

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

**Katedra aplikované geoinformatiky a územního  
plánování**



**Diplomová práce**

**Vliv větrných elektráren na teplotní podmínky  
okolí hodnocené skrze dálkový průzkum Země**

**Autor práce: Bc. Simona Schindler**

**Vedoucí práce: Ing. David Moravec**

© 2018 ČZU v Praze

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Simona Schindler

Voda v krajině

Název práce

**Vliv větrných elektráren na teplotní podmínky okolí hodnocené skrze dálkový průzkum Země**

Název anglicky

**Influence of wind power plants on the temperature conditions of the surrounding area assessed by remote sensing**

---

### **Cíle práce**

Cílem práce je vyhodnotit vliv větrných elektráren na teplotní podmínky v okolí a to pomocí porovnání dosažených hodnot teplot na vybrané větrné farmě v ČR před a po její výstavbě. K tomu účelu budou využity satelitní snímky družice Landsat 8.

### **Metodika**

1. Nastudování problematiky větrných elektráren a jejich vlivu na životní prostředí
2. Získání potřebných dat družice Landsat 8
3. Zpracování a vyhodnocení dat pomocí programů ENVI a ArcGIS
4. Zpracování diskuze nad získanými výsledky

## Doporučený rozsah práce

40 stran

## Klíčová slova

větrná energie, klima, obnovitelný zdroj energie, dálkový průzkum Země, ENVI, ArcGIS

---

## Doporučené zdroje informací

Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.-N., & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy – A review. *Renewable Energy*, 75, 911–921. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>

Harris, R. A., Zhou, L., & Xia, G. (2014). Satellite observations of wind farm impacts on nocturnal land surface temperature in Iowa. *Remote Sensing*, 6(12), 12234–12246. <http://doi.org/10.3390/rs61212234>

Pineda, I., & Wilkes, J. (2015). Wind in Power: 2014, European Statistics. Technical Report The European Energy Association, (February), 1–12.

Porté-Agel, F., Wu, Y.-T., Lu, H., & Conzemius, R. J. (2011). Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 154–168.

RAJEWSKI, Daniel Andrew, 2013. CWEX (Crop/Wind-Energy Experiment): Measurements of the interaction between crop agriculture and wind power. 182.

Tabassum, A., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2014). Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 270–288.

XIA, Geng, Liming ZHOU, Jeffrey M. FREEDMAN, Somnath Baidya ROY, Ronald A. HARRIS a Matthew Charles CERVARICH, 2016. A case study of effects of atmospheric boundary layer turbulence, wind speed, and stability on wind farm induced temperature changes using observations from a field campaign. *Climate Dynamics* [online]. B.m.: Springer Berlin Heidelberg, 46(7–8), 2179–2196. ISSN 14320894. Dostupné z: [doi:10.1007/s00382-015-2696-9](https://doi.org/10.1007/s00382-015-2696-9)

---

## Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FŽP

## Vedoucí práce

Ing. David Moravec

## Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 27. 3. 2018

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 3. 2018

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2018

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Vliv větrných elektráren na teplotní podmínky okolí hodnocené skrze dálkový průzkum Země" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

.....

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu Ing. Davidu Moravcovi za vedení mé práce a své rodině za umožnění studia.

# Vliv větrných elektráren na teplotní podmínky okolí hodnocení skrze dálkový průzkum Země

## Abstrakt

Alternativní zdroje energie v posledních letech celosvětově zvyšují svoje zastoupení na celkovém podílu výroby elektrické energie. Ačkoliv některé kladné stránky získávání energie z těchto zdrojů jsou obecně známé, jsou zde i stránky negativní, o kterých je ještě nutné získávat informace. Velký důraz se v minulých výzkumech „zelené“ energie kladl na živočichy a přímo ovlivněné ekosystémy, ale o vlivu na teplotní podmínky je zatím známo velmi málo.

Práce se zabývá zejména lokálními změnami teploty v okolí větrných elektráren. Pracuje s daty naměřenými u větrné farmy Andělka v Libereckém kraji pomocí dálkového průzkumu Země. Cílem práce je zjistit, zda vůbec k teplotní změně v souvislosti s větrnou farmou na tomto území dochází a popřípadě v jaké míře. Analýza dat je provedena pomocí programu ENVI a ArcGis. V práci je využito dat z družice Landsat 8 a jsou porovnávány teploty dosažené v okolí elektrárny před a po výstavbě. Jsou zkoumány teplotní změny po průchodu větru jednotlivými turbínami.

Výsledky této práce podporují tvrzení některých předešlých zahraničních experimentů. V okolí větrné farmy dochází k určitým teplotním změnám.

**Klíčová slova:** teplotní podmínky, dálkový průzkum Země, větrná elektrárna, ENVI software

# **Influence of wind power plants on the thermal conditions of the surrounding area assessed through remote land survey**

## **Abstract**

Alternative sources of energy in the last few years have increased their share in the overall share of electricity production worldwide. Although some of the positive aspects of energy recovery from these sources are generally known, there are also negative regards that still need to be cleared. Existing studies of "green" energy have placed great emphasis on animals and directly affected ecosystems, but very little is known about the impact on temperature conditions.

The thesis deals mainly with local changes of temperature in the vicinity of wind power plants. This study works with the data measured at the Andělka wind farm in the Liberec region using remote sensing. The aim of the thesis is to find out whether the temperature change is occurring at all for these reasons in this area and, if so, to which extent. Data analysis is performed using the ENVI and ArcGis programs. This study use data from Landsat 8 and compares the temperatures achieved around the power plant before and after its construction and investigates the temperature changes after the wind passes through individual turbines.

Results of this thesis are supporting claims of some of the others foreign experiments. There are some thermal changes in the surrounding area of wind power plants.

**Keywords:** wind energy, remote land sensing, climatic conditions, ENVI software

## **OBSAH :**

1	ÚVOD.....	9
2	CÍLE PRÁCE .....	9
3	LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	10
3.1	Větrné elektrárny .....	10
3.1.1	Vliv na živočichy .....	12
3.1.1.1	Ptáci.....	12
3.1.1.2	Netopýři .....	13
3.1.1.3	Mořští živočichové .....	14
3.1.2	Vliv na lidskou populaci a kvalitu života.....	14
3.1.2.1	Deforestace a půdní eroze .....	14
3.1.2.2	Hluk .....	15
3.1.2.3	Vizuální rušení.....	17
3.1.2.4	Rušení elektromagnetických vln .....	18
3.1.2.5	Vliv na klimatické změny.....	19
3.1.3	Zmírnění dopadu větrné energie na životní prostředí.....	22
3.1.3.1	Omezení dopadu na ptactvo a netopýry .....	23
3.1.3.2	Omezení negativního dopadu na klima .....	23
3.1.3.3	Redukce hluku.....	23
3.2	Dálkový průzkum Země.....	24
3.3	Družice Landsat .....	27
3.3.1	Družice Landsat 8 .....	28
4	CHARAKTERISTIKA ÚZEMÍ .....	29
4.1	4.1. Větrná farma Andělka .....	29
5	METODIKA.....	30
5.1	Zpracování dat v ENVI .....	31
5.2	Zpracování dat v ArcMap .....	35
6	VÝSLEDKY .....	39
7	DISKUZE.....	46
8	ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE .....	49
9	PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	50



# 1 ÚVOD

Tématem diplomové práce je vliv větrných elektráren na teplotní podmínky okolí hodnocený pomocí dálkového průzkumu Země. V posledních letech stále roste poptávka po elektřině a výhledy do budoucna předpokládají další růst. V České republice vzrostla spotřeba elektrické energie nejvíce u domácností, meziročně o více než 437 GWh (ERÚ, 2017). Výroba elektřiny je tedy velkým tématem sama o sobě a k tomu se váže i téma vlivu na životní prostředí. Větrné elektrárny patří do kategorie alternativních zdrojů elektřiny neboli obnovitelných zdrojů. Tyto elektrárny jsou velice náročné na podmínky umístění, a ne všude je větrný potenciál dostatečný, jelikož Česká republika nepatří mezi země s velkým větrným potenciálem. Ve světě jsou větrné farmy (sdružení několika větrných elektráren) obrovských rozměrů a to jak na souši, tak na moři. Proto je nutné se zabývat i jejich vlivem na životní prostředí. Obnovitelné zdroje nespalují fosilní paliva ani nepodléhají termionukleárním reakcím, přesto i u nich mohou být negativní dopady na životní prostředí jako například na klimatické podmínky. Důležité je zjistit, jak velké jsou tyto negativní dopady a jak je možné jim předcházet.

## 2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je zjistit vliv větrných elektráren na teplotní podmínky a to pomocí porovnání dosažených hodnot teplot na vybrané větrné farmě v ČR před a po její výstavbě, zda ke změně došlo a v jak velkém rozsahu. V práci jsou použity hodnoty získané z družice Landsat 8.

## 3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 3.1 Větrné elektrárny

V poslední dekádě je jednou z nejvíce rostoucích technologií výroby elektřiny pomocí obnovitelných zdrojů právě výroba pomocí větrné energie. Větrná energie se stala preferovanou možností výroby elektřiny pro vlády, které chtějí využívat i jiné než „tradiční“ zdroje energie, snižovat emise CO<sub>2</sub>, vytvářet nové průmyslové možnosti a nová pracovní místa. Na konci roku 2013 byl instalovaný výkon větrných elektráren na celém světě 318,105 GW (GWEC, 2013). Ačkoliv je zřejmý nárůst výstavby větrných elektráren, jejich vliv na životní prostředí není zcela prozkoumán, přitom porozumění všem vlivům větrné energie na okolí může sloužit k lepšímu využití a lepšímu umístování větrných elektráren a farem.

V dnešní době dochází k rapidnímu ekonomickému růstu a to si samozřejmě žádá velké množství elektrické energie. Konvenční fosilní paliva jako je uhlí, nafta a zemní plyn, která jsou klíčovými zdroji energie už od dob průmyslové revoluce, jsou nejenom v blízké době vyčerpatelná, ale mají i velmi negativní vliv na životní prostředí. Je tedy důležité soustředit se na vývoj obnovitelných a čistých zdrojů energie jako jsou solární, větrné a vodní elektrárny (Hepbasli & Ozgener, 2004).

Větrná energie nabízí vyspělou technologii a již nyní je v širokém měřítku používána po celém světě (Deal, 2010). Větrná energie má více než tři tisíce let starou historii a pro generování elektrické energie byla používána již před stovaceti lety. Prvopočátky využívání větrné energie jsou již u výstavby prvních větrných mlýnů. Velký rozvoj zažila větrná energie během ropné krize v roce 1970 (Ackermann & Söder, 2002).

Předpokládá se, že v roce 2020 bude elektřina vyrobená pomocí větrných elektráren pokrývat 5 % z celé světové elektrické energie. Například Německo se chce do roku 2020 dostat na výkon 6500 megawattů, což je třikrát více než vyrobí jaderná elektrárna Temelín. Nejvíce větrné energie pochází z pevninských elektráren, ačkoliv výzkumy ukazují, že pobřežní větrné elektrárny mají větší účinnost (Joselin Herbert, Iniyana, Sreevalsan, & Rajapandian, 2007). Na rozdíl od fosilních paliv a nukleární energie neznečišťují větrné elektrárny atmosféru skleníkovými plyny a netvoří radioaktivní odpad, který je velkým problémem do budoucna.

Podíl větrné energie v evropské unii se na celkovém počtu vyrobené energie od roku 2000 do roku 2015 zvýšil více než šestinásobně a to z 2,4 % na 15,6 %. Množství vyrobené energie pomocí větru dokonce překonalo i výrobu vodních elektráren a větrná energie se tak stala třetím největším producentem energie po plynu a uhlí v EU. V roce 2015 se Česká republika s počtem 163 větrných turbín a celkovým instalovaným výkonem 282 MW podílela na celkové výrobě větrné energie v EU podílem 0,3%. Svým podílem se tak řadí na úroveň Estonska a Maďarska a zemí východního bloku Evropy (Pineda, I., Wilkes, 2015). Od roku 2016 nebyla v České republice postavena žádná nová větrná elektrárna.

FIGURE 7: EU POWER MIX 2000 (MW)

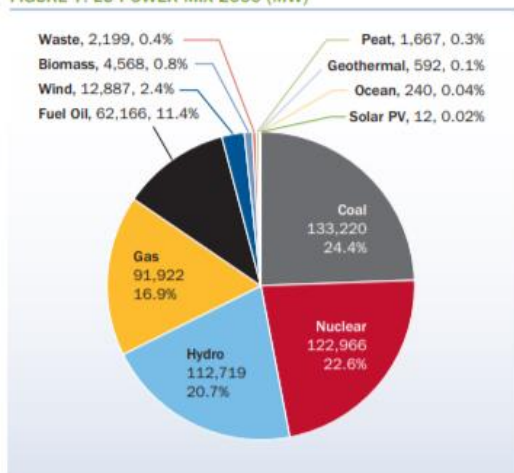
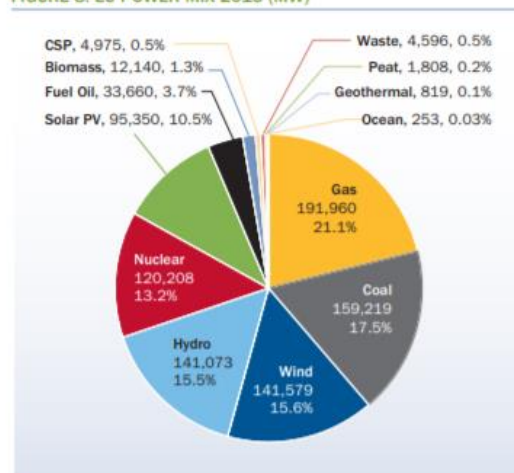


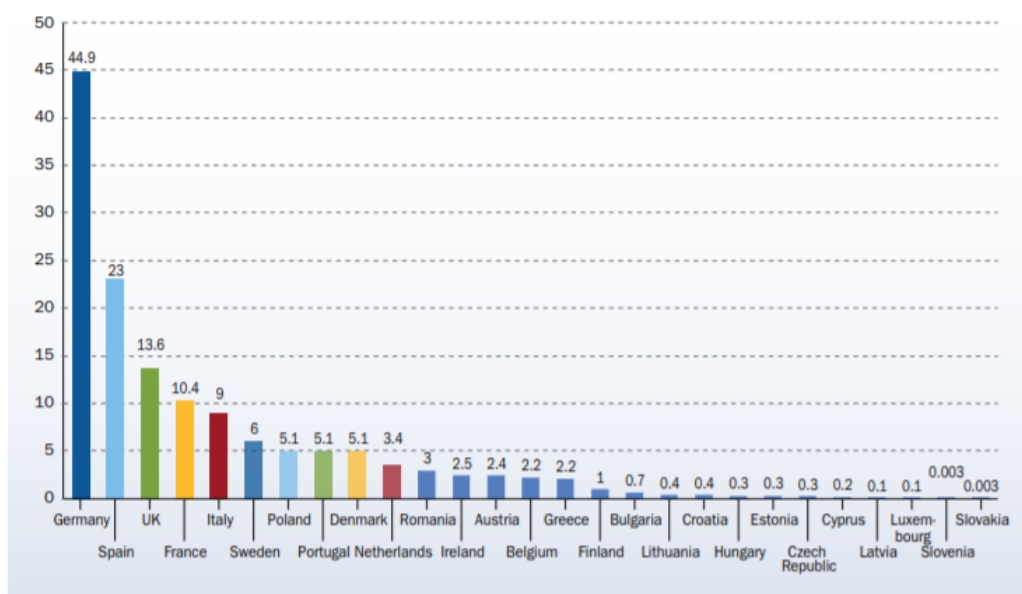
FIGURE 8: EU POWER MIX 2015 (MW)



Obr. 1.: Porovnání podílu jednotlivých zdrojů energie. Šedivá barva – uhlí, červená barva – jádro, žlutá – plyn, světle modrá – voda, tmavě modrá – vítr. (Wind Europe, 2016)

V České republice se v posledních letech ustálil do té doby stoupající trend výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Pokles byl zaznamenán u solárních a větrných elektráren. Větrné energie bylo vyrobeno méně o 76 GWh. Větrná energie je ze sledovaných zdrojů energie v České republice nejmenším producentem a to o 800 GWh za přečerpávacími elektrárnami. Stoupající trend zaznamenaly vodní elektrárny, malé vodní elektrárny, výroba energie z biologicky rozložitelného komunálního odpadu a použití zemního plynu. U neobnovitelných zdrojů byl zaznamenán pokles u jaderné energie. Množství elektřiny pocházející z hnědého uhlí stagnuje, zatímco z černého uhlí mírně stoupá (ERÚ, 2017).

FIGURE 13: EU MEMBER STATE MARKET SHARES FOR TOTAL INSTALLED CAPACITY (GW). TOTAL 141.6 GW



Obr. 2: Podíl zastoupení jednotlivých států EU na celkovém instalovaném výkonu větrné energie. (Wind Europe, 2016)

### 3.1.1 Vliv na živočichy

Výstavba větrné elektrárny v odlehilých místech od industriálních zón může jako všechny ostatní stavby, mít významný vliv na tamní faunu. Nejvíce ovlivněnými živočichy jsou netopýři a ptáci, u pobřežních elektráren pak mořští živočichové.

