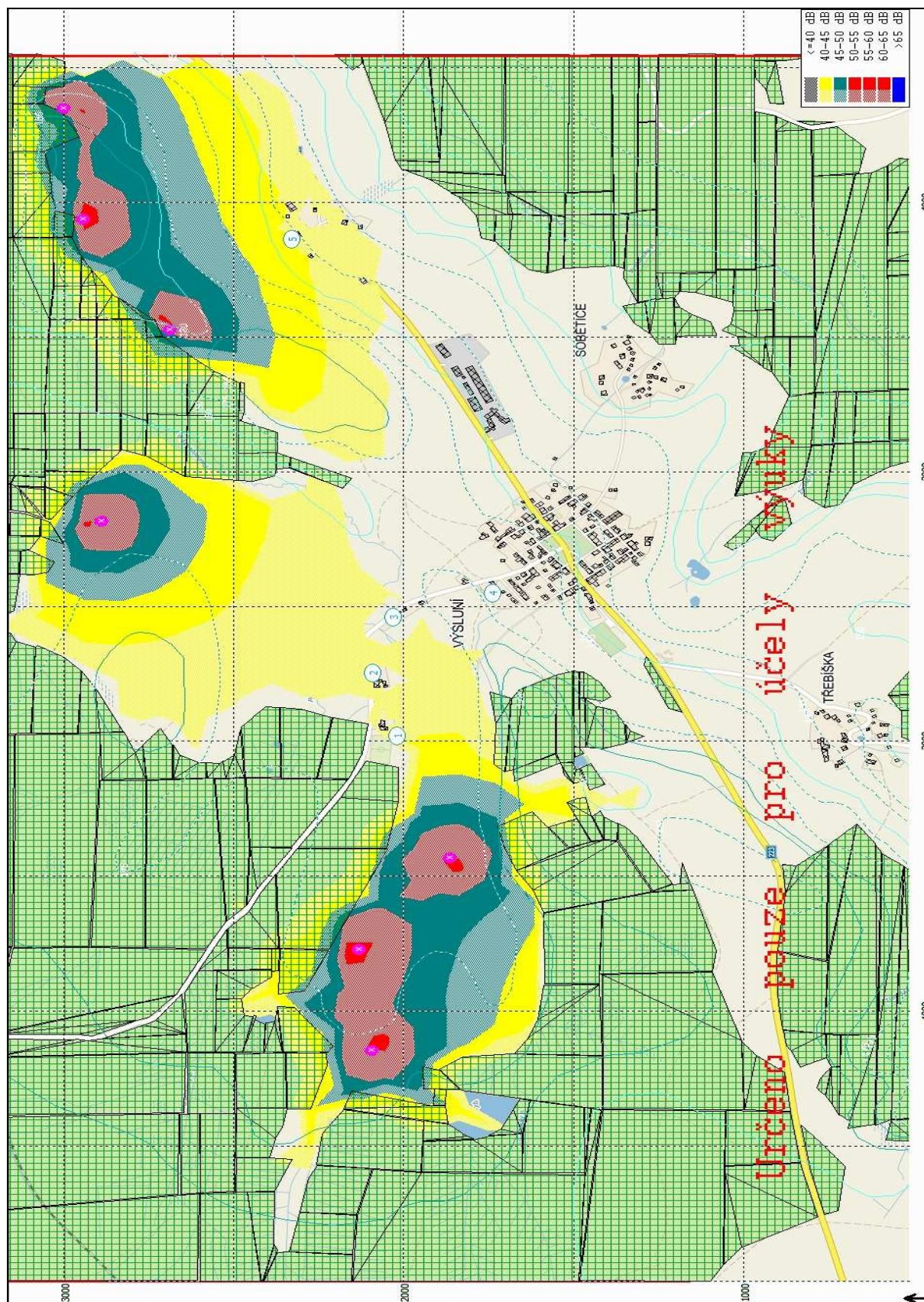
<i>PŘÍLOHA A GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ IZOFON (MOD 0 A 9 M/S) V NOCI</i> .....	38
<i>PŘÍLOHA B GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ IZOFON (MOD 0 A 9 M/S) VE DNE</i> .....	39
<i>PŘÍLOHA C GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ IZOFON (MOD 2 A 6 M/S) V NOCI</i> .....	40
<i>PŘÍLOHA D GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ IZOFON (MOD 2 A 6 M/S) VE DNE</i> .....	41
<i>PŘÍLOHA E NAMĚŘENÁ DATA NOVÁ VÍSKA</i> .....	42
<i>PŘÍLOHA F ZKUŠEBNÍ SIMULACE NOVÁ VÍSKA</i> .....	44

