

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studie větrné elektrárny pro vybranou lokalitu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra BAIEROVÁ**
Osobní číslo: **E19N0043P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Studie větrné elektrárny pro vybranou lokalitu**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Uvedte teoretické základy a možnosti energetického využití větru.
2. Popište typy větrných elektráren, jejich konstrukční provedení a jejich výrobce v Evropě.
3. Zpracujte návrh větrné elektrárny pro vybranou lokalitu.
4. Návrh zhodnoťte z hlediska energetického, ekonomického a ekologického.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Rychetník V., Janošek J., Pavelka J.: Větrné motory a elektrárny.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o větrných elektrárnách. V první části jsou popsány teoretické základy a možnosti energetického využití větru. Poté jsou uvedeny typy větrných elektráren, jejich konstrukční provedení a výrobci v Evropě. Třetí část je zaměřena na návrh větrné mikroelektrárny v lokalitě Božím Daru. Nakonec tato práce zahrnuje energetické, ekonomické a ekologické zhodnocení navrhované větrné mikroelektrárny.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, větrná turbína, průměrná rychlost větru, Boží Dar, elektrická energie, vítr, zhodnocení, větrné podmínky, větrná mikroelektrárna

Abstract

This thesis deals with wind powers. The first part describes the theoretical foundations and possibilities of wind energy use. The next part mentions the types of wind powers, their construction and manufacturers in Europe. The third part is focused on the design of the wind micro electric power in Boží Dar. Finally, this thesis involves energy, economic and ecological evaluation of the proposed wind micro electric power.

Key words

Wind power plant, wind turbine, average wind speed, Boží Dar, electrical energy, wind, evaluation, wind conditions, wind micro electric power

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

Bc. Petra Baierová

.....

podpis

V Plzni dne 26.5.2021

Bc. Petra Baierová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Škorpilovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 TEORETICKÉ ZÁKLADY A MOŽNOSTI ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ VĚTRU	13
1.1 ZÁKLAD VĚTRU.....	13
1.1.1 <i>Vznik, směr a rychlost větru</i>	13
1.1.2 <i>Závislost rychlosti větru na výšce a reliéfu povrchu</i>	14
1.2 MOŽNOSTI ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ VĚTRU.....	16
2 TYPY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN, JEJICH KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ A JEJICH VÝROBCE V EVROPĚ	17
2.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	17
2.1.1 <i>Základ</i>	18
2.1.2 <i>Sloup</i>	18
2.1.3 <i>Rotor</i>	20
2.1.4 <i>Gondola</i>	20
2.2 VĚTRNÉ MOTORY A JEJICH TYPY.....	21
2.2.1 <i>Dle osy otáčení</i>	22
2.2.2 <i>Dle aerodynamického principu</i>	23
2.2.3 <i>Dle velikosti větrných elektráren</i>	26
2.3 ZÁSADNÍ VÝROBCI VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V EVROPĚ.....	27
2.3.1 <i>Vestas</i>	28
2.3.2 <i>Siemens Gamesa</i>	30
2.3.3 <i>Enercon</i>	31
2.3.4 <i>Nordex</i>	33
2.3.5 <i>Wikov</i>	34
3 NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY PRO VYBRANOU LOKALITU	35
3.1 ZÁKLADNÍ PODMÍNKY A ÚDAJE PRO VÝBĚR VHODNÉ OBLASTI.....	35
3.1.1 <i>Větrný potenciál</i>	35
3.1.2 <i>Chráněné oblasti</i>	36
3.1.3 <i>Drsnost povrchu</i>	37
3.1.4 <i>Proces VtE</i>	37
3.2 KONKRÉTNÍ VÝBĚR A ZHODNOCENÍ LOKALITY.....	38
3.3 ČETNOST VÝSKYTU RYCHLOSTÍ VĚTRU.....	39
3.4 SCHÉMA ELEKTRICKÉHO ZAPOJENÍ VĚTRNÉ MIKROELEKTRÁRNY DO CHATY.....	40
3.5 VÝPOČET NÁVRHU VĚTRNÉ TURBÍNY.....	41
3.5.1 <i>Energie větru</i>	41
3.5.2 <i>Teoretický výpočet výkonu hustoty větru a energie za 1 rok</i>	41
3.5.3 <i>Výpočet spotřeby energie chaty za 1 rok</i>	42
3.5.4 <i>Reálný výpočet výkonu a energie větrné turbíny za 1 rok</i>	43
3.5.5 <i>Výpočet jmenovitých otáček</i>	45
3.6 PŘEHLEDNÉ SHRNUTÍ PODSTATNÝCH ÚDAJŮ NÁVRHU VĚTRNÉ TURBÍNY.....	46
4 ZHODNOCENÍ NÁVRHU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	46
4.1 Z ENERGETICKÉHO HLEDISKA.....	47
4.2 Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....	49
4.2.1 <i>Stanovení nákladů</i>	49
4.3 Z EKOLOGICKÉHO HLEDISKA.....	50
4.3.1 <i>Čistý zdroj energie</i>	51
4.3.2 <i>Hluk</i>	52

4.3.3	Živočichové.....	53
4.3.4	Stroboskopický efekt	53
4.3.5	Televizní a radiový signál.....	54
4.3.6	Recyklace VtE.....	54
ZÁVĚR.....		55
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....		57
PŘÍLOHY		1

Seznam symbolů a zkratek

např.	například
km/h	kilometr za hodinu
m	metr
tj.	to je
m/s	metr za sekundu
n	exponent korekčního vztahu
ČR.....	Česká republika
VtE.....	větrná elektrárna
DC.....	stejnoseměrný proud
V	volt
AC.....	střídavý proud
MW.....	megawatt
Φ	řecké písmeno fi
Δ -tvar	tvar trojúhelníku
W	watt
kW	kilowatt
TWh.....	terawatt hodina
%	procento
GW	gigawatt
ot/min.....	otáčky za minutu
SG.....	Siemens Gamesa
a.s.	akciová společnost
s.r.o.	společnost s ručením omezením
SPG.....	super positron gear s proměnlivým převodovým poměrem
CHKO.....	chráněná krajinná oblast
NP.....	národní park
EIA	vyhodnocení vlivů na životní prostředí
E_k	kinetická energie
W/m^2	watt na metr čtvereční
E_T	teoretický výpočet energie

E_s	spotřeba energie
kg/m^3	kilogram na metr krychlový
π	Ludolfovo číslo
C_p	výkonový součinitel
E_R	reálný výpočet energie
λ_0	součinitel rychloběžnosti
min^{-1}	jednotka jmenovitých otáček
m^2	metr čtvereční
kWh.....	kilowatt hodiny
Kč.....	koruna česká
Ah.....	ampér hodiny
NO_x	oxid dusíku
SO_2	oxid siřičitý
CO.....	oxid uhelnatý
CO_2	oxid uhličitý
kg.....	kilogram
dB.....	deciBel

Úvod

Energie je v dnešní době nepostradatelnou a důležitou součástí našich životů, a to zejména ve vyspělých státech.