#### 3.1.1.1 Ptáci

Turbíny větrných elektráren představují zvýšené riziko rušení a úmrtnosti ptactva. Srážky s otáčejícími lopatkami větrné elektrárny znamenají pro ptáky téměř jistou smrt. Další smrtelná zranění ale mohou být způsobena srážkou se samotnou věží elektrárny nebo ukotvovacími kabely, dráty elektrického vedení nebo meteorologickými stožáry. Jak uvádí Loss et al. (2013) je ve Spojených Státech Amerických (USA) odhadované množství 234 000 mrtvých ptáků ročně po srážce s větrnou elektrárnou. Saidur et al. (2011) uvádí, že ročně je zabito 2,3 ptáka na turbínu, jejíž rotor má v průměru 33 až 72 metrů. Na úmrtnost ptáků mají samozřejmě vliv i jiné lidmi postavené konstrukce, používání pesticidů nebo infrastruktura fosilních paliv, ale vliv větrných elektráren by v žádném případě neměl být ignorován. Zajímavostí je, že nejvíce ohroženi jsou tyto konkrétní tři druhy ptáků: orel skalní, labuť a tetřev hlušec (González & Ena, 2011). Přesný odhad počtu úmrtí způsobených srážkou s větrnou elektrárnou je téměř nereálný z důvodu

nestanovené prohledávané oblasti a odklizení mrtvých ptáků dravou zvěří (Everaert & Kuijken, 2010). Mnoho faktorů prokazatelně ovlivňuje možnost srážky, například design větrné turbíny a její uspořádání, klimatické podmínky a samozřejmě druh ptáků. Orloff & Flannery (1992) uvádí, že úmrtnost ptáků je vyšší u mřížových typů konstrukce než u ostatních. Lokace a dispozice také hrají výraznou roli v úmrtnosti ptactva a dalším důležitým faktorem je přibližovací úhel mezi leteckou dráhou ptáků a orientací turbíny. Na druhou stranu (Leung & Yang, 2012) vyjadřuje myšlenku, že ptáci si časem na překážky rychle zvykají a začínají se jim vyhýbat a že úmrtnost ptáků kvůli větrným elektrárnám je velmi zanedbatelná vůči jiným lidským aktivitám, jako jsou odlesňování a urbanizace. V americkém státě Texas jsou u větrných farem použity letecké radary, které zachycují pohyb ptáků v blízkém okolí turbín a pokud hrozí nějaké nebezpečí srážky, turbíny se vypnou. Dalším negativním vlivem je disturbance ptáků, kam patří například destrukce míst výskytu některých druhů, bariéra při cestování za potravou a kmením ptáčat (Dai, Bergot, Liang, Xiang, & Huang, 2015).

### **3.1.1.2 Netopýři**

Netopýři se lépe vyhýbají pohybujícím se objektům než těm statickým (Jen & McCarty, 1978). I přesto je v blízkosti větrných elektráren pozorována větší úmrtnost netopýřů. Výzkumy ukazují, že nedochází ke zvyšování úmrtnosti pouze u lokálních netopýřů, ale i u migrujících jedinců. Vědecké výzkumy se doposud neshodli na příčině zvýšené úmrtnosti netopýřů v důsledku větrných elektráren (Grotsky et al., 2011). V prvních studiích se objevily předpoklady, že netopýři umírají z důvodu náhlého poklesu tlaku v bezprostřední blízkosti turbíny, který jim způsobí barotrauma (fyzické poškození tkání způsobené rozdílem tlaků mezi tělesnými dutinami a okolním prostředím) a následné vnitřní krvácení. Toto krvácení bylo nalezeno u více než 50% mrtvých netopýřů v blízkosti větrných elektráren (Baerwald, D'Amours, Klug, & Barclay, 2008). Další výzkum přinesl alternativní vysvětlení. Netopýři by mohli být přitahováni ultrazvukem, který je větrnou turbínou produkován. Další možnou variantou je, že netopýři vnímají stožár s turbínou jako strom a snaží se na něm přistát. (Barclay, Baerwald, & Gruver, 2007) se ve své studii zaměřili na velikost rotoru, ale ta se později ukázala jako neovlivňující úmrtnost netopýřů na rozdíl od výšky, kde je turbína umístěna, tedy na výšce stožáru. Úmrtnost roste exponenciálně s výškou stožáru.

### **3.1.1.3 Mořští živočichové**

Problematika vlivu větrných elektráren na mořské živočichy se týká pouze pobřežních elektráren. Konstrukce, její výška a další doprovodné stavby mohou škodit bentické fauně a floře a mohou blokovat sluneční paprsky, které dopadají do vody. Výzkum na dvou dánských větrných farmách ukázal, že v jejich okolí se hojnost a biodiverzita bentických druhů zvýšila (DONG Energy et al., 2006). Dále byl prokázán růst rybí populace v okolí farem a to pravděpodobně z důvodu zachycování potravy na konstrukcích pod mořskou hladinou (Andersson & Öhman, 2010). Některé studie ukazují, že po sedmi letech od výstavby větrné farmy se nedají pozorovat žádné benefity ani hrozby pro ryby a další mořské živočichy. Naopak hluk a elektromagnetická pole v okolí turbín mohou mít na mořské živočichy negativní vliv. Mořští savci, obzvláště pak sviňuchy a tuleni mohou reagovat na větrné farmy, zejména ve fázi výstavby a tedy zvýšeného hluku a to až po dobu dvou let od výstavby (DONG Energy et al., 2006). Ať už je vliv na mořské živočichy jakýkoliv, je doporučeno, že by se výstavba měla vyhnout místům výskytu lokálních mořských živočichů a nenarušovat jejich přirozená území.

### **3.1.2 Vliv na lidskou populaci a kvalitu života**

Pokud je zkoumán vliv větrných elektráren na živočichy, nesmíme zapomenout na vliv na lidskou populaci. Ať už jde o vizuální a psychologické vnímání „větrníků“ v krajině, nebo o hlukové či elektromagnetické rušení, které má velký vliv na kvalitu života v obydlených místech větrných elektráren.

#### **3.1.2.1 Deforestace a půdní eroze**

Během výstavby větrných farem mohou některé aktivity, jako je například výstavba silnic, ovlivňovat lokální biosystémy. Může docházet ke kácení lesů, stromů a odstraňování vegetačního pokryvu, což vystavuje půdu působení větru a deště a vede až k půdní erozi. Toto kácení stromů se nazývá odborným názvem deforestace z anglického výrazu deforestation. Odpadní vody a některé použité oleje se mohou dostat do půdy a způsobit velké problémy se znečištěním. Místa s dobrými povětrnostními podmínkami pro výstavbu farem jako jsou louky, rašeliniště a polopouště mají slabé ekosystémy s nízkou biodiverzitou. Používání těžké techniky může tyto ekosystémy vážně narušit a jejich obnova trvá dlouhou

dobu. Obecně se uvádí, že stromy a rostliny by měli být do přírody navraceny tak rychle, jak jen je to možné po skončení výstavby (Twidell, 2009).

### 3.1.2.2 Hluk

Hluk je považován za jednu z největších překážek ve nárůstu výstavby nových větrných elektráren. Během tichých nocí si lidé stěžovali na silný hluk z větrných elektráren v okruhu 500 metrů a zaregistrovali rušení tiché noci v okruhu až 1900 metrů (Van Den Berg, 2004). Lidé si více stěžovali na hluk z větrných elektráren než na hluk z dopravy, avšak tito lidé jsou pravděpodobně ovlivněni vzhledem elektrárny v krajině a negativním přístupem k ní (Pedersen & Persson Waye, 2004). Větrné elektrárny produkují dva typy hluku: tonální a širokopásmový. Tonální hluk o frekvenci 20 – 100 Hz je hluk definovaný jako diskrétní frekvence, což je taková frekvence, která se nemění spojitě s časem a vzniká nestabilním prouděním vzduchu okolo děr, štěrbin a tupých koncových hran. Širokopásmový hluk je nahodilý neperiodický signál o kontinuální frekvenci vyšší než 100 Hz a je generován interakcí větrných lopatek s atmosférickými turbulencemi a prouděním vzduchu okolo zakřivených ploch (Pantazopoulou, 2009). Další rozdělení hluku může být na hluk aerodynamický a mechanický. Aerodynamický hluk pochází z pohybu větrných lopatek vzduchem. Tento hluk, kolmý na rotační plochu závisí na velikosti turbíny, rychlosti větru a rychlosti otáčení lopatek. Čím větší turbína a vyšší rychlost větru tím větší hluk. Moderní turbíny už se mohou otáčet tak, aby čelily větru z co nejlepšího úhlu. Hluk pak přichází z různých stran a v různých časech. Aerodynamický hluk se skládá z více různých frekvencí a je tedy považován za širokopásmový (Alberts, 2006). Mechanický hluk pochází z vnitřních částí turbíny (Tadamasa & Zangeneh, 2011). Na rozdíl od aerodynamického hluku není mechanický hluk závislý na velikostních parametrech turbíny a dá se ovlivnit správnou zvukovou izolací již při výrobě (Harrison, 2011).

Výsledný hluk vzniká kombinací mechanického a aerodynamického hluku. Hluk s nízkou frekvencí 10 – 200 Hz se považuje za pouhý hluk dodatkový (Møller & Pedersen, 2011). Testy akustického hluku, které byly provedeny na několika malých turbínách ukázali, že ve vzdálenosti 40 metrů od jedné turbíny se hladina hluku pohybuje v rozmezí 50-60 dBa. Hladina hluku se samozřejmě mění s počtem větrných turbín. Například v domě vzdáleném 500 metrů od jedné turbíny byla naměřena hladina hluku 25-35 dBa, ve stejné vzdálenosti byl naměřený hluk generován deseti turbínami v rozmezí 35 – 40 dBa (Sun, 2008), což vzhledem k desetinásobnému počtu turbín není výrazný rozdíl. Záleží však na spoustě dalších

faktorů jako jsou vlhkost a teplota vzduchu, hlukové bariéry, odrazy a povrch terénu, po kterém dochází k šíření zvuku. Dalším velkým faktorem je hluk v pozadí. V noci může být hluk vnímán intenzivněji, protože ostatní hluky vznikající lidskou činností jsou utlumeny (Van Den Berg, 2004). Vzhledem k hluku vydávanému větrnými elektrárnami je doporučeno udržovat danou vzdálenost mezi elektrárnou a lidským obydlím, což se liší v každé zemi dle nařízení vlády a zdravotnických institucí. V České republice je podle zákona č. 258/2000 Sb. povolená hladina hluku v místě nejbližší budovy stanovena na 50 dB ve dne a 40 dB v noci. Vzhledem k tomu, že jsou stavěny ve vzdálenosti 700 až 1200 metrů od obydlí, jsou tyto limity bez problému dodrženy. Je důležité si uvědomit, že elektrárny vydávají hluk pouze když se otáčejí lopatky, tedy když fouká vítr a tak hluk z elektrárny může zanikat v okolním hluku.

Trvalé vystavení nadměrnému hluku může způsobit poruchy spánku a sluchové obtíže, vedoucí až ke ztrátě sluchu. Vystavení vysokým frekvencím může způsobovat bolesti hlavy, podrážděnost, únavu a celkové oslabení organismu. Shepherd et al. (2011) provedl dotazníkovou studii mezi lidmi žijícími v okruhu do dvou kilometrů od větrných elektráren. Ve výsledcích se ukázalo, že jen určitá část obyvatel vnímá negativní dopad elektrárny na kvalitu jejich života. Tito obyvatelé však nebyli smířeni s větrnou elektrárnou ve svém okolí a nepřipisovali jí žádné kladné body. Výsledky dotazníku tedy nebyli příliš směrodatné. V jiném výzkumu však bylo prokázáno, že lidé žijící v blízkosti větrných elektráren, nemající z nich žádný ekonomický prospěch, jsou ohroženi poruchami spánku a vznikem psychického stresu (Tabassum, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2014). Problém při určení negativního vlivu větrných elektráren na lidské zdraví je ten, že většina zdravotních příznaků je psychického rázu a těžko se prokazují. S velkou pravděpodobností se jedná o psychosomatické příznaky z důvodu nepřijetí větrné elektrárny v okolí postižených.

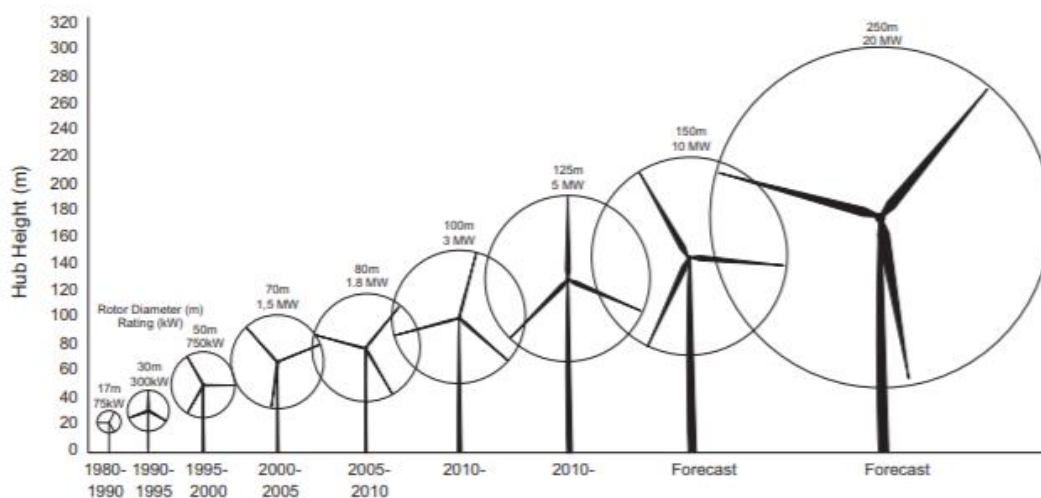


### 3.1.2.3 Vizuální rušení

Stínové problikávání neboli stroboskopický či disko efekt je efekt, který je způsoben pohybem lopatek přes sluneční svit a může mít vliv na lidské vnímání, pokud se zde setká několik faktorů, jako je vzdálenost od turbíny, počet provozních hodin a interakce se slunečním svitem (Harding, Harding, & Wilkins, 2008). Tento jev se dá velmi omezit speciálním nátěrem matnou například šedou nebo zelenou barvou. Kromě stínového problikávání je samotný vzhled větrné elektrárny pro některé lidi negativním prvkem v krajině a je vnímán jako vizuální rušení. Bishopova studie (Bishop, 2002) odhalila, že během dnů s jasnou oblohou, mohou být jednotlivé větrné turbíny spatřeny až ze vzdálenosti 30 kilometrů. S novým trendem stavění vyšších sloupů pro turbíny by neměl být tento problém ignorován, i když se jedná o problém zcela subjektivní. Pozitivní nebo negativní vnímání tohoto prvku v krajině může ovlivnit jeho přijetí a pohled na výrobu energie pomocí obnovitelných zdrojů. Někteří lidé vnímají větrné elektrárny jako velmi užitečnou alternativu výroby elektřiny, která snižuje negativní dopad výroby elektrické energie na životní prostředí, zatímco jiní lidé je vnímají jako prvky deformující krajinu na industriální či téměř robotické prostředí (Johansson & Laike, 2007). Hodnocení vlivu na vzhled krajiny je velmi obtížné, právě proto, že vnímání krajiny je zcela subjektivní.

Thayer & Freeman (1987) podnikli studii, která byla založena na průzkumu mezi obyvateli. Ukázalo se, že více ovlivněni jsou lidé žijící v bezprostřední blízkosti větrné elektrárny a lidé, kteří jsou velmi dobře obeznámeni s původním vzhledem krajiny. Většina dotazovaných preferuje turbíny v neutrálních barvách a klidně větší jednotlivé kusy než více kusů pohromadě. Jiný průzkum ukázal, že obecně jsou lidé nakloněni používání obnovitelných zdrojů energie, přesto pokud se má větrná turbína stavět v blízkosti jejich obydlí, zaujímají negativní postoj a to i přes fakt, že jinak vnímají její vliv na životní prostředí pozitivně. Tento jev je nazýván Not-In-My-Back-Yard syndrom, v češtině syndrom Ne-Na-Mém-Dvorku (Krohn & Damborg, 1999). Faktory ovlivňující intenzitu vizuálního vnímání zahrnují scénické pozadí, topografii a vzhled krajiny mezi pozorovateli a turbínou. Pokud je turbína nečinná, vypadá jako opuštěný stroj a to některým lidem vadí, stejně tak je většinou lidí negativně vnímána turbína s pouhými dvěma lopatkami. Záleží také na umístění turbíny, které může být na kopci, na pobřeží, v zástavbě, v pusté krajině a také na místě, ze kterého je pozorována. Pořád je to problém velmi subjektivní a vždy budou různé názory různých lidí protichůdné. Je tedy velmi těžké vybrat z těch mála

míst, kde má výstavba větrné elektrárny smysl tu, kde bude většina lidí spokojena s jejím umístěním (Tabassum et al., 2014).