# Přílohy

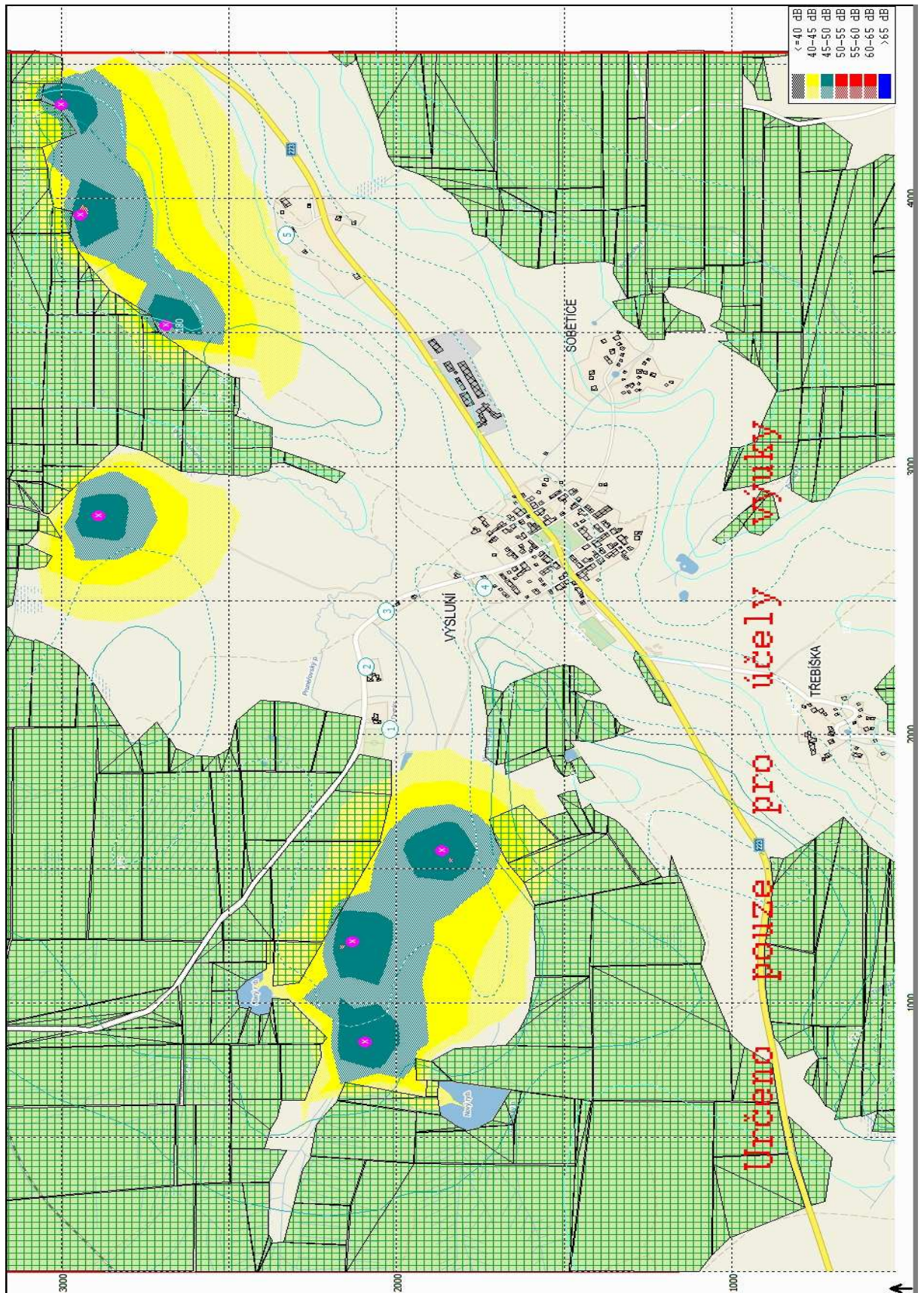
**Příloha A** Grafické znázornění izofon (MOD 0 a 9 m/s) v noci