Elektrickou energii můžeme získat pomocí neobnovitelných i obnovitelných zdrojů energie. Neobnovitelné zdroje energie mají zásoby v přírodě omezené, proto jejich vyčerpání je předpokládáno do několika desítek let. Můžeme sem zařadit fosilní paliva jako např. uhlí, ropa, zemní plyn. Oproti tomu obnovitelné zdroje energie jsou neomezené, kdy v jejich využívání lze teoreticky pokračovat dalších tisíce let. Mezi tyto zdroje energie patří energie ze: slunce, vody, biomasy a především větru. [1]

Právě větrné elektrárny jsou jednou z primárních možností získávání energie. Využití větru je zřetelně ekologičtější než využití fosilních paliv. Další prioritou větrných elektráren je nevyčerpatelný, bezplatný zdroj, který je poháněn. Nedochozí také mimo jiné k vypouštění skleníkových plynů ani dalších nebezpečných látek do ovzduší. Nicméně občané v České republice se převážně brání větrným elektrárnám, protože jsou více informovaní o jejich negativěch (např.: hlučnost, vysoké pořizovací náklady, ohrožení ptactva) či nějakých chybně zrealizovaných projektů. [2]

Má předkládaná diplomová práce je zaměřena na téma studie větrné elektrárny pro vybranou lokalitu. V této práci se zabývám teoretickými základy a možnostmi energetického využití větru. V další části se věnuji konstrukci větrných elektráren, jaké jsou jejich typy a které zásadní státy v Evropě se podílí na jejich výrobě. V poslední řadě se zaměřuji na návrh větrné elektrárny pro vybranou lokalitu a jejím zhodnocením z hlediska energetického, ekonomického a ekologického.

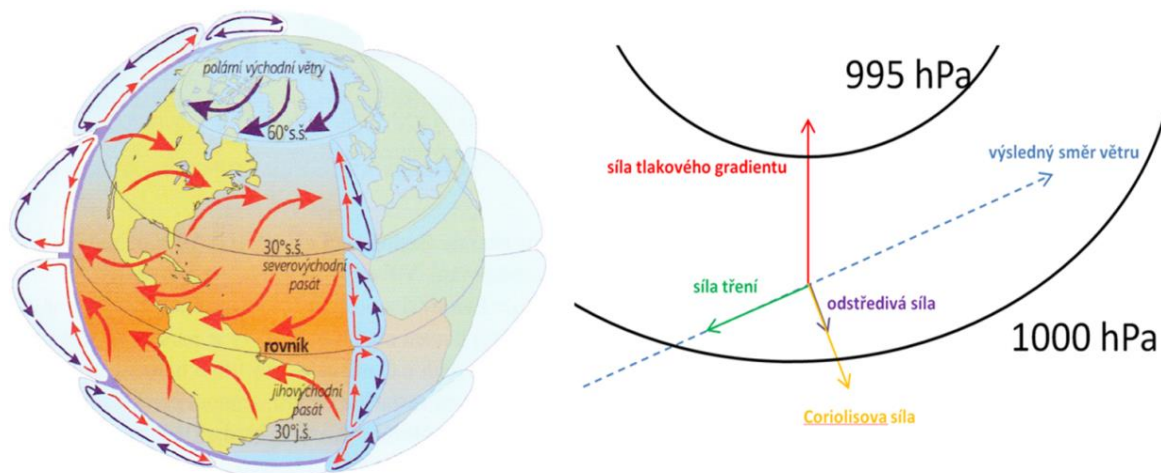
1 Teoretické základy a možnosti energetického využití větru

1.1 Základ větru

1.1.1 Vznik, směr a rychlost větru

Vítr jsou proudy vzduchu v atmosféře, které vznikají kvůli rozdílnému tlaku vzduchu. Tlak vzduchu je ovlivněn teplotou vzduchu. Vzduch se na planetě Zemi nerovnoměrně ohřívá. Například na poušti se zahřeje vzduch mnohem více než v našich krajích České republiky. Jak se vzduch různorodě rozehřívá, tak dochází právě k rozdílu tlaku ve vzduchu. Největší teplota se vyskytuje na rovníku a směrem k pólům klesá. Při ohřívání vzduchu tlak klesá, tudíž teplejší vzduch je lehčí, a naopak při ochlazování tlak roste, tedy chladný vzduch je těžší. Poté nastává síla teplotního gradientu, která se snaží rozdíly tlaku vyrovnat. K vyrovnání tlaku se masy vzduchu rozpo pohybují, čímž vzniká pověštný vítr. Vítr je tím silnější, čím je větší tlakový rozdíl. [3]

Vítr také ovlivňuje několik dalších sil. Vyrovnání rozdílu tlaku komplikuje Coriolisova síla, která na vzduch působí vlivem rotace Země. Odstředivá síla nastává, pokud vzduch proudí po nějaké křivce. Působením těchto dvou sil se vítr stáčí. Vítr také ovlivňuje i síla tření. Komplex všech těchto faktorů může za to, že vyrovnávání tlakových rozdílů je velice složité a vzhledem k stálému příkonu energie ze Slunce dochází k nepřetržitému vytváření nových a nových rozdílů tlaku vzduchu. V České republice na Sněžce činí větrný rekord 212 km/h. [4]



Obr. 1.1 Globální cirkulace a vznik větru (vlevo), síly působící na vzduch v tlakovém poli v blízkosti zemského povrchu (vpravo); převzato z [5], [4]

Mezi podstatné údaje pro měření větru je jeho rychlost a směr, které se zpravidla realizuje sítí meteorologických stanic spolu s dalšími měřeními barometrického tlaku, vodních srážek, slunečního záření a jiných klimatických faktorů. Pro měření rychlosti a směru větru je standartní, že výška činí 10 m nad povrchem. Jestliže ale tuto výšku není možné dodržet, je naměřená rychlost, jež se vzrůstající výškou roste, sjednaným způsobem na tuto výšku přepočítána. [7]

Proudění vzduchu, které je pořád turbulentní, se vyznačuje kolísáním rychlosti a směru větru. Jejich výsledky měření jsou z tohoto důvodu zprůměrovány za časový interval. [8]

Směrem větru se rozumí směr, odkud vítr vane. K jeho vyjádření se využívá světových stran nebo azimutu tj. 0 až 360 úhlových stupňů. Směr větru se provádí pomocí větrných směrovek, jež se vyskytují na sloupech ve výšce 10 m nad povrchem, protože rušivý vliv terénu a jiných překážek je zpravidla menší než poblíž zemského povrchu. [9]

Rychlost větru je vzdálenost, jež urazí pohybující se vzduch za jednotku času. Vyjadřuje se zpravidla v jednotkách m/s nebo km/h. První možnost měření rychlosti větru je založena na měření jeho dynamického tlaku. Nicméně nejčastěji se rychlost větru měří pomocí miskového anemometru, který se také umísťuje ve výšce 10 m nad povrchem. S narůstající výškou se rychlost větru logaritmičticky zvětšuje. [8], [9]



Obr. 1.2 Mističkový anemometr; převzato z [6]

1.1.2 Závislost rychlosti větru na výšce a reliéfu povrchu

Rychlost větru je ovlivňována zemským povrchem a v nejtěsnější blízkosti směrem k povrchu přirozeně klesá. Při rovném terénu je závislost mezi rychlostí větru a výškou ovlivněno jedine drsností povrchu. Můžeme ji vypočítat dle vzorečku