Obr. 3: Zvětšování větrných turbín v historii, osa y zobrazuje výšku sloupu, číslice nad turbínou průměr rotoru. (Tabassum et al., 2014)

### 3.1.2.4 Rušení elektromagnetických vln

Elektromagnetické pole vznikající kolem větrné elektrárny je velmi slabé a s malým dosahem, přesto dokáže způsobit elektromagnetické rušení. Bacon (2002) objevil tři mechanismy, které mohou způsobovat rušení vln a to nearfield effect, diffraction effect a scattering effect. Nearfield effect je efekt blízkého pole a vzniká v blízkosti elektromagnetického zdroje, má nízkou impedanci a jeho charakter je především magnetický (Capps, 2001). Diffraction effect je česky difrakce – ohyb vlnění, jedná se o vychýlení vlny ze směru na hraně nějaké překážky (Visser & Wiersma, 1992). Scattering effect je rozptyl elektromagnetického vlnění. Jedna studie prokázala, že difrakce a odraz nebo rozptyl jsou hlavními faktory rušení rádiových vln. Stožáry větrných turbín mohou působit jako překážky a mohou mít vliv na rušení bezdrátových sužeb. Lopatky větrných turbín silně modulují vlnové signály tak, že může docházet k rušení elektromagnetických systémů, jako jsou televize, FM vysílání, mikrovlnné komunikační systémy a navigační systémy. Toto rušení může vyvolat takzvaná efekt ducha, což jsou bílé stíny na televizní obrazovce. Větrné turbíny mohou někdy způsobit zastíněnou zónu, která blokuje emitované vlny z transmitéru (Dai et al., 2015). Turbíny také někdy odrážejí rádiové vlny kvůli materiálům použitým na větrných turbínách. Nejnovější součásti turbín už jsou

vyráběny ze syntetických materiálů ve snaze minimalizovat elektromagnetické rušení (Dai et al., 2015).

### 3.1.2.5 Vliv na klimatické změny

S narůstajícím počtem větrných farem po celém světě se objevují spekulace o ovlivňování lokálního klimatu právě vlivem větrných elektráren. Různé studie ukázaly, že větrné turbíny mohou ovlivnit lokální počasí a regionální klima. V Mongolsku bylo podle dat z WSB (Water Statistics Bureau) neobvyklé sucho od roku 2005 a dle poskytnutých dat bylo toto sucho horší právě v okolí větrných elektráren (Chen & Blaabjerg, 2009). Na větrných polích v San Gorgoniu byla analyzována teplotní data z okolí větrné farmy a tato data vykazovala, že velké větrné farmy mohou měnit lokální teploty (Pantazopoulou, 2009). Ve středním Texasu proběhla studie sledující data během osmi let na území s 2358 větrnými elektrárnami, který ukázala celkové zvýšení teploty o 0,724 °C v dané oblasti. Studie taktéž ukázala, že zvýšení teploty bylo nejvíce pozorovatelné v noci. Wang & Prinn (2010) tvrdí, že kdyby 10 % veškeré energie bylo generováno větrnými elektrárnami, v roce 2100 by se globální teplota zvýšila o 1 °C. To podporuje i pokusná simulace klimatického vlivu větrných turbín s různými koeficienty odporu, která ukázala, že větrné farmy mohou ovlivňovat klima v kontinentální úrovni, ale jejich vliv na globální klimatické podmínky je zanedbatelný (Keith et al., 2004), ale předpokládáme-li, že nás v blízké době čeká velký nárůst větrné energie, mohou i zanedbatelné problémy způsobovat rozsáhlé katastrofy a je tedy důležité neustále prozkoumávat jejich vlivy (Harris, Zhou, & Xia, 2014). Větrné farmy taktéž ovlivňují rozdělení srážek a mraků. Tento oteplovací efekt větrných turbín je však v porovnání s růstem teploty způsobeným skleníkovými plyny velmi slabý.

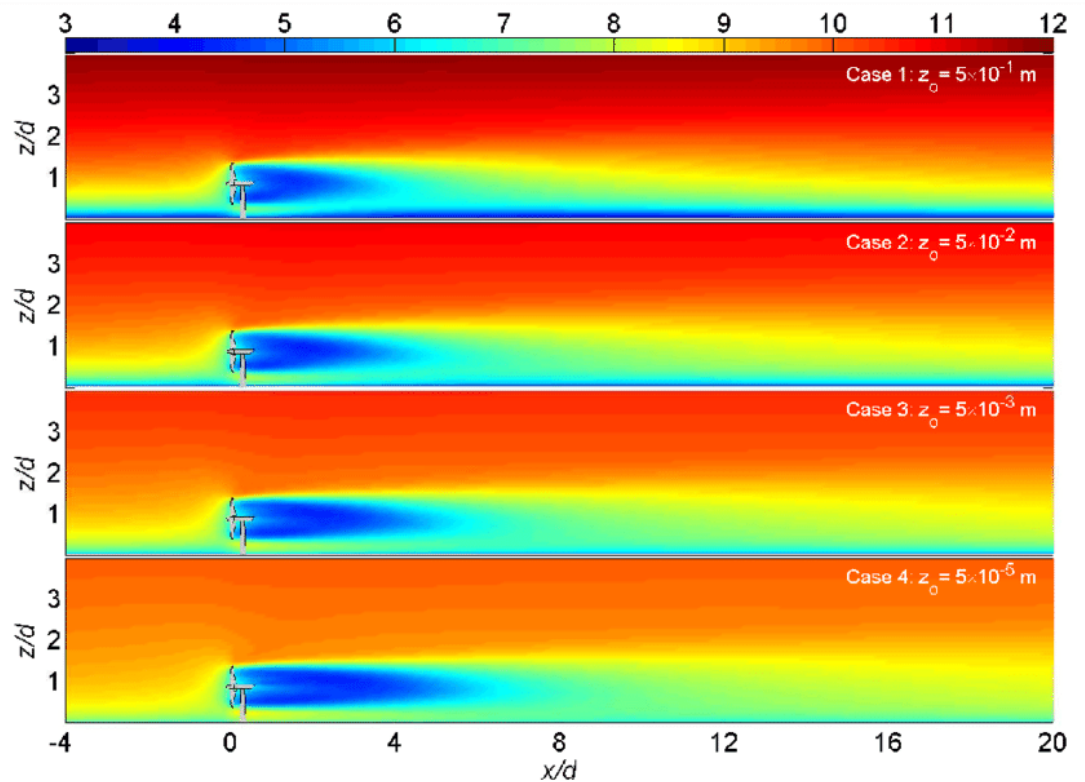
Výzkumem bylo prokázáno, že míra návratnosti rychlosti větru po průchodu větru přes větrnou elektrárnu má klesající křivku. Turbulence způsobená otáčením větrné turbíny může také ovlivnit promíchávání vzduchu. Příмым výsledkem vertikálního míchání vzduchu těsně nad zemským povrchem je ochlazovací efekt během dne a ohřívací efekt během noci. Ve stabilní atmosféře, kde vrstva teplého vzduchu překrývá vrstvu studeného vzduchu, může vertikální míchání způsobit, že se teplý vzduch dostane pod studenou vrstvu a dochází tak k ohřívání zemského povrchu. Na druhou stranu v nestabilní atmosféře s negativní mírou úbytku vertikálního míchání tlačí studený vzduch dolů a teplý vzduch nahoru, což má za následek ochlazování zemského povrchu (Baidya Roy & Traiteur, 2010). Toto

regionální ovlivnění klimatu může mít dlouhodobý vliv na život divokých zvířat a na regionální počasí. Na druhou stranu studie v čínské provincii Gansu ukázaly, že větrné farmy mohou lokálně zpomalovat rychlost větru a tím snížit hrozbu tvorby písečných bouří (Dai et al., 2015). Některé současné studie se zabývají možností ovlivňování lokálního počasí pomocí výstavby gigantických větrných farem.

Pro studium klimatického vlivu větrných elektráren se používají různé analytické metody a modely jako blade element momentum model a výpočetní dynamika tekutin. Blade element momentum theory je teorie momentu lopatek a vychází z kombinace teorie hybnosti a teorie lopatkových prvků. Používá se zejména k výpočtu místních sil působících na vrtuli nebo lopatky větrné turbíny. Tyto dvě teorie se kombinují pro zmírnění některých obtíží při výpočtu indukovaných rychlostí na rotoru. Barrie a Kirk-Davidoff (2010) použili obecný cirkulační model, aby simulovali větrné elektrárny jako prvky narušující hladkost povrchu. Výsledky jejich analýzy ukazují, že některé atmosférické anomálie v okolí větrných farem jsou důsledkem zpomalení rychlosti větru. Tyto anomálie rostou rychle podél směru ze shora k zemi ve formě různých tlakových změn. Výpočetní dynamika tekutin je odvozena z Navierovy-Stokesovi rovnice.

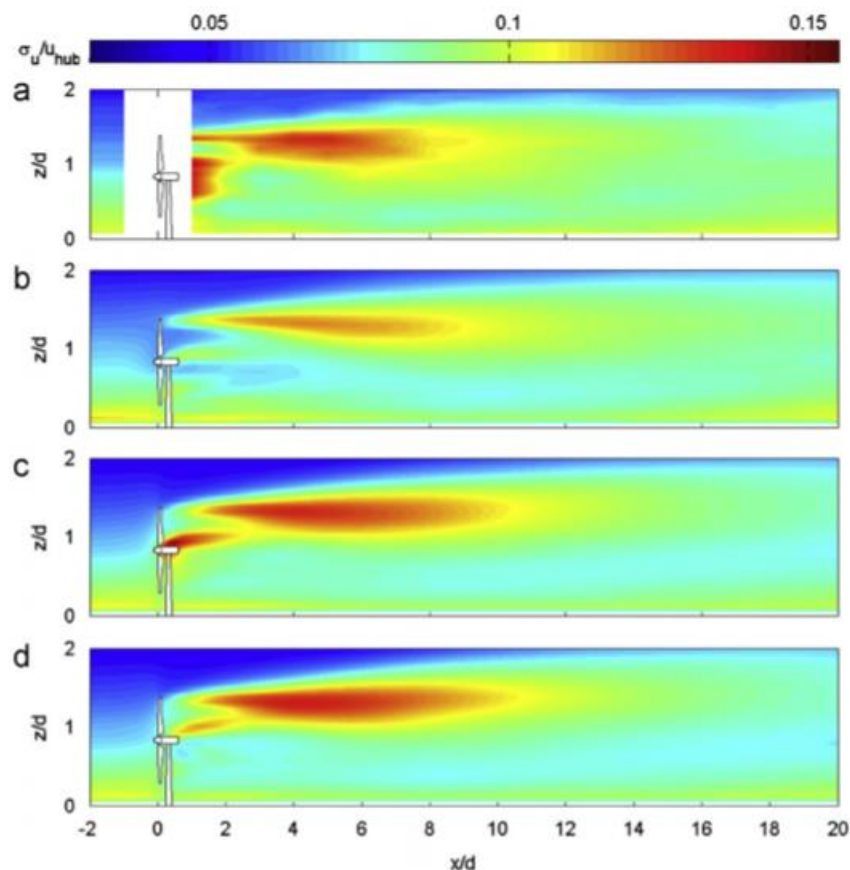
Nedávná studie v Texasu pracující s dálkovým průzkumem Země ukázala, že na větrných farmách dochází ke zvýšení lokální noční teploty o 0,31 až 0,7 °C, zatímco přes den nedochází k téměř žádným změnám. Vzhledem k malému množství nebo velikosti již fungujících větrných farem bylo vytvořeno několik hypotetických farem (Xia et al., 2016).

(Rajewski, 2013) uvádí, že po analýze několika větrných turbín a farem ve středozápadní zemědělské části USA bylo zjištěno zvýšení nočních teplot o 0,75 až 1,15 °C. Toto zjištění bylo součástí takzvaného Crop/Wind Energy Experiment (CWEX), tedy experimentu zkoumajícímu vliv větrných elektráren na zemědělství. Změny v tepelném toku ukazují prostorovou variabilitu intenzivního oteplování na lokální úrovni a vytváření cirkulace větru na sestupné větvi a naopak chladnou stopu na větvi sestupné. Tento jev, pokud jsou u sebe nejméně dvě turbíny, může zvýšit přenos tepla ze shora k povrchu země až o dvojnásobek. CWEX experiment na větrných farmách prokázal, že během dne s neproměnným větrem dochází u první turbíny ve směru větru k ochlazení vzduchu u povrchu země o 0,2 až 0,3 °C, u druhé turbíny je to pak 0,4 až 0,6 °C. Během noci s proměnným větrem bylo oteplení od 0,3°C (Rajewski, 2013) .



Obr. 4.: Obrisy časově zprůměrované průtokové rychlosti  $\underline{u}$  (m/s) ve střední vlné rovině kolmé k turbínám instalovaným na rovných plochách s různými hodnotami drsnosti. Červená barva symbolizuje největší rychlost. (Porté-Agel, Wu, Lu, & Conzemius, 2011)

Z obrázku číslo 4 je patrné, že rychlost větru za turbínou je velmi nízká a v úrovni přízemní vrstvy vzduchu nedochází k téměř žádné změně. Avšak v úrovni do výšky větrné elektrárny dochází k výraznému zpomalení proudu vzduchu. Naproti tomu u turbulencí (Obr. 5) dochází k přesně opačnému efektu a po průchodu vzduchu rotorem větrné elektrárny dochází k rozmíchávání vzduchu.



Obr. 5.: Obrisy intenzity turbulencí proudění za větrnou elektrárnou. Červená barva symbolizuje nejsilnější turbulence. (Porté-Agel et al., 2011)

V součtu všech argumentů je jasné, že dopad větrných elektráren na životní prostředí je velmi kontroverzním tématem. Nedá se popřít, že veškerá lidská činnost má na životní prostředí nějaký vliv. Za předpokladu velkého rozmachu větrné energie v blízké budoucnosti mohou veškeré současné problémy malého měřítka narůst do katastrofálních následků, a proto je nemůžeme ignorovat, ale musíme zkoumat (Dai et al., 2015).

### 3.1.3 Zmírnění dopadu větrné energie na životní prostředí

Všechny předem definované dopady větrné energie na životní prostředí jej mohou výrazně ovlivnit. Tyto dopady by měly být dobře prozkoumány a zváženy před samotným plánováním realizace a výstavby.

### **3.1.3.1 Omezení dopadu na ptactvo a netopýry**

Ke snížení úmrtnosti ptactva vede několik strategií. Jednou z nich je omezení aktivit výstavby během období, kdy se ptactvo nerozmnožuje. Jako prospěšné se ukázaly změny v designu turbín, například zvětšení jednotlivých lopatek a celkové zpomalení rychlosti otáčení rotoru může snížit mortalitu ptactva (Smallwood & Karas, 2009). Velký vliv má i vzhled turbíny, protože podle McIsaaca (2001) turbíny s barevným vzorem zvyšují šanci, že je dravci uvidí a vyhnou se jim. Dalším řešením jsou turbíny, které se sami automaticky zastaví, pokud se k nim pták přiblíží na určitou vzdálenost. Tento nápad byl testován v praxi a výsledek ukázal, že úmrtnost ptáků může klesnout až o 50 %, zatímco úbytek vyrobené energie klesne jen 0,07 %.

### **3.1.3.2 Omezení negativního dopadu na klima**

Ke zmírnění meteorologického vlivu větrných farem by měli být omezeny turbulence vytvářené rotorem. Společně s vylepšeným rotorem a upraveným designem lopatek může dojít ke zmírnění hydro-meteorologického dopadu. Dále je doporučeno umisťovat větrné farmy do míst, kde je výskyt větru velmi častý a vítr silný, a kde je velký třecí rozptyl. V těchto místech bude větrná energie sbírána místo toho, aby se ztrácela ve tření. Důsledkem této strategie je zvýšení účinnosti větrných farem (Leung & Yang, 2012).

### **3.1.3.3 Redukce hluku**

Vylepšený vzhled lopatek je klíčem ke snížené hluku. Ve fázi plánování designu lopatek se musí nalézt optimální balanc mezi šířením hluku a produkcí dostatku energie. Správný tvar lopatek může významně snížit aerodynamický hluk. Aplikace turbín, do kterých vítr fouká po směru osy turbíny (upwind) pomáhá ke snížení frekvenčního rozsahu hluku (Dai et al., 2015).

## 3.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země je bezkontaktní metoda získávání informací o objektech. Metoda je založena na principu získávání informací pomocí části spektra elektromagnetického záření. Definice dálkového průzkumu Země (anglicky remote earth sensing) je velké množství. Zde si uvedeme například definici od Lillesanda a Kiefera (Lillesand R.W., 2015), která zní „Dálkový průzkum je věda a umění získávat užitečné informace o objektech, plochách či jevech prostřednictvím dat měřených na zařízeních, která s těmito zkoumanými objekty, plochami ani jevy nejsou v přímém kontaktu.“. Dálkový průzkum Země (DPZ) patří mezi tzv. geoinformační technologie, což jsou technologie sbírající data o zemském povrchu včetně jejich následného zpracování, analyzování a vyhodnocení (Halounová & Pavelka, 2008).