Příloha B Grafické znázornění izofon (MOD 0 a 9 m/s) ve dne

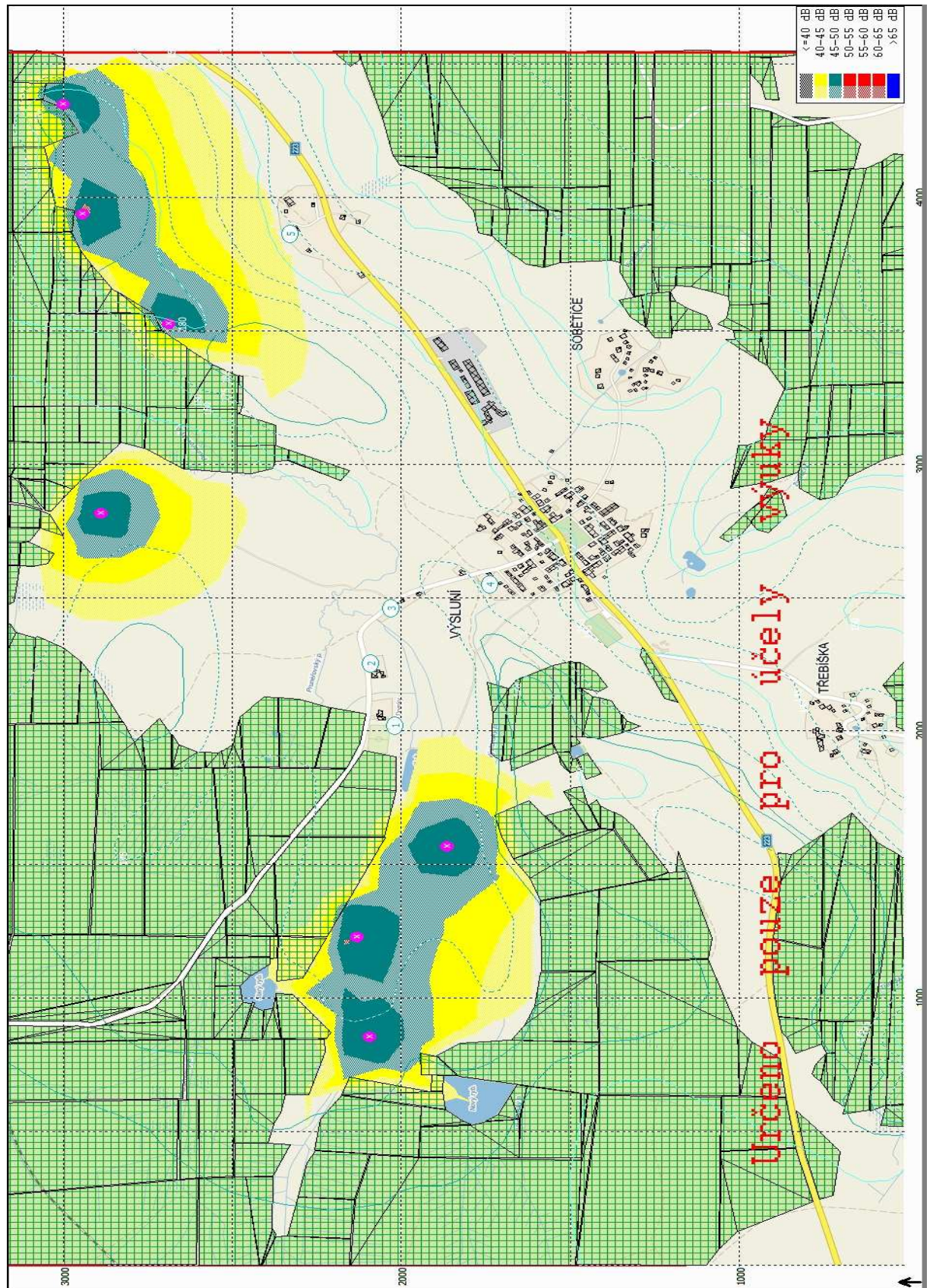


Příloha C Grafické znázornění izofon (MOD 2 a 6 m/s) v noci





Příloha D Grafické znázornění izofon (MOD 2 a 6 m/s) ve dne



## Příloha E Naměřená data Nová Víska

Den	Hluk L <sub>Aeq</sub> (dB)	Vítr (m/sec)	Vítr (km/h)	Azimut větru (°)	Teplota (°C)	Vlhkost (%)	Max.hladina hluku (dB)	Čas měření[h]	Počasí	Směr větru
1	58,5	2,8	10,0	315	-4	92	50	20.00	Zataženo	SZ
2	62,0	4,2	15,0	315	-2	90	50	10.00	Polojasno	SZ
3	61,0	5,0	18,0	270	-2	92	50	09.00	Zataženo, sněžení	Z
4	38,0	1,5	5,0	135	2	93	50	09.00	Jasno	JV
5	42,0	1,5	5,0	135	0	94	50	20.00	Jasno	JV
6	38,5	1,5	5,0	180	-1	92	50	08.00	Jasno	J
7	40,5	1,1	4,0	135	3	92	50	10.00	Zataženo	JV
8	41,0	1,1	4,0	135	3	98	50	08.00	Zataženo, mlha, mrholení	JV
9	42,0	1,5	18,0	140	4	98	50	20.00	Zataženo, mlha, mrholení	JV
10	52,0	3,3	12,0	270	5	85	50	12.00	Zataženo	Z
11	65,0	13,8	50,0	340	-6	88	50	07.00	Zataženo, mlha, sněžení	SZ
12	38,0	2,8	10,0	45	-4	80	50	09.00	Zataženo, mlha, sněžení	SV
13	58,0	5,5	20,0	360	-5	82	50	13.00	Zataženo, sněžení	S