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (1.1)$$

kde v^* je průměrná rychlost větru ve výšce h nad povrchem, v_0^* představuje průměrnou rychlost větru v referenční výšce h_0 a poslední veličina n vyznačuje exponent korekčního vztahu, který je závislý na drsnosti povrchu. [7]

Tab. 1.1 Závislost n na typu povrchu; převzato z [7]

Typ rotoru	n
a – Hladký povrch – vodní hladina, písek	0,14
b – Louka s nízkým travnatým porostem či oranice	0,16
c – Vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
d – Porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesní	0,21
e – Lesy s mnoha stromy	0,28
f – Vesnice a malá města	0,48

Existuje však ještě snazší výpočet, kdy pro jednotlivé exponenty byly propočteny relativní hodnoty rychlostí vyjádřené pomocí korekčního součinitele k_h při odchylce od údaje v referenční výšce 10 m nad zemským povrchem. Tab. 1.2, jenž ukazuje výsledky výpočtu, uvádí v individuálních polích, kolikrát se rychlost větru v určité výšce h odstupňované po 5 m liší od rychlosti větru ve výšce 10 m nad povrchem. Výpočet se realizuje z následujícího vzorečku

$$v_h^* = k_h * v_{10}^* \quad (1.2)$$

kde v_h^* představuje průměrnou rychlost větru ve výšce h , k_h je výškový korekční součinitel a v_{10}^* znamená průměrnou rychlost větru 10 m/s. [7]

Pro jasnější objasnění je možné uvést příklad v rovinách s velkými lány obilí. Exponent v tomto případě můžeme předpovídat, že bude po celý rok $n = 1,18$. Jestliže máme průměrnou rychlost větru 2,5 m/s při výšce 10 m, tak průměrná rychlost větru při výšce 25 m nad povrchem bude

$$v_{25}^* = 1,18 * 2,5 = 2,95 \text{ m/s} \quad (1.3)$$

Tab. 1.2 lze také využít pro naměřenou rychlost větru v jiné výšce. [7]

Tab. 1.2 Hodnoty k_h pro výšky od 5 do 50 m; převzato z [7]

Typ povrchu	Výška h (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
a	0,91	1	1,06	1,1	1,14	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
b	0,90	1	1,07	1,12	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,29
c	0,88	1	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
d	0,86	1	1,09	1,16	1,21	1,26	1,3	1,34	1,37	1,40
e	0,82	1	1,12	1,21	1,29	1,36	1,42	1,47	1,52	1,57
f	0,72	1	1,21	1,39	1,55	1,69	1,82	1,95	2,06	2,17

1.2 Možnosti energetického využití větru

Možnosti využití větrné energie lze transformovat dvěma způsoby. První možnost jejího využití je přímá přeměna větru na mechanickou práci. Jedná se o větrné mlýny, které se v dnešní době již zdaleka nevyužívají. Větrný mlýn sloužil např. k mletí obilí, mouky nebo k lisování oleje. Mnohdy se však využívala na vysoušení půdy a odčerpávání vody. V ČR se nachází německý a holandský mlýn. [10]



Obr. 1.3 Holandský větrný mlýn; převzato z [11]

Druhý způsob, který se v současné době využívá zcela běžně, se týká přeměny větru na elektrickou energii. Vítr, který proudí přes lopatky rotoru, roztáčí větrný motor a pohání elektrický generátor. Zatímco velká zařízení VtE dodávají elektrickou energii do rozvodné sítě, tak menší zařízení VtE jsou určena pro zásobování odlehlých objektů nenapojených k rozvodné síti. Rozdělujeme tudíž dva systémy:

Systémy nezávislé na rozvodné síti (autonomní systémy) jsou určeny objektům, jež nemají příležitost se připojit k rozvodné síti nebo kde je připojení technicky a ekonomicky obtížné. Uplatňují se zde zpravidla větrné mikroelektrárny. Součástí tohoto systému je také veškerá řídicí elektronika i akumulátory. V objektu může být buď rozvod DC s nízkým napětím 12 V a 24 V nebo připojen ještě střídač pro dodávku AC s vyšším napětím 230 V. V letní sezoně, kdy svítí hodně Slunce, bývají mnohdy autonomní systémy větrné mikroelektrárny doplněny fotovoltaickými panely. [8], [12]

Nejvíce rozsáhlé jsou však *systémy závislé na rozvodnou síť (systémy připojené k síti)*. Tyto systémy, které se vyskytují v lokalitách s velkým větrným potenciálem, slouží pro komerční výrobu elektrické energie. Zcela zásadní je určení vhodné oblasti, která je vybrána na základě dlouhodobého měření rychlostí větru nebo z map větrných proudů. Největší průměry rotorů přesahují až 100 m. Větrná elektrárna může být postavena buď pouze jedna v jedné oblasti anebo se může stavět více větrných elektráren v jedné oblasti, a to zejména z důvodu vyšší efektivity. Mnoho větrných elektráren, které jsou postavené v dostatečné blízkosti ve stejné lokalitě, se nazývají větrné farmy. Největší větrné farmy, které jsou umístěny na moři a v pouštních oblastech, mohou dosáhnout výkonu až stovek MW. V ČR se vyskytuje největší větrná farma v Krušných horách, která má 12 bloků s celkovým výkonem 42 MW. [8], [12]

2 Typy větrných elektráren, jejich konstrukční provedení a jejich výrobce v Evropě

2.1 Konstrukční provedení větrné elektrárny

VtE se skládá ze 4 zásadních částí: [13]

- větrná turbína, jež transformuje energii větru v energii mechanickou na hřídeli
- elektrická část, jež transformuje energii mechanickou v elektrickou
- zařízení měření a regulace, jenž zaručuje automatický chod celé větrné elektrárny
- stavební část

Způsob konstrukce individuálních částí závisí hlavně na typu větrné turbíny, které jsou buď se svislou, nebo vodorovnou osou otáčení. V podkapitole 2.1 bude popisováno konstrukční provedení VtE s vodorovnou osou otáčení. Větrné turbíny se svislou osou otáčení se příliš neosvědčily. [13]

2.1.1 Základ

Základ větrné elektrárny tvoří betonová deska. Jedná se o nejtěžší díl stavby, protože na základu je umístěna celá elektrárna. Základ musí svou hmotností, která může mít více než 1000 tun, zabezpečit stabilitu VtE, jež může vážit i přes 300 tun. [14]

Před zahájením stavby je potřeba vykonat řádný geologický průzkum, který prokáže, zdali je prostředí stabilní ve spodních vrstvách zeminy. Následně se vytvoří betonová podkladní deska, jež zajišťuje pevný i rovný podklad pro umístění ocelového fundamentu stožáru a vylití betonového základu. V ocelovém kruhu jsou zajištěny díry pro armování i potrubí pro vyvedení kabeláže. Po uložení fundamentu na betonovou desku je nutné horní obrubu kruhu ustavit do vodorovné polohy. Poté probíhá současně armování pomocí ocelové výztuže a instalování trubek pro kabeláže. Celá armatura se následně uzemní. Poté se vybetonuje celý základ najednou. Po vyztužení betonu se natře celý betonový základ ještě asfaltovým penetračním nátěrem. Nakonec se provede protažení kabeláže až k fundamentu. Základ se zaveze zeminou a důkladně zhutní. Železobetonový základ může být čtvercového, kruhového nebo šestiúhelníkového tvaru. Čtvercový základ má průměr zhruba 15 m, přičemž jeho výška dosahuje přibližně až 2 m. [14]