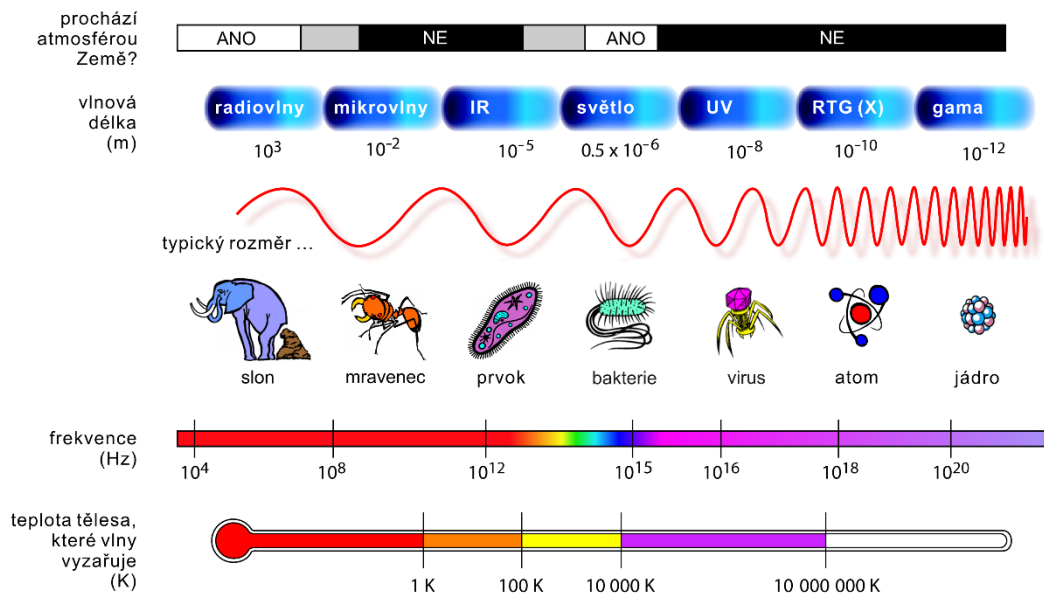
Důležitým aspektem DPZ je rozdělení elektromagnetického spektra. Vlnová délka záření se značí  $\lambda$  a jak už název napovídá, měří se v délkových jednotkách, elektromagnetické záření má také frekvenci  $f$ , a pro jejich vzájemný vztah platí, že

$$c = \lambda \cdot f$$

kde  $c$  je rychlost světla,  $\lambda$  je vlnová délka a  $f$  je frekvence, tedy čím kratší vlnovou délku záření má, tím vyšší má frekvenci (Oršulák, 2010). To dělíme na radiové záření, jehož vlnová délka  $\lambda$  je od 10 centimetrů do 3 kilometrů, mikrovlnné záření –  $\lambda$  je 1 milimetr až 1 metr, infračervené (IR) záření, jehož  $\lambda$  je 1 milimetr až 0,72 mikrometru a dále se dělí na blízké IR ( $\lambda=0,72$  až 0,3 mikrometru), střední IR ( $\lambda=1,3$ -4,0 mikrometru), daleké IR neboli termální ( $\lambda=4$ -25 mikrometrů) a submilimetrové vlny  $\lambda > 100$  mikrometrů. Dále je zde viditelné záření o vlnové délce 380 až 720 nanometrů, které je produkováno slunečním zářením a je jedinou částí spektra, kde lze očima rozeznávat barvy. Vedle fialové barvy se nachází ultrafialové (UV) záření o vlnové délce 30 – 380 nanometrů a dále a X a gama-záření, kde hodnota jejich vlnové délky je od  $10^{-16}$  metru. (Sankaran & Ehsani, 2014) Z obrázku číslo 6 je patrné, že atmosférou prochází radiové záření, viditelné světlo a část infračerveného a mikrovlnného záření. V souvislosti s dálkovým průzkumem Země jsou možnosti využití elektromagnetického záření tedy limitovány na tuto část spektra.



# ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM



Obr. 6.: Rozdělení elektromagnetického spektra (Aldebaran.cz)

Každý objekt vyzařuje elektromagnetické záření a může jej i pohlcovat, odrážet anebo propouštět (Pavelek a kol., 2007). Tepelné záření je takové elektromagnetické záření, které transportuje tepelnou energii. Pokud má těleso teplotu vyšší než je absolutní nula (0 K nebo  $-273,15^\circ\text{C}$ ), tak vyzařuje tepelné záření (Malíšek, 1971). Existuje definice absolutně černého tělesa, která slouží k odvození několika fyzikálních zákonů. Toto černé těleso je takové ideální těleso, které pohlcuje veškeré dopadající záření a zároveň vyzařuje maximální energii na všech vlnových délkách (Kreidl, 2005). Tepelné neboli termální záření se od ostatních elektromagnetických záření liší jak svými vlastnostmi, tak i způsobem snímání. U takových vlnových délek převažuje nad odraženým slunečním zářením vlastní záření tělesa a to umožňuje získat hodnotu radiační teploty. Radiační neboli jasová teplota je měřena pomocí termálního snímání na rozdíl od kinetické teploty, kterou měříme například teploměrem uvnitř tělesa (Dobrovolný, 1998).

Mezi fyzikální zákony spojené se snímáním termálního záření patří Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon a Stefan-Bolzmannův zákon. Z Planckova zákona lze vypočítat funkci vlnové délky záření a teploty zářiče, tedy vztah pro spektrální hustotu zářivého toku dokonale černého tělesa ve vakuu. Weinův zákon říká, že maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku se posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám s rostoucí teplotou zářiče. Poslední

z těchto zákonů - Stefan-Bolzmannův – říká, že každé těleso s nenulovou absolutní teplotou září a hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Tento zákon také definuje hustotu zářivého toku i pro šedé povrchy neboli nedokonalé zářiče (Pavelek a kol., 2007).

Satelitem snímané záření prochází atmosférou a to jak směrem dovnitř, tak směrem ven. Složení atmosféry ovlivňuje záření třemi způsoby – rozptylem, pohlcováním a samostatným zářením atmosféry. Rozptyl je vlastně odklon záření od původního směru. Existují tři druhy rozptylu. Jde o Rayleighův molekulární rozptyl, který je způsobem velmi malými částicemi, menšími než je vlnová délka daného záření. Aerosolový rozptyl, který je způsoben částicemi prachu, pylu nebo vodní páry a neselektivní rozptyl způsobený například kapkami vody. Pohlcování znamená, že je záření pohlcováno molekulami atmosféry, zejména ozonem (O<sub>3</sub>), který pohlcuje UV záření a oxidem uhličitým (CO<sub>2</sub>), který pohlcuje IR záření a také způsobuje vznik skleníkového efektu (Oršulák, 2010).

Princip měření pomocí elektromagnetického záření je měření vyzářeného neboli emitovaného, odraženého a rozptýleného elektromagnetického záření, které dopadá do zorného pole přístroje a nese informace o vlastnostech tělesa. Měřeny jsou různé vlastnosti elektromagnetického záření jako například: amplituda, polarizace, frekvence, a fáze. Pro zjišťování teploty povrchu země se používá část spektra – tepelné infračervené záření. Mezi přírodní zdroje záření patří Slunce a Země. Sluneční záření neboli solární radiance vzniká v důsledku jaderných přeměn v jádru Slunce. Toto záření tvoří většinu veškeré energie na zemi a je vyzařováno na všech vlnových délkách. Zemské záření má maximální vlnovou délku 10 mikrometrů (Halounová & Pavelka, 2008). Při měření teploty povrchu země hraje velkou roli pokryv země. Pro různé druhy půdy a zatrávnění je hodnota emisivity pro tyto povrchy od 0,92 do 0,98 (Sumner, 1999). Pro účel měření teploty různých povrchů pomocí vzdálených metod je nutností měřit energii, kterou povrch sám vyzařuje. Tato energie je závislá na energii, která na povrch dopadá. Množství této energie vychází ze zákona zachování energie.

$$M=M_a+M_R+M_T$$

M je intenzita záření, které dopadá na povrch, M<sub>a</sub> je intenzita záření, které je tělesem pohlcováno, M<sub>R</sub> je intenzita záření, které je odraženo a M<sub>T</sub> je intenzita záření, které je propouštěno. Z této rovnice lze definovat tři charakteristiky popisující vztah mezi vlastnostmi povrchu reagovat na elektromagnetické záření. Jedná se o

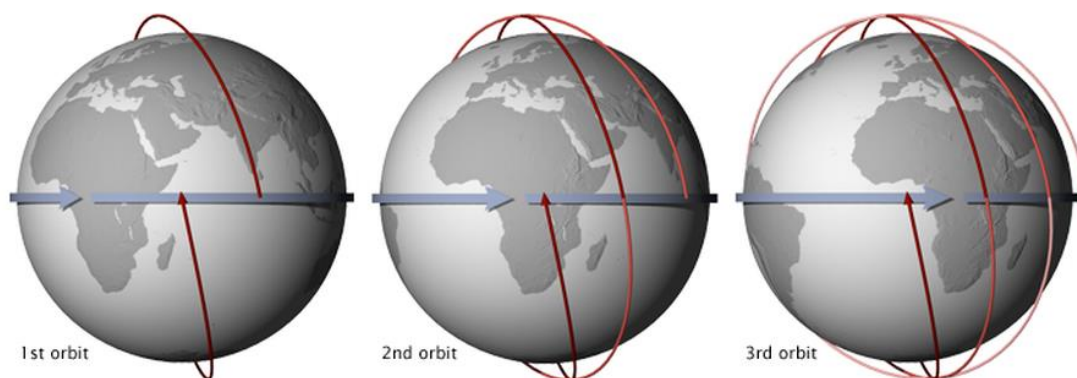
$\alpha(\lambda)$  – pohltivost,  $\rho(\lambda)$  – odrazivost a  $\tau(\lambda)$  – propustnost. Pro vztah mezi těmito charakteristikami platí:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Kirchhoff uvádí, že každá látka dokáže nejlépe pohlcovat ty vlnové délky, které sama nejsilněji vyzařuje (Agassi, 1967). Teplotní snímky jsou nejčastěji v odstínech šedé barvy, kde nejsvětlejší tóny znamenají nejteplejší místa na povrchu. Mraky jsou na snímcích ve viditelném spektru zobrazovány bíle z důvodu velmi silné odrazivosti oblaků (Dobrovolný, 1998). Na termálních snímcích jsou naopak zobrazovány černě z důvodu velmi nízké teploty vůči povrchu země.

### 3.3 Družice Landsat

Družice neboli satelit je objekt, vyskytující se na oběžné dráze jiného tělesa. Družice jsou přírodní nebo umělé. Přírodní družicí planety Země je Měsíc. Jednotlivé umělé družice mohou být stacionární nebo pohyblivé. Stacionární družice se vyskytují nad stále stejným místem, kdežto pohyblivé družice obíhají planetu. Družice pro dálkový průzkum Země, jako je Landsat, obíhají planetu tak, aby zmapovaly téměř celou zeměkouli. Mají tedy téměř polární oběžnou dráhu, která je synchronní se sluneční oběžnou dráhou.



Obr. 7: Letová dráha družice Landsat (NASA, 2018)

Program Landsat běží od roku 1970, kdy NASA (National Aeronautics And Space Administration) začala budovat první družici, tedy Landsat 1. Data v archivech jsou uchovávána již od roku 1972. Tyto družice nám poskytují již 46 let snímky zachycující například změny v krajině nebo kvalitu vody (NASA, 2018). Pro

tuto práci byly brány do úvahy pouze dvě družice z tohoto programu a to jsou Landsat 7 a 8 z důvodu období, ve kterém byly aktivní. Družice Landsat 7 má však od roku 2003 problémy s kvalitou snímků, na kterých se objevují pruhy a použitelná část ze snímků tvoří cca 12% a jejich zpracování je velmi obtížné. V roce 2013 došlo k výměně plně funkční, ale horší Landsat 5 za Landsat 8, a protože zkoumaná větrná farma započala svůj provoz právě v tomto roce, snímky použité v této práci pocházejí z družice Landsat 8.

### **3.3.1 Družice Landsat 8**

Landsat 8 byla vypuštěna 11. února 2013. Celou zeměkoulí obletí za 99 minut a za 16 dní ji celou zmapuje. Tepelný infračervený senzor (TIRS) na družici Landsat 8 je nejnovější tepelný senzor v celé sérii družic Landsat. Oproti předchozím jednokanálovým sensorům používá TIRS kanály dva a to pro pokrytí pásma 10,9 - 12,5 mikronů. Operuje se dvěma nástroji, které snímají současně a navzájem nezávisle. Provozní pozemní kamera (Operational Land Imager), která snímá viditelné spektrum blízko infračerveného spektra a krátkovlnné infračervené spektrum na devíti kanálech. Cílem mise je pokračovat ve sbírání a archivování multispektrálních snímků započaté předchozími družicemi Landsat. Datové produkty jsou poskytovány veřejnosti zdarma skrze U.S. Geological Survey (Reuter et al., 2015).

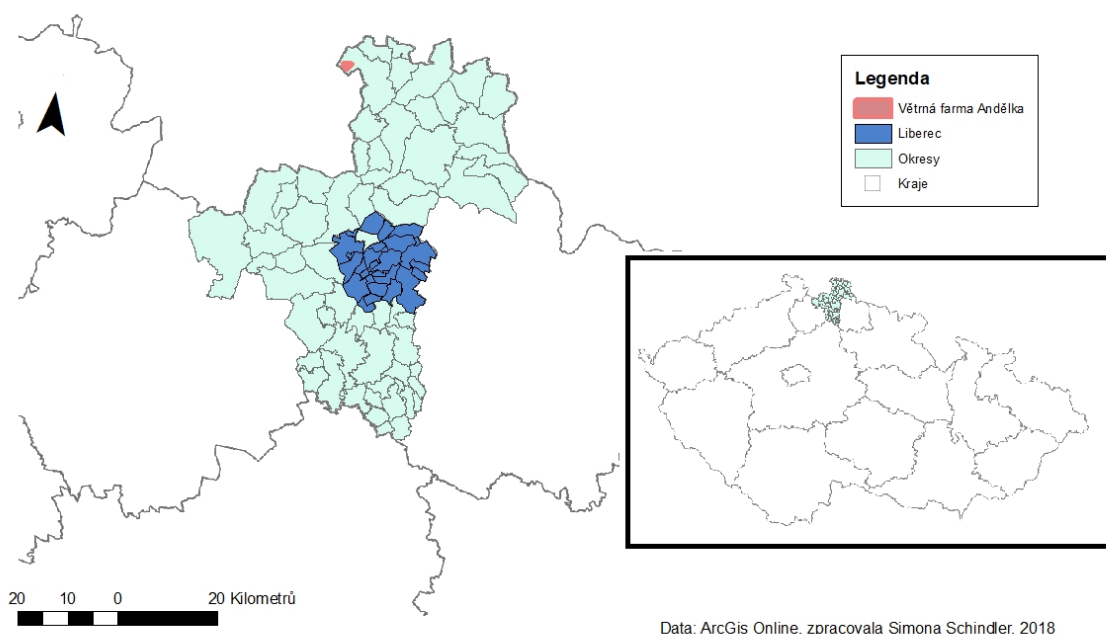
Tyto dva kanály TIRS byly vybrány tak, aby umožnily atmosférické korekce tepelných dat (Arvidson, Barsi, Jhabvala, & Reuter, 2013). Každou sekundu je pro každý kanál pořízeno 70 snímků. Kanál 10,9 mikronu saturuje cílové teploty okolo 400K, zatímco kanál 12 mikronů saturuje teploty okolo 370K. TIRS má rozlišení 100m, což je méně než měl Landsat 7, ale snížení rozlišení pixelů umožnilo dostatečné saturování a tedy i snímání pomocí dvou kanálů (Irons, Dwyer, & Barsi, 2012).

## 4 CHARAKTERISTIKA ÚZEMÍ

### 4.1 4.1. Větrná farma Andělka

Větrná farma Andělka se nachází v části obce Višňová v okrese Liberec na jižním až jihovýchodním svahu zvaném Větrný vrch. Celé území tvoří zemědělské pozemky.

Umístění větrné farmy Andělka v rámci Libereckého kraje



Obr. 8: Umístění větrné farmy Andělka v rámci Libereckého kraje

Z ekologického hlediska je podstatné nejbližší nadregionální centrum, které se nachází ve vzdálenosti 4,2 km a nadregionální biokoridor ve vzdálenosti cca 2,9 km. Ve vzdálenosti 14 km se nachází ptačí oblast, kde je chráněn tetřívěk obecný a sýc rousný. Nejbližší evropsky významnou lokalitou je tok Smědá, který je vzdálen 2,1 km. Průměrná teplota v lednu je v této lokalitě -3 °C až -4 °C, v dubnu 7 °C až 8 °C a v červenci 17 °C až 18 °C (Motl, 2008).

Provoz větrné farmy byl zahájen 1. srpna 2013. Sestává ze šesti větrných elektráren firmy REpower typu Enercon E-82. Jednotlivé stožáry jsou vysoké 108 m a každá turbína REpower má výkon 2050 kW. Na území stojí ještě jedna starší větrná elektrárna typu Enercon E-70 z roku 2008. V České republice se řadí mezi třetí největší větrnou farmu a také je jednou z nejnovějších. V porovnání se světovými větrnými farmami je však malá. Největší větrnou farmou je čínská Gansu s počtem turbín 3500 a instalovaným výkonem 5160 MW, přičemž toto číslo není konečné. Farma je stále ve výstavbě a v roce 2020 by měla vyrábět až 20 000 MW. Největší větrnou farmou v České republice jsou Kryštofovy Hamry s 21 turbínami a celkovým instalovaným výkonem 42 MW.