14	55,0	2,8	10,0	360	-6	96	50	20.00	Jasno	S
15	52,0	1,5	5,0	360	-4	84	50	10.00	Polojasno	S

Den	Hluk L <sub>Aeq</sub> (dB)	Vítr (m/sec)	Vítr (km/h)	Azimut větru (°)	Teplota (°C)	Vlhkost (%)	Max.hladina hluku (dB)	Čas měření[h]	Počasí	Směr větru
16	34,0	1,1	4,0	140	-2	85	50	15.00	Jasno	JV
17	32,0	1,5	5,0	140	-1	89	50	20.00	Jasno	JV
18	34,0	2,8	10,0	135	-2	86	50	11.00	Zataženo, sněžení	JV
19	56,0	5,5	20,0	270	0	90	50	11.00	Zataženo	Z
20	58,0	2,8	10,0	315	2	95	50	19.00	Zataženo déšť	SZ
21	62,0	5,5	20,0	315	-2	81	50	13.00	Zataženo, sněžení	SZ
22	55,0	2,8	10,0	360	2	82	50	12.00	Zataženo	S
23	48,0	5,5	20,0	45	-3	75	50	14.00	Polojasno	SV
24	36,0	3,3	12,0	90	-12	74	50	7.00	Polojasno	V
25	52,0	5,5	20,0	45	-5	69	50	20.00	Zataženo	SV
26	53,0	6,9	25,0	45	-6	62	50	7.00	Zataženo	SV
27	36,0	3,3	12,0	180	-3	68	50	7.00	Zataženo, sněžení	J
28	40,0	2,8	10,0	135	-2	70	50	8.00	Zataženo, sněžení	JV
29	53,0	4,2	15,0	340	-2	82	50	20.00	Zataženo	SZ
30	38,0	1,1	4,0	90	-3	85	50	10.00	Zataženo, sněžení	V
31	42,0	1,5	5,0	45	-2	76	50	07.00	Zataženo	SV

Příloha F Zkušební simulace Nová Víska