2.1.2 Sloup

Další část větrné elektrárny je sloup, který je pevně připevněn k betonovému základu. Sloup musí udržet větrnou turbínu v dostatečné výšce, odolávat síle větru a eventuálním turbulencím. Celkem existují tři druhy tubusů. [15]

Prvním a nejčastěji používaným typem v Evropě je *ocelový tubusový stožár*. Tento ocelový stožár je smontován ze segmentů, jež se zhotovují z plechových plátů. Pláty se skružují do prstenců, které jsou následně k sobě svářeny. Uvnitř samotného tubusu se

nachází elektrické vedení pro odvod elektrické energie. U velkých VtE se vyskytují v tubusu ještě schody, žebříky, případně i výtah, které vedou do gondoly. [16]

Druhý typ se nazývá *příhradový stožár*. Oproti ocelovému svařovanému stožáru je při výškách tubusu nad 100 m ekonomicky výhodnější, jeho montáž se realizuje až na místě stavby větrné elektrárny a základ tvoří betonové patky. Tubus je sestaven pomocí válcovaných, ocelových L profilů. Veškeré prvky konstrukce jsou žárově zinkovány. Jejich spojení je zabezpečeno pevnostními šrouby. [17]

Poslední typ je *prefabrikovaný betonový stožár*, který se staví z prefabrikátů (betonových polo-skruží). Betonové díly se na místě stavby sestavují do skruží, ze kterých se nakonec staví stožár. Pro jeho pevnost se používají předepjatá ocelová lana. Mezi výhody tohoto stožáru patří zejména: dlouhá životnost betonové konstrukce, menší provozní hluk, vibrace a také menší únavu rotoru na rozdíl od ocelového stožáru. [16], [18]



Obr. 2.1 Větrné elektrárny (zleva): Ocelový tubusový stožár, Příhradový stožár, Prefabrikovaný betonový stožár; převzato z [19], [20], [18]

2.1.3 Rotor

Rotor obsahuje náboj a rotorový list. Náboj spojuje lopatky větrné turbíny s hřídelí. Lopatky jsou našroubovány na náboj pomocí šroubů. Větrné elektrárny mají nejčastěji trojlístý rotor, který je spojen s gondolou. Listy, jež jsou duté, sklolaminátové a aerodynamicky tvarované, vznikají jednotlivým skládáním vrstev skelných tkanin a jejich nástříky pryskyřicí v ocelových vanách. Funkce listů je nejen roztáčet elektrárnu, ale také ji při velkých rychlostech brzdit. Pokud je rychlost větru vyšší než 25 m/s natočí se listy tak, aby se větrná elektrárna zastavila. Rotor se otáčí průměrně 10 – 15 krát za minutu. Obecně platí, že čím větší rotor elektrárna má, tím více elektrické energie dokáže vyrobit. [21]

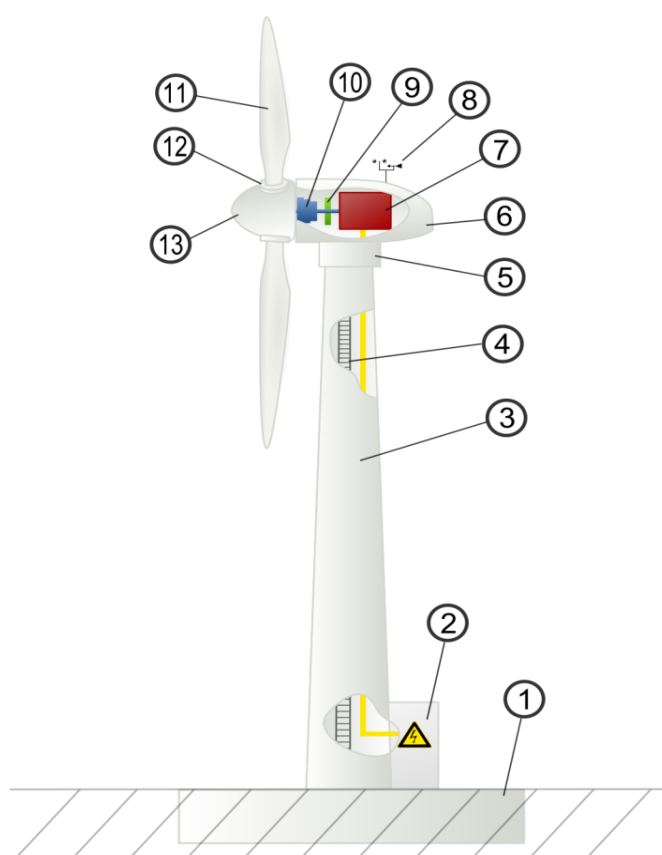
2.1.4 Gondola

Na vrcholu stožáru je otočně umístěna gondola, v níž jsou obsaženy nejpodstatnější díly větrné elektrárny. [22]

- Převodovka zajišťuje převod nízké rychlosti rotoru na mnohem vyšší rotační rychlost generátoru. Tato část zařízení je nejnáchylnější k poruchám, proto také existují větrné motory bez převodovky.
- Kromě využití zabrzdění elektrárny natočením jednotlivých listů rotoru je v gondole umístěna ještě parkovací brzda, která zabraňuje nežádoucímu roztočení rotoru. Je umístěna na vysokorychlostní hřídeli převodu.
- Na vrchní části gondoly jsou zabudována čidla pro měření rychlosti a směru větru (anemometr).
- Gondola se může natáčet. Větrná elektrárna si sama vyhodnocuje údaje o rychlosti a směru větru. Pomocí těchto dat se nastavuje osa gondoly. Rotor je tedy v pozici kolmo k proudění. Pohyb gondoly je zajištěn pomocí elektricky poháněných motorů.

- Generátor mění mechanickou energii hřídele na elektrickou energii. Pokud větrná elektrárna obsahuje převodovku, tak se využívá asynchronní generátor s vinutým rotorem. Naopak u bezpřevodových technologií se uplatňuje synchronní generátor.

Základem gondoly je tuhý rám, na němž je hlavní hřídel uložena ve dvou valivých kuličkových ložiskách, které zachycují radiální i axiální síly. Hydraulická jednotka napájí brzdu a zařízení pro regulaci větrného motoru natáčením listů. Generátor a hydraulická jednotka jsou umístěny v zadní straně gondoly. Gondola také obsahuje centrální řídicí jednotku, která řídí a reguluje chod celé větrné elektrárny. [22], [7]

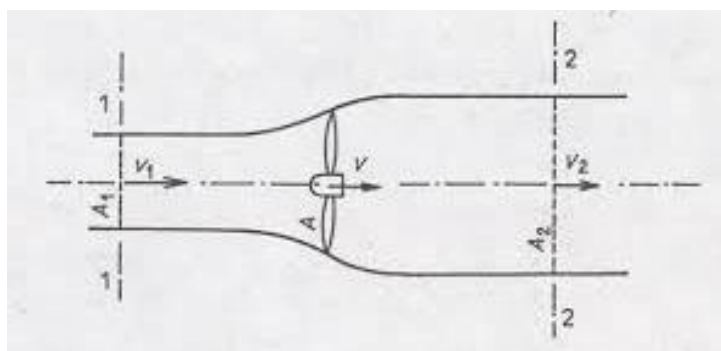


Obr. 2.2 Části větrné elektrárny: 1. Základ, 2. Připojení k elektrické rozvodné síti, 3. Sloup, 4. Přístupový žebřík, 5. Ovládání orientace větru, 6. Gondola, 7. Generátor, 8. Anemometr, 9. Brzda, 10. Převodovka, 11. Lopatka rotoru, 12. Ovládání sklonu lopatek, 13. Náboj rotoru; převzato z [23]