Při výběru lokality pro výstavbu větrné farmy se přihlíželo zejména k dostatečnému větrnému potenciálu s volným prostorem pro zajištění laminárního proudění větru. Úkolem bylo vyhnout se chráněným územím a ochranným pásmům, neohrozit existenci citlivých ekosystémů, respektovat převažující tahy avifauny a systém NATURA 2000 a dodržet vzdáleností od obydlených objektů v souvislosti s hlukovými emisemi. Hustota výkonu větru ve 40 metrech nad povrchem byla stanovena na 120-150 W/m<sup>2</sup> (Motl, 2008).

## 5 METODIKA

V této práci byla zpracována data z družice Landsat 8, která jsou zdarma poskytována na webových stránkách U.S. Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov>). K získání dat je potřeba provést registraci. Po přihlášení je možné stahovat libovolné snímky z družic Landsat podle potřebných kritérií. Do kritérií je možné si zvolit místo, datum, datovou sadu a například procentuální pokrytí snímku oblačností. Posledním krokem je záložka s názvem results – výsledky, kde je možnost vybrání snímku dle zadaných kritérií. Po vybrání snímku je již možné jej stáhnout a to buď snímek v přírodních barvách, termální snímek, kvalitativní snímek, snímek s geografickou referencí nebo celý datový produkt GeoTiff. Stažený soubor je pojmenován například takto:

LC08\_L1GT\_192024\_20150419\_20170409\_01\_T1

LC08 znamená, že data pocházejí z družice Landsat 8, L1TP znamená – Level 1 GeoTIFF a 20150419, což vyjadřuje datum 19. dubna z roku 2015.

## 5.1 Zpracování dat v ENVI

ENVI software byl vytvořen americkou společností Exelis VIS – Exelis Visual Information Solution, která poskytuje software nejen pro zpracování dat z dálkového průzkumu Země. ENVI je navrženo pro zpracování družicových snímků, ale dokáže pracovat i s vektorovými daty a geodatabázemi a podporuje mimo jiné i panchromatické, multispektrální a termální snímky, které snímají právě družice Landsat. Pomocí funkce *Data Manager* byl zvolen kanál thermal (termální kanál), který je složen ze dvou měření na různých vlnových délkách a to 10,9 a 12 mikronů. Pro zjištění teploty povrchu země byla použita rovnice:

$$LST = BT / (1 + w * (BT / \rho) * \ln(e))^{[1]}$$

e - emisivita povrchu země ( $0,004 * PV + 0,986$ )

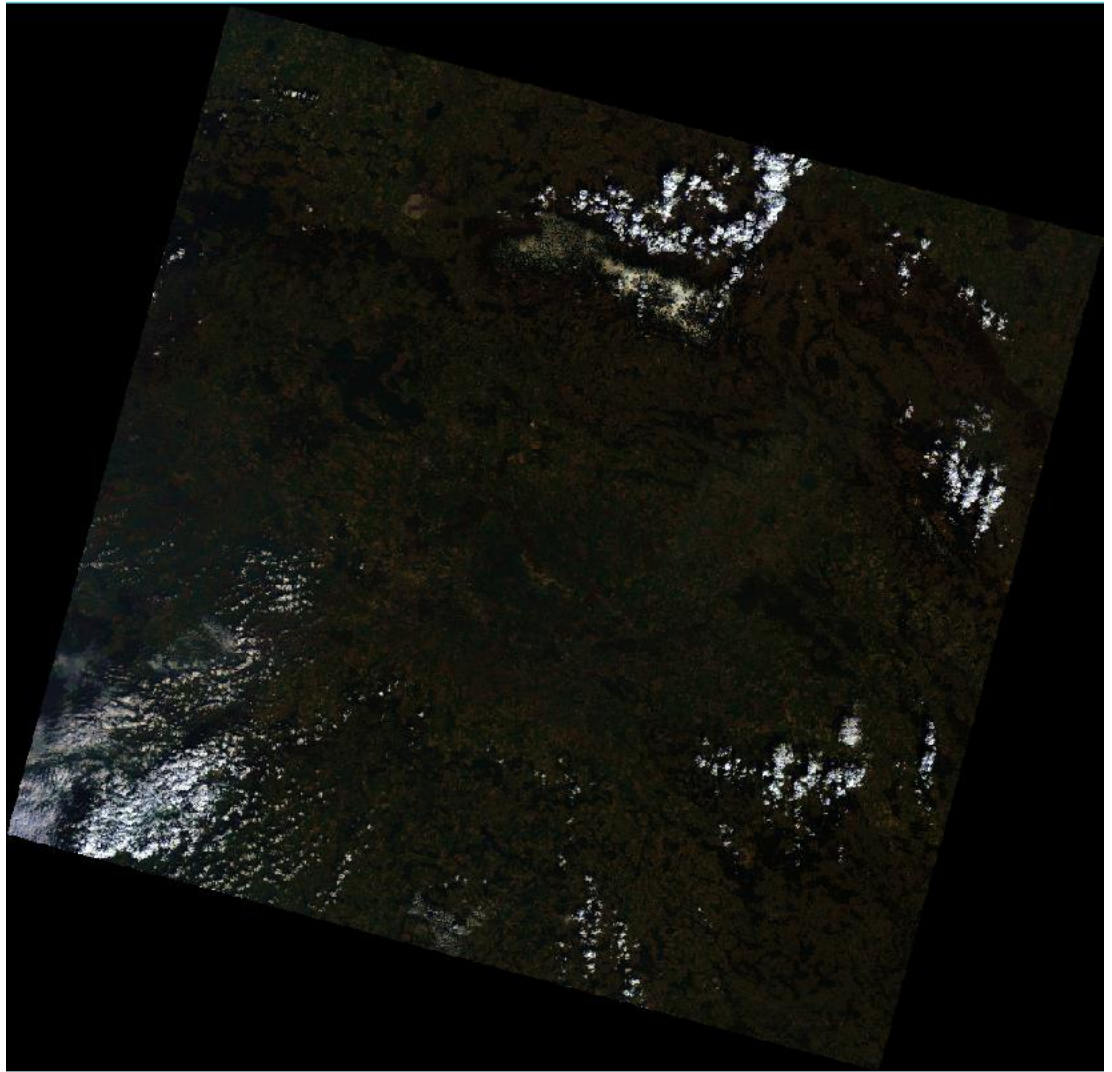
w – vlnová délka vyzářené radiance

BT – jasová teplota, změřená na satelitu

PV – proporce vegetace  $(NDVI - NDVI_{min} / NDVI_{max} - NDVI_{min})^2$

[1] – (Sobrino, Jiménez-Muñoz, & Paolini, 2004)

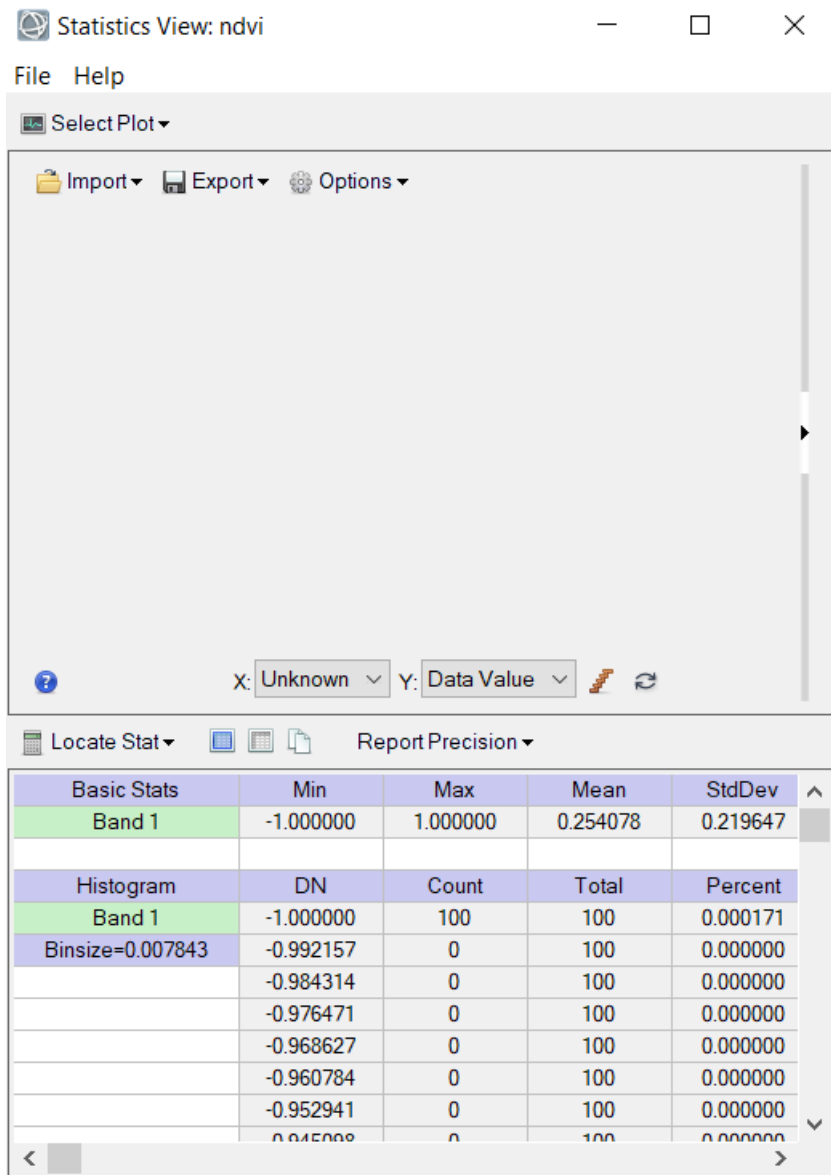
Prvním krokem bylo vytvoření rastru reflektance z multispektrálního snímku, pomocí funkce *Radiometric Calibration* (radiometrická kalibrace) a zvolení druhu kalibrace - reflektance. Soubor byl pojmenován *Multispectral\_reflectance.dat*.



Obr. 9.: Multispektrální v přirozených barvách snímek vstupující do ENVI.

Dalším krokem bylo zjištění hodnot NDVI (**N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex, vegetační index) na snímku. K tomuto kroku slouží funkce s názvem *NDVI*. Jako výchozí soubor byl zvolen soubor: *Multispectral\_reflectance.dat* a soubor byl uložen pod názvem *NDVI*. Následně byly pomocí funkce *Quick Stats* (rychlá statistika) zobrazeny hodnoty NDVI a to včetně minima, maxima, průměru a součtu všech hodnot NDVI na snímku. Pro další výpočet bylo důležité zjistit právě minimální a maximální hodnotu.





Obr. 10.: Statistika hodnot NDVI v programu ENVI.

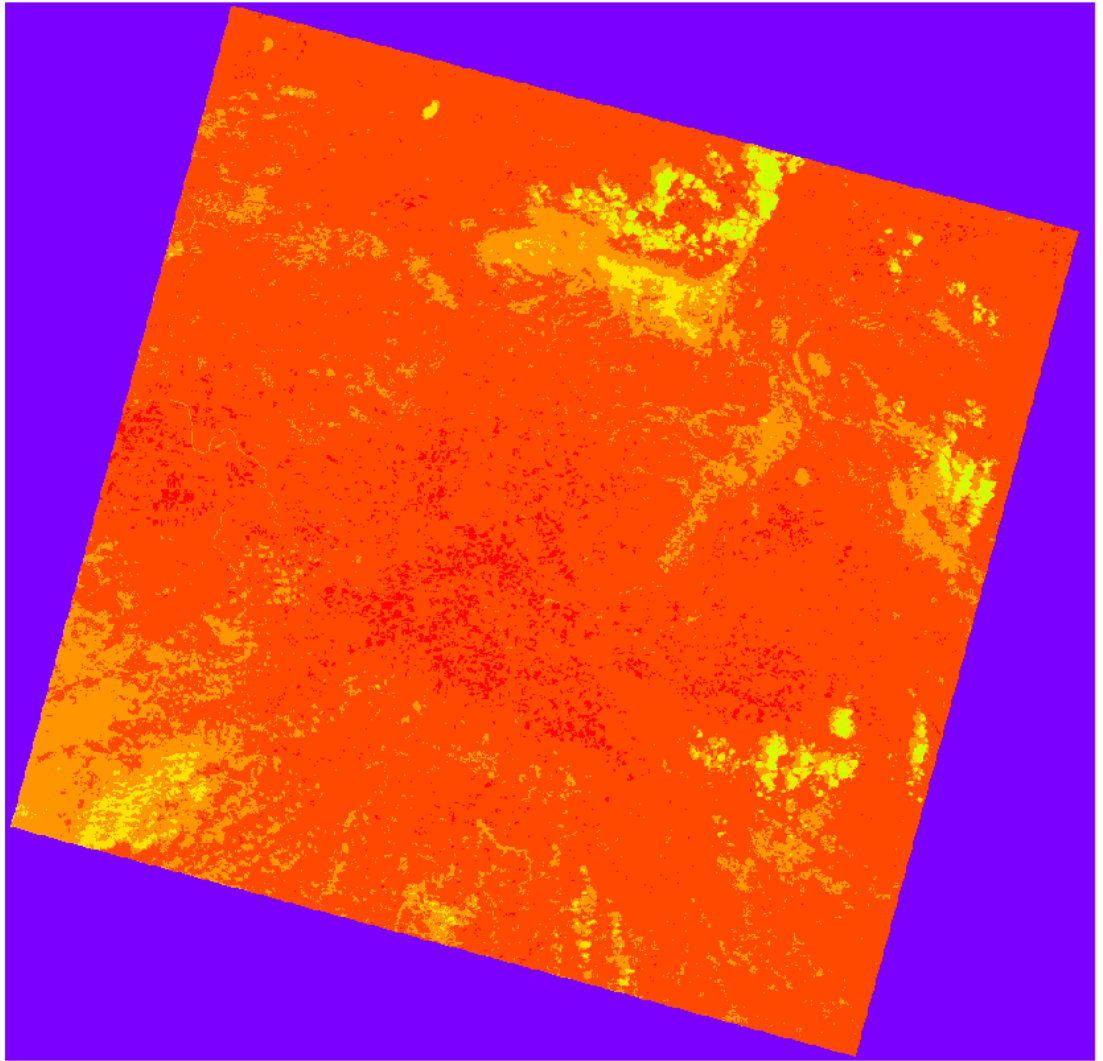
V dalším kroku byla pomocí funkce *Band Math* vypočtena hodnota PV, tedy vegetačního pokryvu. Do funkce vstupovala rovnice ve tvaru  $(B1 - (-1,0000)) / (1,0000 - (-1,0000))^2$ , podle rovnice pro výpočet PV. ZA proměnnou B1 byl dosazen rastr s názvem NDVI\_reflectance.dat. Výsledná vrstva byla uložena a pojmenována jako PV.dat.

V následujícím kroku byla vypočtena proměnná e, tedy emisivita, a to opět pomocí funkce *Band Math*. Rovnice pro výpočet měla tvar  $0,004 * (B1) + 0,986$ . Po

uložení a potvrzení rovnice bylo opět nutné vybrat hodnotu pro proměnnou a to tentokrát vrstvu PV a uloženo jako e.dat.

Dalším krokem bylo získání vrstvy BT, tedy jasové teploty. Pomocí funkce *Radiometric Calibration*, tentokrát z termálního kanálu byla zjištěna radianční a soubor byl uložen jako TIR\_radiance.dat. Dalším krokem bylo zjištění jasové teploty pomocí funkce *Radiometric Calibration* se zvoleným druhem kalibrace *Brightness Temperature*. Vzniklá vrstva byla uložena pod názvem TIR\_BT.dat Poté pomocí funkce *Band Math* byla jasová teplota převedena z Kelvinů na stupně Celsia odečtením 273,15. Výsledek byl pojmenován TIR\_BT\_273.

Posledním výpočetním krokem pomocí funkce *Band Math* byl výpočet celkové rovnice LST. LST vychází z názvu „Land Surface Temperature“ neboli teplota povrchu země. Tato rovnice byla zadána ve tvaru  $(B1/1)+((B2*(B1/14380))*\log(B3))$  dle rovnice LST. Pro proměnnou B1 to byl rastr TIR\_BT\_273. Pro proměnnou B2 byla zvolena vrstva Thermal Infrared 10,9 ze skupiny TIR\_radiance.dat a pro proměnnou B3 vrstva e.dat. Výsledný soubor byl uložen pod názvem LST.dat.



Obr. 11.: Výsledný teplotní snímek z programu ENVI v uživatelem definované barevné škále

Tento barevný snímek nemohl být uložen do formátu TIFF, protože se nejednalo o samostatnou vrstvu, pouze jiné zobrazení. V tomto formátu byl tedy uložen původní černobílý snímek LST, se kterým bylo dále pracováno v ArcMapu.