2.2 Větrné motory a jejich typy

Větrné motory neboli větrné turbíny se užívají k transformaci kinetické energie větru na mechanickou práci. Hlavní princip funkce spočívá ve zpomalování proudu vzduchu,

jenž prochází plochou a odebírá část jeho energie. Obr. 2.3 zobrazuje schematické znázornění proudu vzduchu, který prochází idealizovanou větrnou turbínou. Jak lze z tohoto Obr. 2.3 vidět, ve vodorovném směru je proud omezen dvěma plochami 1 a 2, přičemž prochází průřezy A_1 a A_2 , má rychlost v_1 a v_2 a v rovině vrtule s průtočnou plochou A je rychlost vzduchu v . [7]



Obr. 2.3 Zobrazení proudu vzduchu procházející vrtulí; převzato z [7]

2.2.1 Dle osy otáčení

- **Větrné motory se svislou osou otáčení**

Jak již z názvu vyplývá, větrné motory mají osu rotace umístěnou svisle k zemi. U těchto motorů není potřeba měnit jejich směr. Na rozdíl od horizontálních turbín mají konstrukčně lehčí princip, zabírají méně místa a mají jednodušší údržbu. Jejich nevýhoda je, že mají menší výšku rotoru nad zemským povrchem, přičemž rychlost větru a účinnost je malá. Účinnost rotoru dosahuje přibližně 38 %. Základními zástupci jsou Savonius a Darrieus. Vzhledem k její malé efektivnosti se však již v současné době nevyužívají. [24]

- **Větrné motory s vodorovnou osou otáčení**

Větrné motory s vodorovnou osou otáčení mají osu otáčení umístěnou vodorovně se zemí. Větrná turbína musí neustále směřovat vůči směru větru. Proto se využívají u menších rozměrů VtE směrové lopatky a u větších rozměrů VtE větrné senzory i servo motory. Účinnost rotoru dosahuje kolem 48 %. Základními zástupci této vodorovné osy otáčení jsou vrtulkové a lopatkové motory. Vzhledem k jejich vyšší efektivnosti se některé typy využívají zcela běžně. [24]

2.2.2 Dle aerodynamického principu

- *Větrné motory pracující na odporovém principu*

Zásadní funkci vykonává odpor. Plocha nastavená vůči větru mu vytvoří aerodynamický odpor, čímž se na ploše zhotoví síla, jež se mechanicky transformuje zpravidla na otáčivý pohyb. Ačkoliv je odporový princip relativně jednoduchý, tak jeho účinnost je velice malá. Větrné turbíny pracující na tomto principu patří mezi nejstarší typy. Základními zástupci jsou mističkový anemometr a Savoniův větrný motor. [25]

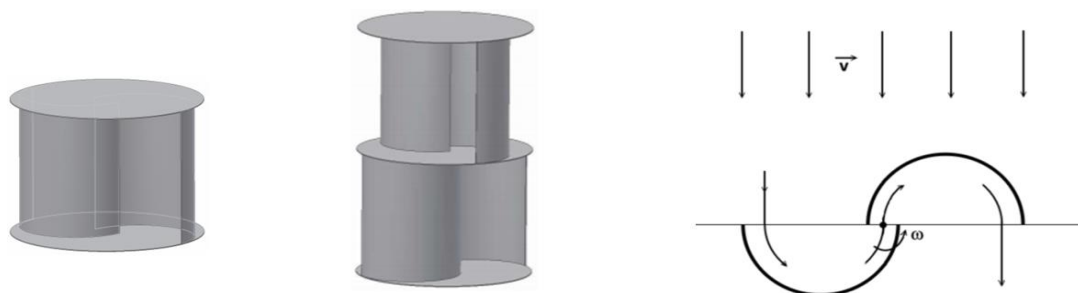
Mističkový anemometr

Tento anemometr má ve formě polokoule tři nebo čtyři mističky, které jsou umístěny rovnoměrně po jeho obvodu. Mistička polokoule, která je orientována svojí dutinou vůči směru proudění větru, klade o 3,5 krát větší odpor než mistička polokoule, která je nastavená vůči větru svou vypouklou částí. Tímto vznikne moment sil, jež vyvolá roztočení rotoru. Větrný motor je určen pouze k pohonu měřicího přístroje. [25]

Savoniův větrný motor

Savoniův větrný motor pracuje na obdobném principu jako mističkový anemometr. Rozdíl je takový, že polokulové mističky jsou nahrazeny dvěma polo-válcovými plochami, jak přehledně znázorňuje Obr. 2.4. Zakřivené plochy lopatek také způsobí navíc tlakový spád, jenž nepatrně zvýší účinnost. [25]

Počet otáček je závislý na poloměru rotoru, rychlosti větru a také na případném zatížení. Čím větší je poloměr rotoru, tím menší je počet otáček a tím vyšší je točivý moment. Pokud je naopak malý poloměr rotoru, je nízký točivý moment. Pod určitou zátěží počet otáček rotoru výrazně klesá. V případě, že rotor není zatížen, je obvodová rychlost u dvoustupňového motoru zhruba o 1,8 krát vyšší než rychlost větru. [26]



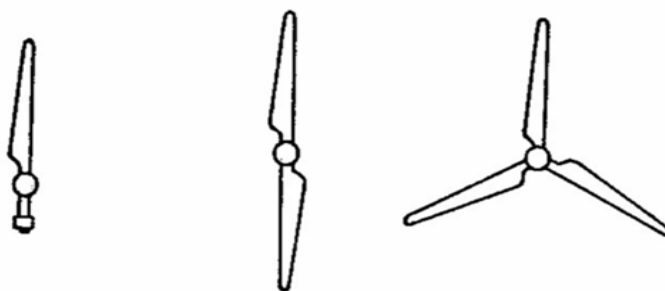
Obr. 2.4 Savoniův větrný motor (zleva): Jednostupňový, Dvoustupňový, Znárodnění působení větru na dvě polo-válcové plochy; převzato z [27], [25]

- **Větrné motory pracující na vztlakovém principu**

Zásadní funkci vykonává vztlak. Při obtékání vzduchu na speciálně tvarovaný profil lopatek rotoru vzniká aerodynamická vztlaková síla. Působením vztlakových sil na lopatky se kinetická energie větru mění na otáčivou energii. Díky tomuto vztlaku dosahuje mnohem vyšší účinnosti oproti větrným motorům pracujících na odporovém principu. Základními zástupci jsou vrtulkové motory, které se v současné době využívají zcela nejvíce. Dalšími zástupci jsou lopátkové motory a Darriesův větrný motor. [7], [24]

Vrtulkové motory

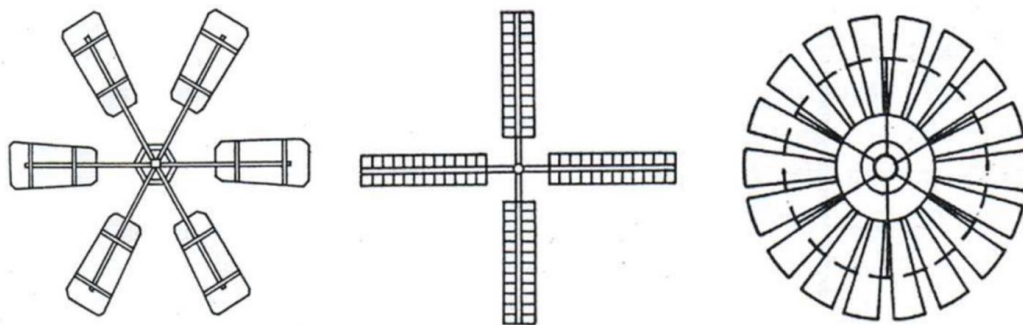
Vrtule se nejčastěji vyrábějí v trojlistém provedení. V méně obvyklém konstrukčním provedení se vyrábí vrtule dvoulisté, čtyřlisté a také jednolísté s protizávažím. Vrtulové lopatky jsou schopny se natáčet kolem své podélné osy. Tím umožňují lepší regulaci otáček a výkonu, jednodušší rozběh rotoru a aerodynamické brzdění. Existují také i větrné elektrárny s protiběžnými vrtulemi. [7]



Obr. 2.5 Uspořádání vrtulí větrných motorů (zleva): Jednolísté, Dvoulisté, Trojlisté; převzato z [7]

Lopátkové motory

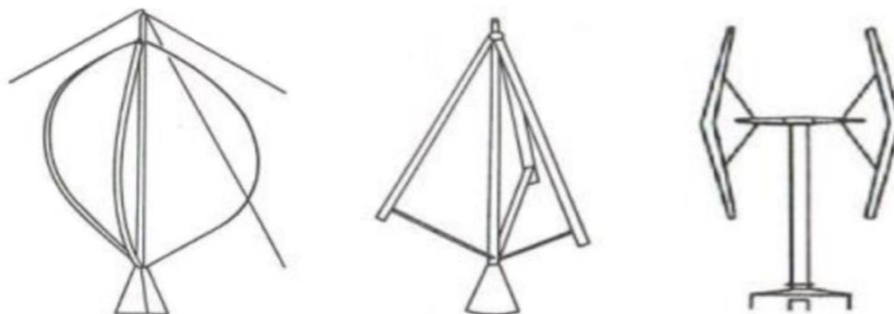
Větrná kola mají prosté, zpravidla plechové lopatky. Počet lopatek, který bývá od čtyř do několika desítek, závisí na požadované rychloběžnosti a na průměru větrného kola. V zásadě platí, že čím větší je počet lopatek, tím má větší moment sil a jednodušeji se větrný motor rozbíhá. [7]



Obr. 2.6 Uspořádání lopatek větrných motorů (zleva): Rotor větrného čerpadla s plechovými lopatkami, Rotor z větrného mlýna, Americké větrné kolo s větším počtem lopatek; převzato z [7]

Darrieusův větrný motor

Rotor Darrieusova větrného motoru se vyrábí ve dvou, troj anebo v čtyřlístém provedení. Obr. 2.7 vlevo znázorňuje Φ -tvar, kdy jeho lopatky s aerodynamickým profilem by měly mít takový tvar, aby namáhání odstředivými silami na ohyb byl minimální. Konstrukce H-tvaru a Δ -tvaru jsou tvořeny dvěma popřípadě vícero lopatkami, které mohou být upevněny na rameni ve svislé poloze (H-tvar) anebo v nakloněné poloze (Δ -tvar). Nevýhoda Darrieusova motoru je, že vyžaduje pomoc při náběhu. [7], [28]



Obr. 2.7 Rotor Darrieus se svislou osou se (zleva): zakřivenými lopatkami Φ -tvar, rovnými lopatkami Δ -tvar, lopatkami H-tvar; převzato z [7]

2.2.3 Dle velikosti větrných elektráren

- **Větrné mikroelektrárny**

Mikroelektrárny představují zařízení na výrobu stejnosměrného proudu při napětí 12 V či 24 V. Část elektrické energie se nashromažďuje do akumulátorů, která se využívá k pokrytí spotřebičů či osvětlení, když nefouká vítr. Mikroelektrárny se charakterizují přirozeně svými malými rozměry, jež dosahují řádově několik málo metrů. Výkon bývá zpravidla od 10 W do 1 kW. Zařízení je vybaveno pomocným kormidlem, které zajišťuje správné natočení. Tyto mikroelektrárny jsou vhodné například pro napájení reklamních panelů u dálnic, měřících stanic nebo pro chaty a chalupy, kde není možné mít zavedenou rozvodnou síť. Podmínkou je však dostatečná větrná oblast. Mnohdy se využívají také jako doplněk k fotovoltaickým panelům. [29]



Obr. 2.8 Větrná mikroelektrárna; převzato z [30]

- **Malé větrné elektrárny**

Malé větrné elektrárny jsou zařízení na výrobu elektrické energie při výstupním napětím 24 V, 230 V nebo 400 V. Tyto VtE můžou z hlediska konstrukce vypadat odlišně. Za prvé mohou mít konstrukční provedení jako větší mikroelektrárny, které mají výkon od 1 kW do 5 kW. Jiní ale mají konstrukční provedení jako menší střední elektrárny, které dosahují výkony nad 10 kW. Uvnitř gondoly je uložen buď asynchronní generátor, anebo u dražších malých elektráren je vybaven synchronním generátorem buzeným permanentními magnety. VtE obsahují boční pomocné rotory, které jsou určené k natáčení systému. Malé elektrárny jsou vhodné například pro rodinné domy, chaty a chalupy, jež využívají větší spotřebu energie. Tyto elektrárny většinou nedodávají energii do rozvodné sítě. [29]

- ***Střední a velké větrné elektrárny***

Stavba střední a velké větrné elektrárny je velice obdobná. Rozdíl spočívá mnohdy ve velikosti, v dimenzování mechanických částí a také v samotném zhotovení gondoly i tubusu. [29]

Střední VtE dodávají energii do rozvodné sítě. Tyto elektrárny se leckdy využívají v seskupení jako větrné farmy. Zařízení může dosáhnout výkonu od 100 do 450 kW. Velké VtE dodávají vždycky elektrickou energii do rozvodné sítě. Využívají se pro napájení vesnic a měst. Výkon jedné elektrárny může dosáhnout stovek kW až maximálně jednotek MW, přičemž výstupní napětí je v řádu kV. V gondole jsou umístěny buď synchronní generátory, které dodávají proud při napětí 660 V a vyšší, anebo mnohapolové generátory, jež nevymáhají převodovou skříňku. Zařízení jsou vybaveny pomocnými motory, jež jsou určeny pro systém natáčení směru větru. Výhoda při využití aktivní regulace výkonu Pitch je, že i u nižších rychlostí větru je produkce vyrobené energie vysoká. Nicméně nevýhodou této regulace jsou velké pořizovací náklady. [29]