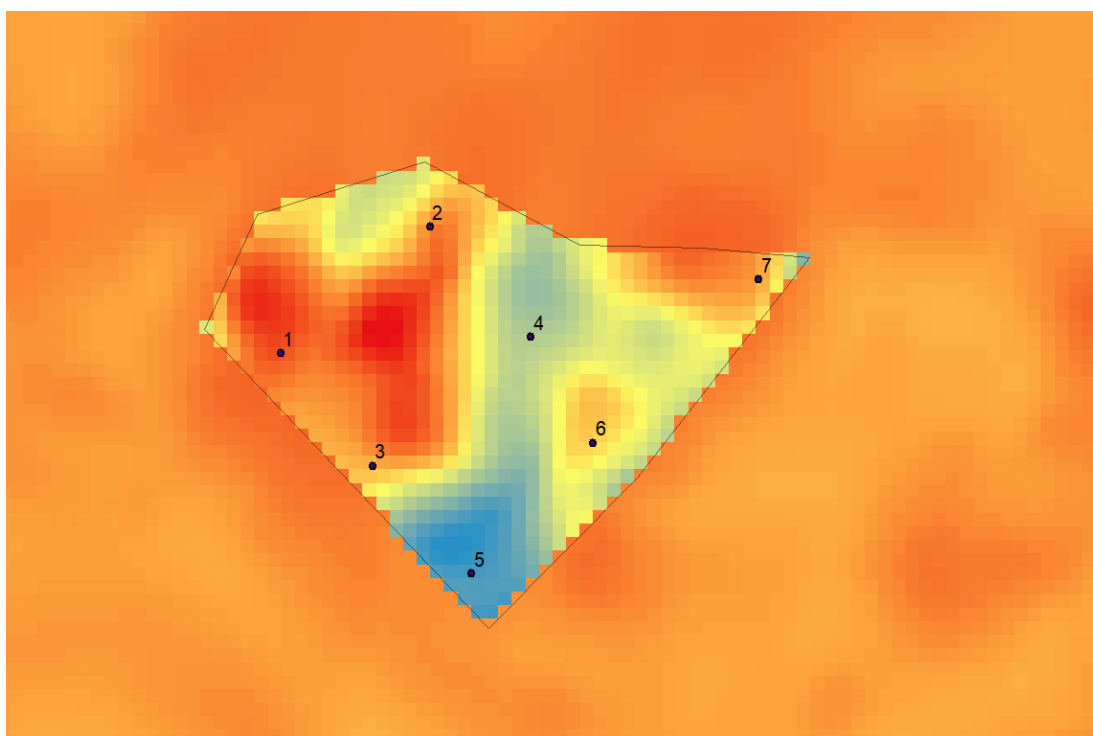
## 5.2 Zpracování dat v ArcMap

ArcMap je aplikace ArcGis Desktop, kterou vyvinula kalifornská firma ESRI – Enviromental Systems Research Institute, která se zabývá vývojem softwaru pro práci s geografickými daty.

Do programu ArcMap byly vloženy rastry teplot, které byly vytvořeny v programu ENVI. Nejprve bylo nutné zjistit, kde se na snímcích nachází větrná farma Andělka.

K tomu posloužila funkce *Georeferencing*, pomocí které byla georeferencována podkladová mapa ze serveru *mapy.cz* na které byly viditelné jednotlivé větrné elektrárny. Pozice jednotlivých elektráren byla poté ručně zvektorizována. Dalším krokem bylo vytvoření polygonu okolo celé větrné farmy pro znázornění vnitřního prostoru farmy, k čemuž byla použita funkce *Editor*. V následujícím kroku, byla vytvořena kilometrová oblast okolo větrné farmy, kde byla následně zkoumána teplota okolí farmy. K tomu byla použita funkce *Buffer*, do dialogového okna *Input Features* byla vložena vrstva s polygonem farmy, do políčka „Distance“ (vzdálenost) byly postupně vloženy hodnoty 1000 m, 4000 m a 5000 metrů. Tyto vzdálenosti vychází ze studie, že elektrárnami ovlivněné turbulence sahají do vzdálenosti 4,4 km a neovlivněná oblast se nachází ve vzdálenosti od 6,6 km (Zhou, Tian, Baidya Roy, Dai, & Chen, 2012). Pomocí stejné funkce byly vytvořeny obalové zóny okolo každé turbíny ve vzdálenosti 250 metrů. Tato vzdálenost vychází ze zkušenosti, že největší vliv má větrná turbína ve vzdálenosti 3 – 6 násobku průměru rotoru (Chamorro & Porté-Agel, 2011).

Pomocí funkce *Extract By Mask* byly oříznuty teplotní rastry z jednotlivých let na zájmová území.

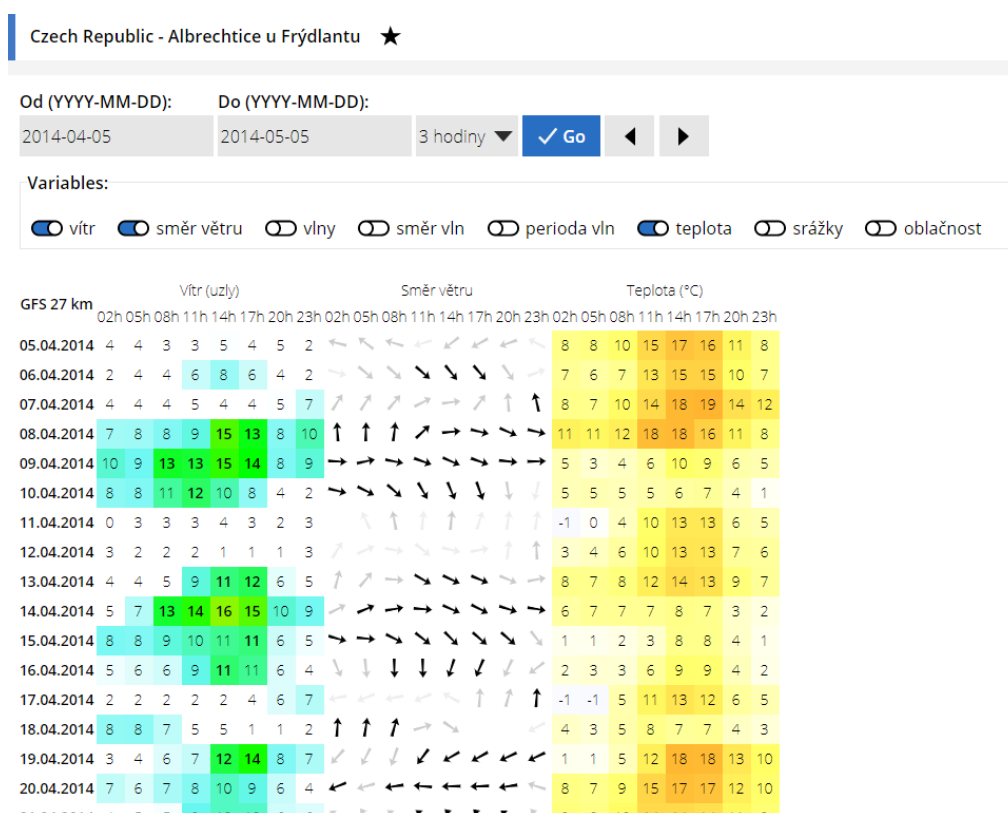


Obr. 12.: Výsledný rastr teplot uvnitř větrné farmy vytvořený pomocí funkce *Extract By Mask*

V následujícím kroku bylo nutné porovnat teploty vždy na dvou rastrech, původním z roku 2013 a po výstavbě větrné farmy. K tomu posloužila funkce *Cell Statistics* (statistika buněk). Pomocí této funkce byla zjištěna popisná statistika hodnot teplotních rastrů. Stejný postup byl zvolen i pro zpracování části mimo větrnou farmu.

Dále byl zjišťován vliv jednotlivých turbín na okolí uvnitř větrné farmy v závislosti na směru větru. Vzdálenost, která by mohla být ovlivněna větrnou turbínou, byla stanovena na 250 metrů i vzhledem k tomu, aby se jednotlivé výsledky neprolínaly. Pro výběr okolí větrné turbíny byla vybrána opět funkce *Buffer*, vstupní vrstva byla vrstva s jednotlivými turbínami a vzdálenost 250 metrů. Tento postup musel být proveden pro každou turbínu zvlášť. V tomto případě bylo možné použít *Model Builder* a práci si zjednodušit.

Dalším krokem bylo zjistit, jakým směrem foukal vítr v době, kdy byl teplotní snímek pořízen. K tomu posloužila webová stránka [www.winguru.cz](http://www.winguru.cz), která obsahuje archiv měření klimatických stanic. Bohužel data pro obec Višňová nebyla dostupná, tak byla zvolena obec Albrechtice u Frýdlantu, která byla z nabízených možností nejbližší.



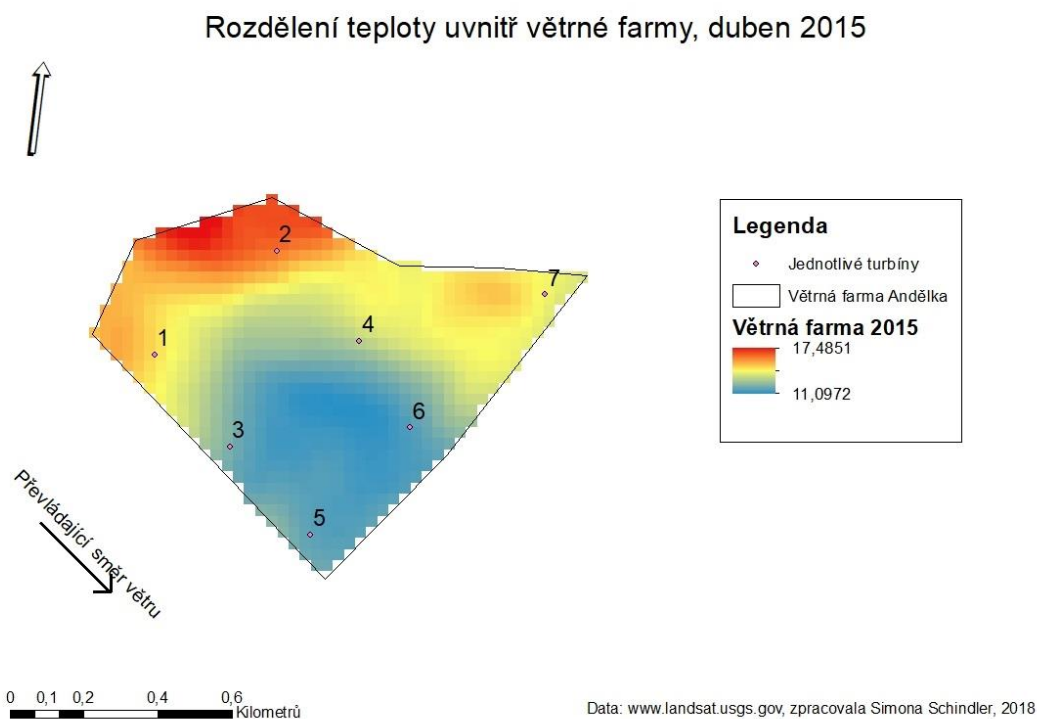
Obr. 13. : Archiv počasí (www.winguru.cz)

Z metadat snímků z družice Landsat byl získán čas, kdy byl snímek pořízen a to konkrétně 11:40 místního času, podle kterého byl určen směr větru. V následujícím kroku byly jednotlivé zóny okolo turbín rozděleny na části větrem ovlivněné a neovlivněné. K tomu posloužila funkce *Editor*, pomocí které byla do každé zóny zakreslena čára, kolmá na směr větru. Dále byl na tuto čáru dokreslen polygon, obsahující tu polovinu obalové zóny, která byla z hlediska směru větru před větrnou turbínou. Zbývající polovina byla získána pomocí funkce *Erase*. Výsledkem byly části obalových zón okolo turbín, ovlivněné větrem. V dalším kroku byla vybrána funkce *Extract By Mask*, kde vstupním rastrem byl teplotní rastr a jako maska byly zvoleny vytvořené zóny ovlivněné větrem. Pro zjednodušení by bylo opět vhodné použít funkci *Model Builderu*. Posledním krokem bylo zvolení barevné škály.

Na zjištění průměrných teplot v jednotlivých oblastech byla použita funkce *Zonal Statistics* a výsledky zaneseny do tabulek.

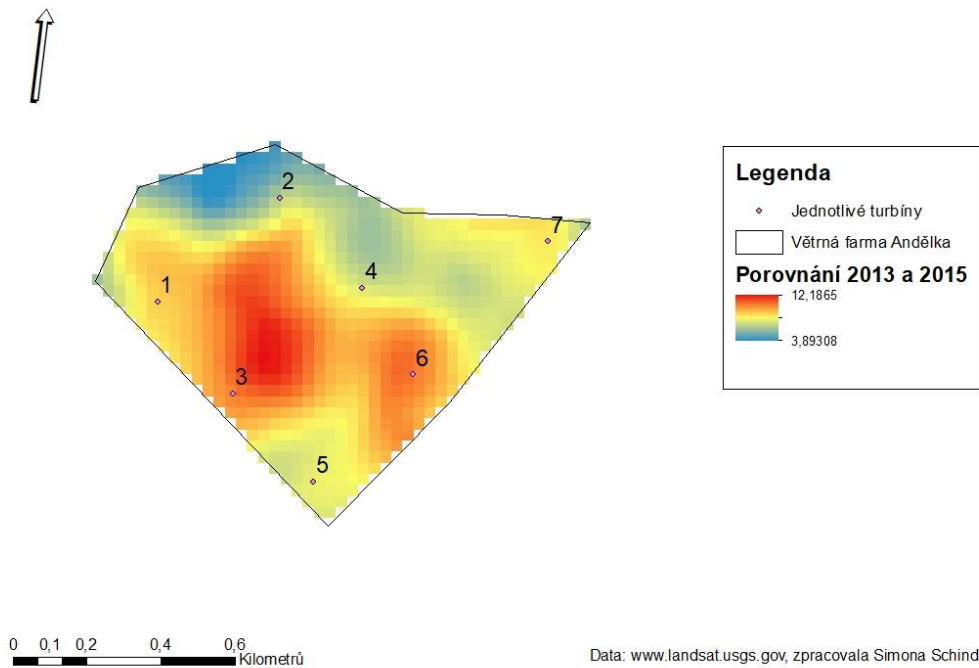
## 6 VÝSLEDKY

Výsledek porovnání hodnot teplot vybraných dnů v letech 2013, 2015 a 2016 ukazuje, že zejména v prostoru uprostřed větrné farmy byla teplota v roce 2013 vyšší vzhledem k okolní teplotě uvnitř větrné farmy. Je však patrné, že po výstavbě větrných elektráren došlo k jinému rozdělení teploty na povrchu. V roce 2013 foukal vítr s hodnotou 3m/s severním směrem. V roce 2015 foukal jihovýchodní vítr s průměrnou rychlostí 5 m/s. Bylo nutné vybrat takový den, kdy vítr dosahoval minimálně rychlosti 4 m/s, protože to je rychlost, při které se začínají roztáčet turbíny na větrných elektrárnách. V tomto směru je vidět akumulované ochlazení po průchodu prvními větrnými turbínami viz obrázek 14. Dne 7. května 2016 foukal severozápadní vítr o rychlosti 7 m/s.



Obr. 14.: Rozdělení teploty uvnitř větrné farmy v dubnu 2015

## Porovnání rozdělení teplot uvnitř větrné farmy, rok 2013 a 2015

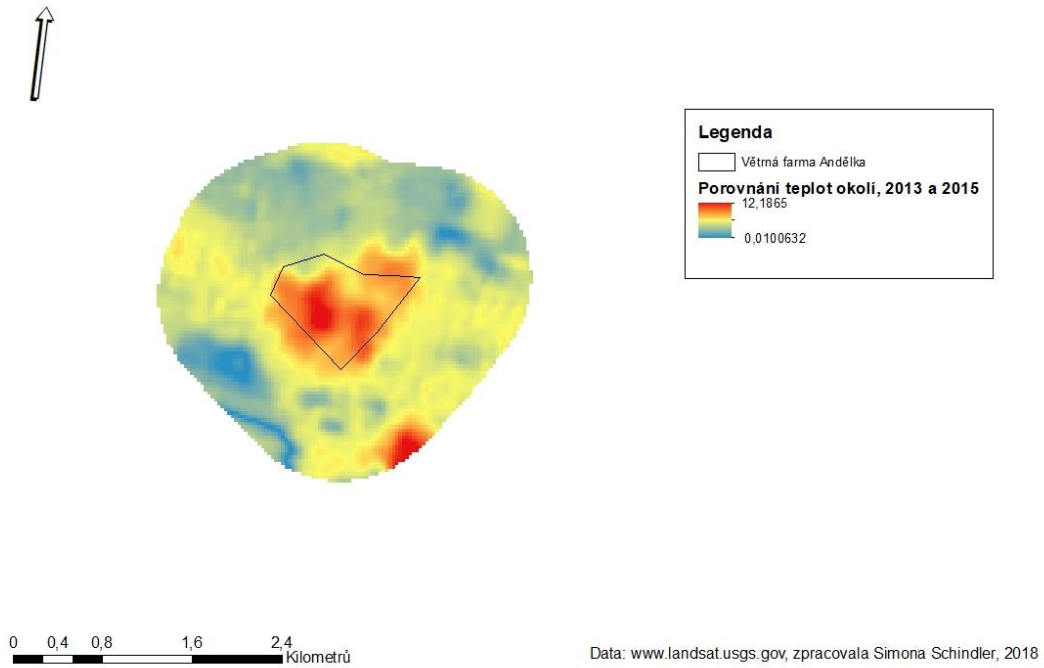


Obr. 15.: Porovnání rozložení teplot uvnitř větrné farmy v roce 2013 a 2015. (Odečtením hodnot z roku 2015 od roku 2013)

Pro porovnání rozložení teplot v okolí 1000 metrů od větrné farmy byly použity stejné snímky jako pro porovnání uvnitř větrné farmy. Výsledek je tedy velmi podobný, což znamená, že po průchodu vzduchu větrnou farmou v roce 2015 došlo k ochlazení i za hranicí větrné farmy. V roce 2016 bylo rozložení teplot po průchodu větru za hranicí větrné farmy také mírně odlišené, došlo zde opět k ochlazení, viz obrázek 16.