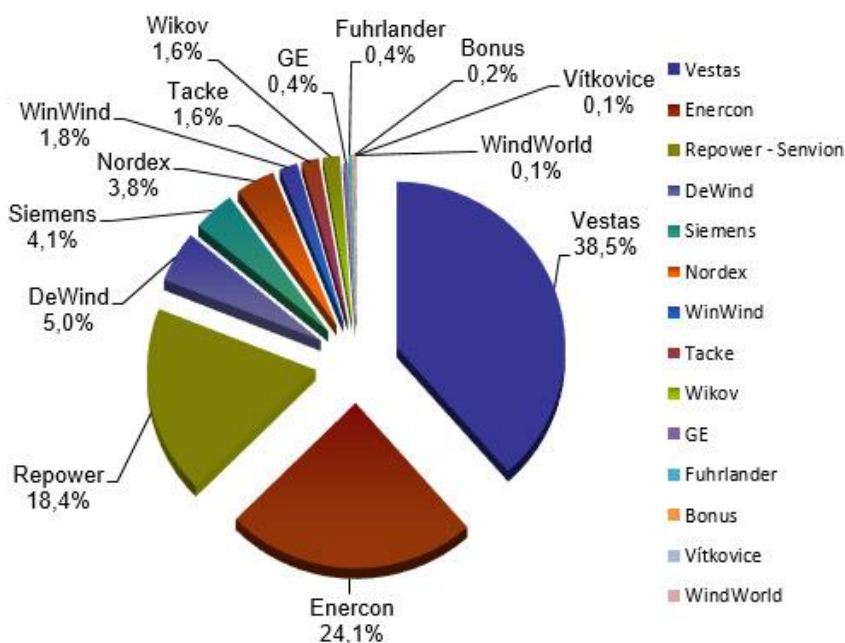
Pro větrné elektrárny platí reálný předpoklad, že u instalovaného výkonu 10 MW se již tento výkon zvyšovat nebude. Hlavní důvod je především kvůli dopravě a ve zhotovení samotné větrné elektrárny. Mnohdy s velkými VtE dochází k logistickým problémům při dopravě na místo instalace. Například lopatka o délce více než 80 m se již těžko dopravuje na místo instalace. Také bývá často problém umístění gondoly na stožár. Výška sloupu se může nacházet až kolem 100 m, přičemž není mnoho vysokých jeřábů, které jsou k dispozici pro zdvihání gondoly a dalších, velkých a těžkých břemen do takovéto výšky. [13]

2.3 Zásadní výrobci větrných elektráren v Evropě

Instalovaný výkon VtE v Evropě v posledních letech nepatrně rostl, přičemž se také zvyšovala jejich celková výroba elektrické energie. V roce 2019 dosáhla celková výroba energie na 390,5 TWh. V roce 2020 celková výroba vzrostla na hodnotu 417,9 TWh. Jedná se o 7 % meziroční nárůst oproti minulému roku. [31]

Česká republika značně zaostává oproti ostatním státům Evropy. Vyplývá to ze získaných dat z roku 2019. V tomto roce pokrýval vítr zhruba 15 % spotřeby elektrické energie v Evropě, zatímco v ČR pouze méně než 1 %. Nejvíce vyrobených větrných elektráren přibýlo v Německu, Spojeném království, Francii i Španělsku. [32]

V Evropě se nachází mnoho výrobců větrných elektráren. Mezi zásadní výrobce VtE se řadí společnosti Vestas, Siemens Gamesa, Enercon, Nordex a Wikov. Každá společnost se liší především ve vyspělosti. Větrné elektrárny se mohou lišit v realizaci, ve velikosti, ve výkonech, ve využití buď asynchronního anebo synchronního generátoru, a také zdali gondola obsahuje převodové ústrojí či nikoliv. Pod následujícím obrázkem jsou charakterizováni zásadní výrobci VtE.



Obr. 2.9 Instalace větrných elektráren v ČR podle výrobců v MW; převzato z [33]

2.3.1 Vestas

Podnik Vestas představuje dánský výrobce, prodejce a opravář větrných turbín. Firma provozuje výrobní závody v mnoha evropských i mimo evropských zemí jako například v Německu, Nizozemsku, Švédsku a také samozřejmě v Dánsku. Vestas patří mezi největší dodavatele větrných turbín na světě a také je první společností, která za jeden rok (2019) nainstalovala v 35-ti státech zhruba 11,3 GW motorů. Na území ČR je umístěno celkem 65 VtE Vestas, ale další se již neplánují, protože ČR veškerou spolupráci s touto firmou

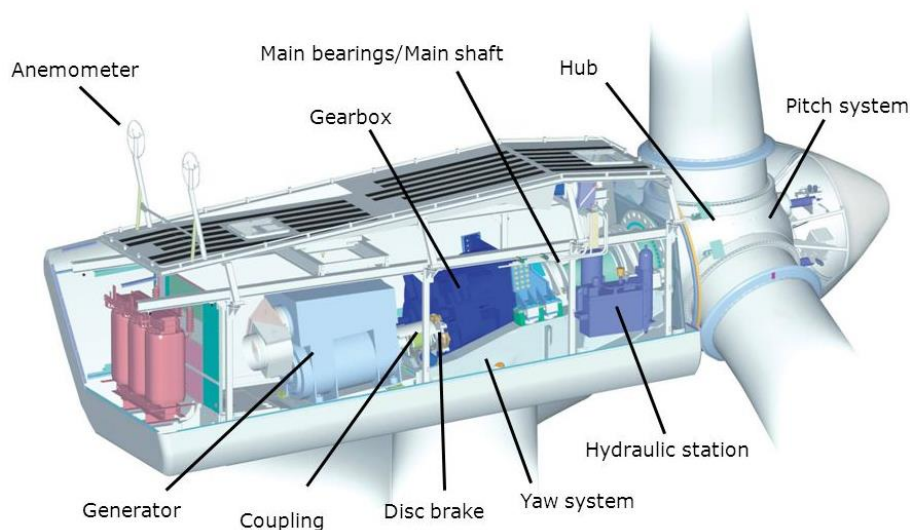
v roce 2020 ukončila. [34], [35], [36]

Podnik, který má více než 40 let zkušeností, za posledních desítek let navýšil výkon svých elektráren z prvotních 30 kW na současných 4 200 kW. Vestas instaluje elektrárnu každé 3 hodiny. Výrobce VtE uplatňuje v gondole konstrukční uspořádání: rotor – převodovka – asynchronní generátor. Toto sestavení zajišťuje spolehlivé konstrukční sjednocení, kdy asynchronní generátor je schopný provozu v rozmezí otáček, tudíž samotná regulace kompletního systému je snadnější. [36], [37]

Vestas má mnoho typů modelů, které můžeme dle plošin rozdělit do 3 skupin.