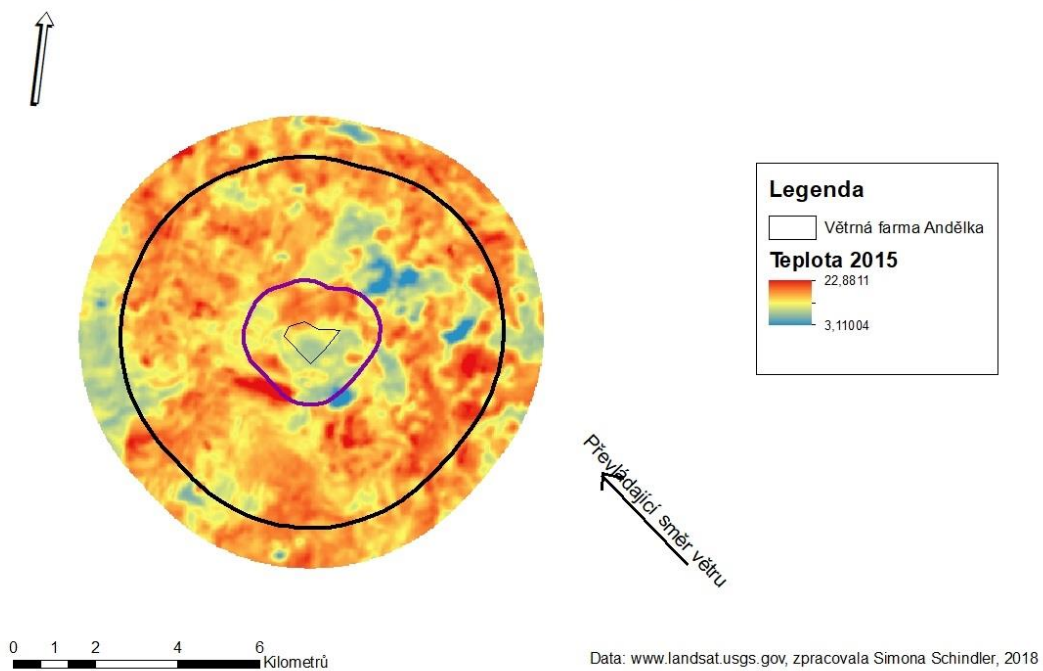
### Porovnání teplot v okolí větrné farmy, rok 2013 a 2015



Obr. 16.: Porovnání rozložení teplot v okolí 1 km od větrné farmy v roce 2013 a 2015 (Odečtením hodnot z roku 2015 od roku 2013)

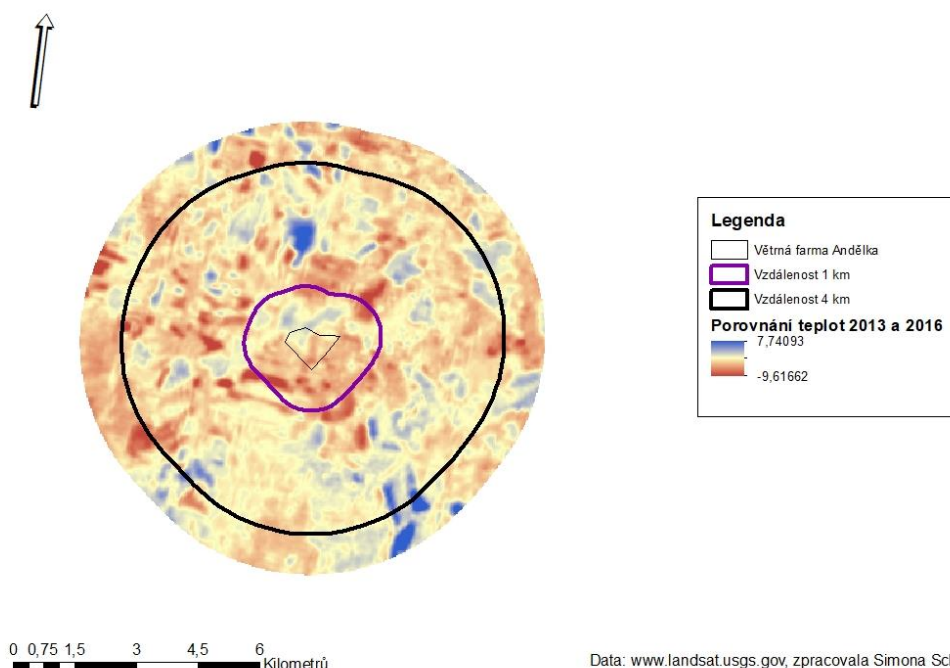
Dalším kritériem hodnocení byla vzdálenost 5 km od větrné farmy, kde by již větrná farma neměla mít vliv a vzdálenost 4km, která by ještě mohla být ovlivněná větrnou farmou. Z obrazových výsledků je těžké posoudit změny, na obrázcích je vidět, že zóny teplého a studeného vzduchu jsou velmi podobné. Proto byla vytvořena tabulka 1 s průměrnými hodnotami teplot.

Teploty v okolí větrné farmy do vzdálenosti 5 km, duben 2015



Obr. 17.: Teploty v okolí větrné farmy do vzdálenosti 5 km, duben 2015

## Porovnání teplot v 5km okolí větrné farmy Andělka v roce 2013 a 2016



Obr. 18.: Porovnání teplot v 5km okolí větrné farmy Andělka v roce 2013 a 2016, modrá barva – teplejší v roce 2013, hnědá barva – teplejší v roce 2016. (Odečtením hodnot z roku 2016 od hodnot v roce 2013)

V tabulce 1 je vidět, že teplota ve vzdálenosti 4 a 5 kilometrů je téměř stejná. Naproti tomu teplota uvnitř větrné a farmy a v okolí 1 km se liší. V roce 2013 a 2016 bylo uvnitř větrné farmy tepleji, v roce 2015 chladněji.

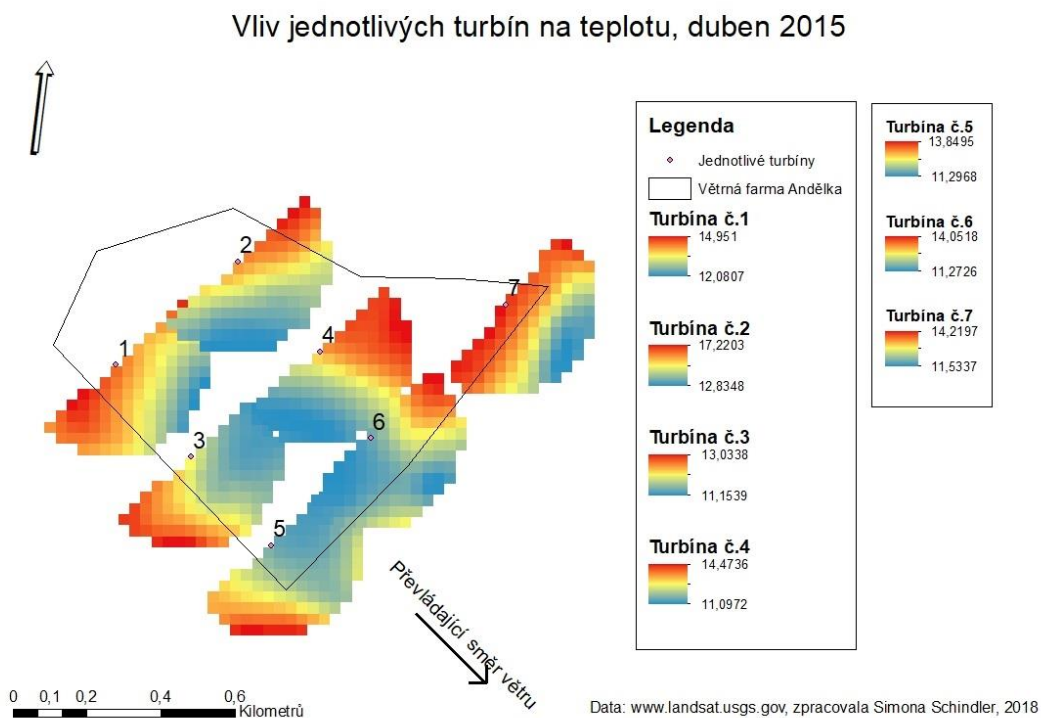
Vzdálenost	Rok 2013 [°C]	Rok 2015 [°C]	Rok 2016 [°C]
Uvnitř větrné farmy	21,96	13,5	23,3
Ve vzdálenosti 1 km	18,95	14,9	20,1
Ve vzdálenosti 4 km	20,13	15,7	21,3
Ve vzdálenosti 5 km	20,15	15,7	21,3

Tabulka 1. : Porovnání průměrných hodnot teploty v různých vzdálenostech od větrné farmy v jednotlivých letech.

Při hodnocení vlivu jednotlivých turbín na teplotní podmínky jejich okolí, byl důležitým faktorem směr větru. Dne 19. dubna 2015 to byl vítr jihovýchodní o průměrné rychlosti 5m/s. V tomto směru byly také hodnoceny jednotlivé teplotní změny. Z obrázku 18 je patrné, že u všech turbín došlo k mírnému ochlazení

vzduchu za turbínou. Největší ochlazení bylo zaznamenáno u turbín 2 a 4, viz obrázek 19.

To také potvrzují hodnoty v tabulce 2. Kde je viditelné ochlazení ve směru větru u všech turbín, s výjimkou turbíny číslo 5, kde bylo naměřené oteplení o 0,15 °C.

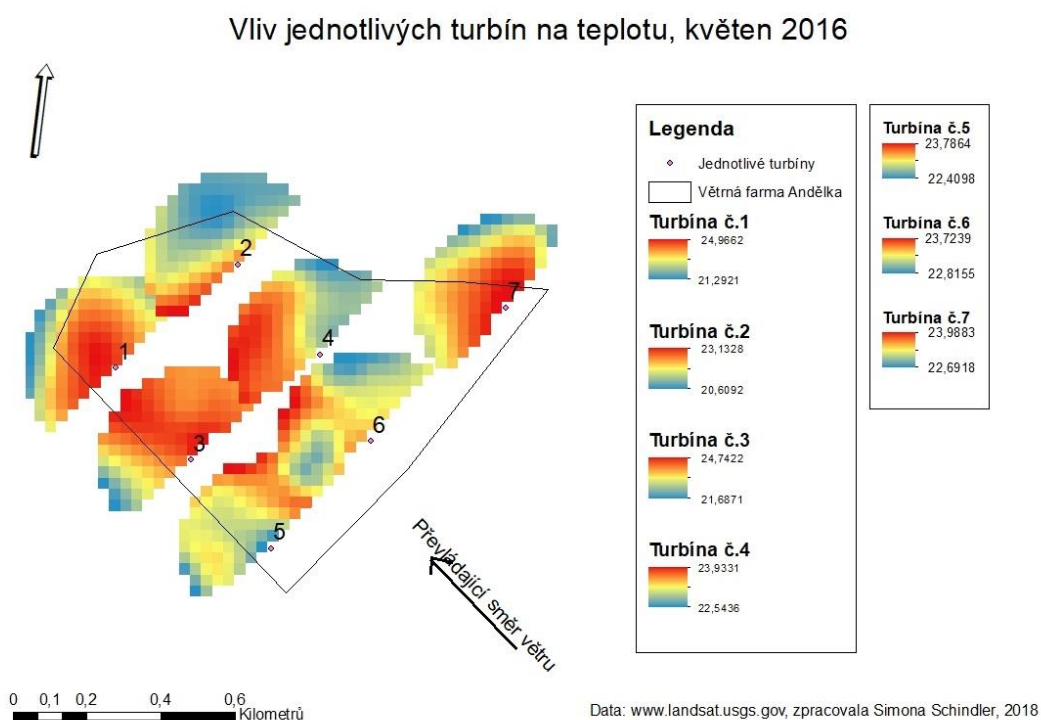


Obr. 19. :Vliv jednotlivých turbín na teplotu, duben 2015, směr větru jihovýchodní.

Turbíny rok 2015	Po směru větru [°C]	Proti směru větru [°C]
Turbína 1	13,86	14,71
Turbína 2	14,6	16,8
Trubína 3	11,85	12,95
Turbína 4	12,5	13,61
Turbína 5	12,05	11,9
Turbína 6	11,98	12,1
Turbína 7	13,17	14,33

Tabulka 2. : Porovnání průměrných hodnot teploty po průchodu větru jednotlivými větrnými turbínami dne 19 .dubna 2015

Dne 7. května 2016 foukal vítr severozápadní o průměrné rychlosti 7m/s a nejvyšší teploty dosahovaly až 25°C. V tomto případě se uprostřed větrné farmy držel teplý vzduch. Po průchodu větru turbínami došlo k oteplení vzduchu u turbín 1, 2 a 6, teplotní rozdíly však nebyly příliš výrazné. K ochlazení došlo u turbín 3, 4, 5 a 7. Největší teplotní rozdíl byl zaznamenán u turbíny 1 a 2, tedy dvou posledních turbín po směru větru, viz obrázek 20 a tabulka 3.



Obr. 20: Vliv jednotlivých turbín na teplotu, květen 2016, směr větru severozápadní

Turbíny rok 2016	Po směru větru [°C]	Proti směru větru [°C]
Turbína 1	23,18	24,89
Turbína 2	21,3	23,1
Trubína 3	23,96	23,5
Turbína 4	23,35	23,24
Turbína 5	23,2	22,05
Turbína 6	23,24	23,27
Turbína 7	23,47	22,14

Tabulka 3. : Porovnání průměrných hodnot teploty po průchodu větru jednotlivými větrnými turbínami dne 7. května 2016

## 7 DISKUZE

Výsledky ukázaly změny teplotních podmínek v okolí větrné farmy. Otázkou zůstává, jestli byly tyto změny opravdu způsobeny větrnými turbínami. V případě změn teplot uvnitř větrné farmy je možné říci, že po výstavbě větrné elektrárny došlo k jinému rozložení teplot a to tak, že ať už studený nebo teplý proud vzduchu se udržuje mezi šesti turbínami tvořícími větrnou farmu, viz obrázky 14 a 15. Protože oba snímky byly pořízeny v 9:50 středoevropského času (SEČ), tedy 11:50 našeho času, dalo by se také říci, že jev, který byl pozorován v CWEX experimentu Rajewski, 2013 tj., že v denních hodinách dochází k ochlazení vzduchu, je možné nalézt na obrázku z roku 2014. Zde je viditelný chladnější vzduch v prostoru mezi turbínami. Vzhledem k času 11:50 SEČ je možné hovořit o poledni. Ochlazení je patrné zejména po průchodu větru prvními dvěma turbínami ve směru větru (turbíny 1 a 2) a to až o 2°C. Konkrétní hodnoty v °C jsou pouze informační, vzhledem k tomu, že v roce 2013 byla v tento den průměrná teplota o 8°C vyšší.

Baidya Roy & Traiteur, (2010) se na tento problém podívali z hlediska stability atmosféry na větrné farmě. Věřili, že pokud je atmosféra nestabilní (s výškou klesá teplota), může větrná turbína způsobovat, že vlivem vertikálního míchání vzduchu dojde k ochlazení země. Ve stabilní atmosféře, kde je teplá vrstva vzduchu nad chladnou vrstvou, může vertikální míchání naopak způsobit oteplení povrchu země. Pokud by tomu tak bylo, pak by na květnovém snímku z roku 2016 patrně došlo k tomuto jevu. Jestliže přihlídneme k faktu, že vyšší vrstva se ohřívá dříve než vrstva přízemní, došlo by tedy k vertikálnímu míchání v důsledku otáčení větrných turbín a tlačení teplejšího vzduchu dolů směrem k zemi. V porovnání se snímek z roku 2013 je pak patrné oteplení povrchu země zejména u první turbíny (turbína 4) ve směru foukajícího větru. Na dubnovém snímku z roku 2015 není tento jev pozorován. Denní teploty se pohybovaly okolo 13°C, pravděpodobně tedy nedošlo k míchání teplého a studeného vzduchu, protože byl vzduch chladný i ve výšce větrných turbín.

Obecně by se z těchto snímků dalo říci, že v chladnějších měsících zadržuje větrná elektrárna chladnější vzduch a v letních měsících teplejší. Pro lepší zjištění výsledků by bylo potřebné měřit teplotu v průběhu celého dne, vzhledem k přesným

časům, kdy družice Landsat obíhá nad větrnou farmou, zde není možnost porovnání denního a nočního efektu větrné farmy.

Co se týče naměřených hodnot v okolí větrné farmy, vykazují oba obrázky z roků po výstavbě větrné farmy ochlazení ve směru větru po průchodu proudy vzduchu větrnou farmou. Tento jev by mohl odpovídat jevu zjištěnému v experimentu CWEX, kde bylo zjištěno, že ochlazovací efekt roste s narůstajícím počtem turbín. V roce 2015 je viditelné ochlazení o 2 °C, v roce 2016 dokonce o 3 °C. Zajímavé je, že k tomuto ochlazení dochází vždy v převládajícím směru větru, je tedy možné, že tento jev je způsoben právě větrnou farmou. Na obrázku 18 je porovnání teplot v roce 2013 a 2016 až do vzdálenosti 5 km od větrné farmy a toto porovnání ukazuje, že za větrnou farmou se drží teplý vzduch více, než když zde žádná větrná elektrárna nebyla. Na obrázku je vidět, že v převládajícím směru větru je jeden výrazný objekt s teplejší hodnotou v roce 2013, jedná se o rybník. Vodní plochy zadržují teplo, pokud je dlouhodobě teplý vzduch, což v roce 2013 na rozdíl od roku 2016 byl. Velikost této větrné farmy je pravděpodobně příliš malá na to, aby působila na vzdálenější okolí, nebo zde k žádnému vlivu nedochází.

Při zjišťování vlivu jednotlivých turbín na teplotní podmínky jejich blízkého okolí bylo dosaženo nejasných výsledků. Dá se říci, že v dubnu 2015 došlo k ochlazení u 6 větrných turbín z celkového počtu 7. U jedné nastalo oteplení o 0,15°C. U ostatních turbín se změna teploty pohybuje v rozmezí 0,2 – 2,2 °C. Největší ochlazení bylo zaznamenáno u turbín číslo 2 a 4, kdy turbína 2 je první ve směru větru a turbína 4 je v jejím zákrytu. Pro snímek z roku 2016 je patrné ochlazení u 4 větrných turbín ze 7 a u zbývajících tří je patrné mírné oteplení. Hodnoty nárůstu teploty u turbín s teplejším vzduchem po průchodu větru jsou maximálně 0,5 °C. U turbín s chladnějším vzduchem se rozdíl pohybuje od 0,2 do 1,8 °C. Zde opět velmi záleží na výchozí teplotě povrchu země. Dalo by se však říci, že převládá počet turbín, za kterými je vzduch ochlazován.

I když bylo dosaženo některých zajímavých výsledků podporujících teorii a výsledky jiných zahraničních autorů, je zde mnoho faktorů, které výsledky mohly ovlivnit. Prvním z nich je kvalita dostupných snímků z družice Landsat. Ačkoliv jsou data velmi kvalitní (termální data jsou snímána v rozlišení 100 metrů, ale dodávána v rozlišení 60 metrů), přesto za takovýchto podmínek nelze přesně stanovit jemné změny teploty v blízkém okolí předmětů. Pro stanovení těchto změn by bylo nejlepší použít lokální měření teploty, nejlépe po celou dobu 24 hodin (den i noc) a to jak v blízkém okolí turbín, tak v okolí celé větrné farmy. Dalším faktorem je použití

atmosférické korekce, což je vlastně odstranění atmosférického šumu, způsobeného atmosférickými částicemi. ENVI nabízí například FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) nebo QUACK (Quick Atmospheric Correction). Data vstupující do těchto funkcí by měla být bez mraků. Tento krok nebyl v této práci proveden, jelikož byl sledován především relativní rozdíl teplot uvnitř každého snímku, na který nemá atmosférická korekce vliv.



## 8 ZÁVĚR A PŘÍNOS PRÁCE

Pro hodnocení teplotních podmínek na blízké okolí je využití dálkového průzkumu Země zatím nevhodné. Pokud v budoucnu bude časové rozlišení pořizovaných snímků větší, bude pak patrně možné tuto metodu používat na hodnocení teplot i pro menší objekty. Přesto byly výsledky v této práci něčím přínosné. Můžeme s jistotou říci, že po výstavbě větrné farmy došlo k mírným změnám rozložení teploty uvnitř objektu a tohoto jevu by u velkých větrných farem, které se nacházejí v jiných klimatických podmínkách, mohlo být využito v zemědělství. Změna teploty by neměla mít velký vliv na živočichy, neboť se nejedná o velké teplotní výkyvy. Větrná farma Andělka zkoumaná v této práci je ve srovnání se světovými větrnými farmami malá, i proto je do budoucna důležité provést výzkum vlivu větrných elektráren na větších farmách, kde můžou i tyto nepatrné změny teploty ovlivnit velkou plochu země, a navíc zde mohou být teplotní změny vyšší. Je dobré porozumět všem faktorům, které mohou negativně ovlivňovat životní prostředí a jsou vázány k alternativním zdrojům energie. Větrná energie má v budoucnu na trhu svoje místo, porozumění nejen principům fungování, ale i začlenění do krajiny napomůže správnému umístování větrných elektráren.

Několik experimentů prokázalo vliv větrných elektráren na klimatické podmínky okolí. V této práci se některé z teorií o jejich vlivu dokázalo potvrdit. Vzhledem ke kvalitě dostupných dat je však velmi těžké s jistotou říci, zda tyto změny byly způsobeny větrnými elektrárnami. Nejlepším řešením jak zjistit, zda - li opravdu dochází k ovlivnění teploty, by bylo měření přímo na lokalitách větrných farem. V České republice takové měření již proběhlo na větrné farmě Kryštofovy Hamry (Moravec, Barták, Puš, & Wild, 2018), kde bylo prokázáno, že větrné farmy ovlivňují přízemní vrstvu vzduchu. Konkrétní způsob, kterým je teplota ovlivňována je pravděpodobně velmi složitý a bude těžké jej objevit.

## 9 PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

- Ackermann, T., & Söder, L. (2002). An overview of wind energy-status 2002. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00008-4)
- Agassi, J. (1967). The Kirchhoff-Planck Radiation Law. *Science*, 156(3771), 30–37. <https://doi.org/10.1126/science.156.3771.30>
- Alberts, D. (2006). Addressing wind turbine noise. *Report from Lawrence Technological University*. Retrieved from <http://windcows.com/files/AlbertsAddressingWindTurbineNoise.pdf>
- Andersson, M. H., & Öhman, M. C. (2010). Fish and sessile assemblages associated with wind-turbine constructions in the Baltic Sea. *Marine and Freshwater Research*, 61(6), 642–650. <https://doi.org/10.1071/MF09117>
- Arvidson, T., Barsi, J., Jhabvala, M., & Reuter, D. (2013). Landsat and Thermal Infrared Imaging. In *Thermal Infrared Remote Sensing SE - 9* (Vol. 17, pp. 177–196). [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6_9)
- Bacon, D. F. (2002). *A proposed method for establishing an exclusion zone around a terrestrial fixed radio link outside which a wind turbine will cause negligible degradation of the radio link performance*. Retrieved from [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0031/68827/windfarmdavidbacon.pdf](https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0031/68827/windfarmdavidbacon.pdf)
- Baerwald, E. F., D'Amours, G. H., Klug, B. J., & Barclay, R. M. R. (2008). Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. *Current Biology*. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.029>
- Baidya Roy, S., & Traiteur, J. J. (2010). Impacts of wind farms on surface air temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(42), 17899–17904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1000493107>
- Barclay, R. M. R., Baerwald, E. F., & Gruver, J. C. (2007). Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie*, 85(3), 381–387. <https://doi.org/10.1139/Z07-011>
- Barrie, D. B., & Kirk-Davidoff, D. B. (2010). Weather response to a large wind turbine array. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 769–775. <https://doi.org/10.5194/acp-10-769-2010>

- Bishop, I. D. (2002). Determination of thresholds of visual impact: The case of wind turbines. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29(5), 707–718. <https://doi.org/10.1068/b12854>
- Capps, C. (2001). Near field or far field? *Electrical Design News*, 46, 18.
- Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.-N., & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy – A review. *Renewable Energy*, 75, 911–921. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074>
- Deal, B. W. F. (2010). Wind Power : An Emerging Energy Resource. *Technology and Engineering Teacher*, 70(1), 9–15. <https://doi.org/Article>
- Dobrovolný, P. (1998). *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu*. Brno.
- DONG Energy, Vattenfall, Danish Energy Authority, & Danish Forest and Nature Agency. (2006). *Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues*. Energy.
- ERÚ. (2017). Roční zpráva o provozu ES ČR 2016. Retrieved from [http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5](http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5)
- Everaert, J., & Kuijken, E. (2010). Wind turbines and birds in Flanders (Belgium): Preliminary summary of the mortality research results. *Research Institute for Nature and Forest*, (2002), 1–10.
- González, M. a, & Ena, V. (2011). Cantabrian capercaillie signs disappeared after a wind farm construction. *Chioglossa*, 3, 65–74.
- Grodsky, S. M., Behr, M. J., Gendler, A., Drake, D., Dieterle, B. D., Rudd, R. J., & Walrath, N. L. (2011). Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. *Journal of Mammalogy*, 92(5), 917–925. <https://doi.org/10.1644/10-MAMM-A-404.1>
- GWEC. (2013). Global Wind Report - Annual Market Update. *Global Wind Energy Council*, 75.
- Halounová, L., & Pavelka, K. (2008). Dálkový průzkum Země, 182.
- Harding, G., Harding, P., & Wilkins, A. (2008). Wind turbines, flicker, and photosensitive epilepsy: Characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them. *Epilepsia*, 49(6), 1095–1098. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2008.01563.x>
- Harris, R. A., Zhou, L., & Xia, G. (2014). Satellite observations of wind farm impacts on nocturnal land surface temperature in Iowa. *Remote Sensing*, 6(12), 12234–12246. <https://doi.org/10.3390/rs61212234>
- Harrison, J. P. (2011). Wind Turbine Noise. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 31(4), 256–261. <https://doi.org/10.1177/0270467611412549>
- Hepbasli, A., & Ozgener, O. (2004). A review on the development of wind energy in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2003.10.006>
- Chamorro, L. P., & Porté-Agel, F. (2011). Turbulent flow inside and above a wind farm: A wind-tunnel study. *Energies*, 4(11), 1916–1936. <https://doi.org/10.3390/en4111916>
- Chen, Z., & Blaabjerg, F. (2009). Wind farm-A power source in future power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.010>

- Irons, J. R., Dwyer, J. L., & Barsi, J. A. (2012). The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment*, 122, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.026>
- Jen, P. H. S., & McCarty, J. K. (1978). Bats avoid moving objects more successfully than stationary ones. *Nature*, 275, 743–744. <https://doi.org/10.1038/275743a0>
- Johansson, M., & Laike, T. (2007). Intention to respond to local wind turbines: The role of attitudes and visual perception. *Wind Energy*, 10(5), 435–451. <https://doi.org/10.1002/we.232>
- Joselin Herbert, G. M., Iniyan, S., Sreevalsan, E., & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004>
- Keith, D. W., Decarolis, J. F., Denkenberger, D. C., Lenschow, D. H., Malyshev, S. L., Pacala, S., & Rasch, P. J. (2004). The influence of large-scale wind power on global climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(46), 16115–16120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0406930101>
- Kreidl, M. (2005). *Měření teploty: senzory a měřicí obvody* (1st ed.). BEN- technická literatura.
- Krohn, S., & Damborg, S. (1999). On Public Attitudes Towards Wind Power. *Renewable Energy*, 16, 954–960. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00339-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00339-5)
- Leung, D. Y. C., & Yang, Y. (2012). Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.024>
- Lillesand R.W., T. M. and K. (2015). *Remote sensing and Image Interpretation*. John Wiley and Sons, Inc., New York. <https://doi.org/10.1017/S0016756800012024>
- Loss, S. R., Will, T., & Marra, P. P. (2013). Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. *Biological Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.10.007>
- Malíšek, V. (1971). *Základní pojmy fyziky tepla* (2.). Státní pedagogické nakladatelství.
- Mcisaac, H. P. (2001). Raptor acuity and wind turbine blade conspicuity. *National Avian - Wind Power Planning Meeting IV*, (303), 59–87.
- Møller, H., & Pedersen, C. S. (2011). Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), 3727–3744. <https://doi.org/10.1121/1.3543957>
- Moravec, D., Barták, V., Puš, V., & Wild, J. (2018). Wind turbine impact on near-ground air temperature. *Renewable Energy*, 123, 627–633. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.091>
- Motl, M. L. (2008). *Farma v ě trných elektráren And ě lka*.
- NASA. (2018). History of Landsat. Retrieved March 12, 2018, from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history/>
- Orloff, S., & Flannery, A. (1992). Wind Turbine Effects on Avian Activity, Habitat

Use, and Mortality in Altamont Pass and Solano Count Wind Resource Areas: 1989-1991. *A Report Prepared for California Energy Commission.*

- Oršulák, T. (2010). *Dálkový pŕzkum země* (1st ed.). Retrieved from [http://gis.fzp.ujep.cz/GIS/DPZ/Materialy/DPZ\\_skripticka.pdf](http://gis.fzp.ujep.cz/GIS/DPZ/Materialy/DPZ_skripticka.pdf)
- Pantazopoulou, G. (2009). Noise issues and standarts for domestic wind turbines BRE acoustics.
- Pavelek, M., & a kol. (2007). *Vizualizační a optické měřící metody*. Retrieved from <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pevelek/optika/>
- Pedersen, E., & Persson Waye, K. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3460–3470. <https://doi.org/10.1121/1.1815091>
- Pineda, I., Wilkes, J. (2015). Wind in Power: 2014, European Statistics. Technical Report The European Energy Association, (February), 1–12.
- Porté-Agel, F., Wu, Y.-T., Lu, H., & Conzemius, R. J. (2011). Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.01.011>
- Rajewski, D. A. (2013). CWEX (Crop/Wind-Energy Experiment): Measurements of the interaction between crop agriculture and wind power.
- Reuter, D., Richardson, C., Pellerano, F., Irons, J., Allen, R., Anderson, M., ... Thome, K. (2015). The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: Design Overview and Pre-Launch Characterization. *Remote Sensing*, 7(1), 1135–1153. <https://doi.org/10.3390/rs70101135>
- Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., & Solangi, K. H. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2423–2430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>
- Sankaran, S., & Ehsani, R. (2014). Introduction to the electromagnetic spectrum. In *Imaging with Electromagnetic Spectrum: Applications in Food and Agriculture* (Vol. 9783642548, pp. 1–15). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-54888-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54888-8_1)
- Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K. N., & Hill, E. M. (2011). Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise & Health*, 13(54), 333–9. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.85502>
- Smallwood, K. S., & Karas, B. (2009). Avian and Bat Fatality Rates at Old-Generation and Repowered Wind Turbines in California. *Journal of Wildlife Management*, 73(7), 1062–1071. <https://doi.org/10.2193/2008-464>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Sumner, E. M. (1999). *Handbook of Soil Science*. CRC Press.
- Sun, C. (2008). Enviromental impacts of wind power generation projects. Retrieved from [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-CSDL200802004.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-CSDL200802004.htm)
- Tabassum, A., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2014). Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 270–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.019>

- Tadamasa, A., & Zangeneh, M. (2011). Numerical prediction of wind turbine noise. *Renewable Energy*, 36(7), 1902–1912. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.036>
- Thayer, R. L., & Freeman, C. M. (1987). Altamont: Public perceptions of a wind energy landscape. *Landscape and Urban Planning*, 14(C), 379–398. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(87\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0169-2046(87)90051-X)
- Twidell, J. (2009). Wind Energy - The Facts. *Wind Engineering*, 33(3), 305–307. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.33.3.305>
- Van Den Berg, G. P. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277(4–5), 955–970. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.09.050>
- Visser, T. D., & Wiersma, S. H. (1992). Diffraction of converging electromagnetic waves. *Journal of the Optical Society of America A*, 9(11), 2034. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.9.002034>
- Wang, C., & Prinn, R. G. (2010). Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4), 2053–2061. <https://doi.org/10.5194/acp-10-2053-2010>
- Wind Europe. (2016). Wind in power 2016 European Statistics. *Wind Europe*, (February), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9177-9>
- Xia, G., Zhou, L., Freedman, J. M., Roy, S. B., Harris, R. A., & Cervarich, M. C. (2016). A case study of effects of atmospheric boundary layer turbulence, wind speed, and stability on wind farm induced temperature changes using observations from a field campaign. *Climate Dynamics*, 46(7–8), 2179–2196. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2696-9>
- Zhou, L., Tian, Y., Baidya Roy, S., Dai, Y., & Chen, H. (2012). Diurnal and seasonal variations of wind farm impacts on land surface temperature over western Texas.
- Zákon č.258/2000 Sb. O ochraně veřejného zdraví, v platném znění