- **VtE – Plošina 2 MW**

Mezi tyto větrné elektrárny se zařazují typy V90, V100, V110, V120. Modely V-xx se rozumí V jako společnost Vestas a xx znamená průměr rotoru uvedený v metrech. Například V90, který je pomaloběžný stroj s otáčkami v rozmezí 8 – 17 ot/min, má průměr rotoru 90 m. V90 začíná pracovat od rychlosti větru 4 m/s na rozdíl od ostatních typů, které začínají pracovat již od rychlosti větru 3 m/s. Vypínací rychlost je téměř u každého typu jiná. U V90 dochází k vypínací rychlosti větru při 25 m/s, například oproti V150, které se vypnou již při rychlosti 18 m/s. Všechny uvedené typy mají na rotoru tři listy a vlastní významnou detekci na led, kouř a stín. Provoz zajišťují při nízkém až silném větru. Větrné elektrárny se mohou používat buď na pevnině anebo na moři. [38]



Obr. 2.10 Vodorovná osa větrné turbíny gondoly Vestas V90 2MW; převzato z [39]

- ***VtE – Plošina 4 MW***

Mezi tyto větrné elektrárny patří typy V105, V112, V117, V126, V136, V150, V155. Průměry rotorů se pohybují od 105 do 155 metrů. Všechny typy mají na rotoru tři listy. Zapínací rychlost větru je od 3 m/s a vypínací rychlost větru se pohybuje kolem 20 m/s. Provoz zajišťují při silném větru. Tyto větrné elektrárny se používají jak na pevnině, tak také na moři. [38]

- ***VtE – Plošina EnVentus***

Poslední skupina EnVentus, která byla představena teprve v roce 2019, slučuje osvědčené návrhy systémů z platformy 2 MW, platformy 4 MW a technologie turbín platformy 9 MW. Výsledkem je jedna univerzální platformová architektura, jež umožňuje poskytnout vyšší úroveň robustnosti a výkonu. Do této skupiny se zařazují elektrárny typu V150 a V162. Průměry rotorů jsou tedy 150 a 162 metrů. Zapínací rychlost větru je 3 m/s a vypínací rychlost činí 25 m/s. Tyto větrné elektrárny jsou navrženy pro místa se slabým až středním větrem. [38]

2.3.2 Siemens Gamesa

Siemens Gamesa je španělsko-německý podnik sídlící ve Španělsku. Jedná se o druhého největšího světového výrobce větrných turbín. Také tato firma hodně spolupracuje se státy Evropy, ale i mimo ni. Firma vyrábí větrné turbíny, které mají zastoupení ve všech aspektech podnikání: offshore, onshore a služby. [40]

Tato firma se díky 40-ti letům zkušeností v oblasti onshore stala prvotřídní na úspěšné projekty a provozy. Větrné turbíny na pevnině pokrývají celé třídy větru. Společnost rovněž vynikla v offshore oblasti, kdy v roce 1991 byla průkopníkem s první větrnou elektrárnou na světě. Od této doby se Siemens Gamesa stala celosvětovým vůdcem v odvětví výroby energie na moři. [41]

Také větrné elektrárny Siemens Gamesa mají mnoho typů modelů, které můžeme dle jejich využití rozdělit do 2 skupin.

- Větrné elektrárny na pevnině

Siemens Gamesa se z hlediska onshore dělí na 5 skupin. Tyto skupiny jsou SG: 2.X, 3.X, 4.X, 5.X a Legacy Siemens. Každá z těchto skupin má několik typů větrných elektráren. Nejnižší typ se označuje SG 2,1-114, který se vyznačuje tím, že jmenovitý výkon má 2,1 MW a průměr rotoru je 114 m. Tento typ je spíše využíván při slabším větru. Legacy Siemens je podle zjištěných informací dostupný pouze pro japonský trh. [41]

- Větrné elektrárny na moři

Mezi tyto větrné elektrárny se zařazují typy, jejichž jmenovitý výkon se pohybuje od 6 do 14 MW. Tyto typy mají turbíny s přímým pohonem. Společnost nově představila dvě největší VtE. První se jedná o novou větrnou turbínu určenou pro provoz v mořských větrných parcích, jejichž kapacita je 10 MW s rotorem, který má průměr 193 m. Později společnost představila další offshore větrnou turbínu o výkonu 14 MW s průměrem rotoru 222 m. [41]

2.3.3 Enercon

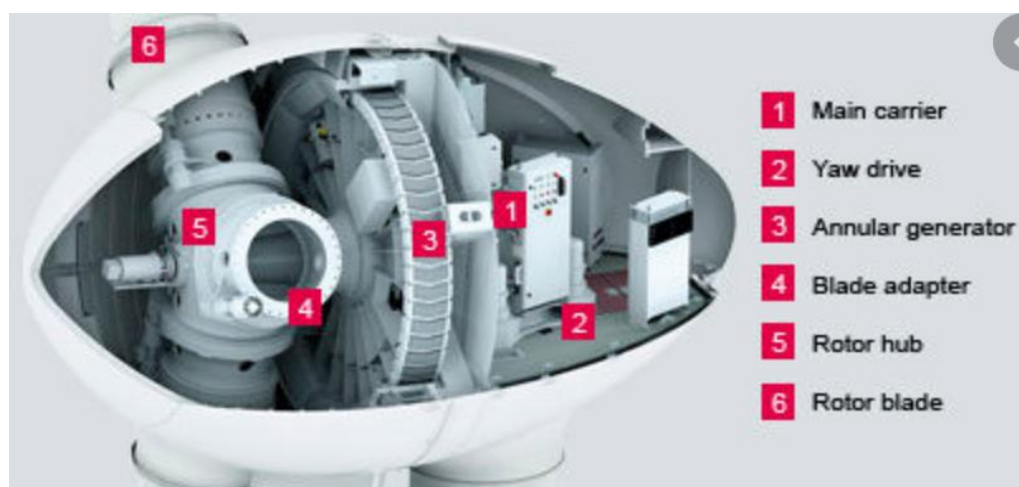
Další významná firma se nazývá Enercon, která sídlí v Německu. Jedná se o čtvrtého největšího výrobce větrných turbín na světě. Společnost má výrobní závody v mnoha zemích jako například v Německu, ve Švédsku nebo v Portugalsku. V roce 2017 se nainstalovalo kolem 26 300 větrných motorů s výkonem převyšujícím 43 GW. [42]

Výrobce uplatňuje gondolu VtE s mnohapólovým synchronním generátorem. Gondola se využívá bez převodovky. Bez využití převodovky je nízká hmotnost gondoly, hlukové emise, případné eventuální poruchy a eliminace ztrát, jež by v ní nastaly. Rotor má jeden prstenec cívek a druhý prstenec je statorový. [43]

Větrné elektrárny Enercon mají mnoho typů modelů, které můžeme dle jmenovitého výkonu rozdělit do 3 skupin. Všechny následující uvedené typy jsou realizované bez převodovky, mají variabilní rychlost a tři lopatky.

- VtE pro malý výkonový rozsah 800 – 900 kW

Mezi tyto větrné elektrárny se zařazují typy E-44, E-48 a E-53. Modely E-xx se rozumí E jako společnost ENERCON a xx znamená průměr rotoru uvedený v metrech. Modely E-48 a E-53 mají jmenovitý výkon generátoru 800 kW. Typ E-48 má průměr rotoru 48 m a E-53 má průměr rotoru 53 m. Další typ E-44 má jmenovitý výkon 900 kW. Výška ocelového stožáru je kolem 50 - 76 m. Počet otáček dosahuje rychlosti 12 až 36 ot/min. Tyto VtE jsou vhodné zpravidla pro nižší rychlost větru od 4 m/s. [44]



Obr. 2.11 Vodorovná osa větrné turbíny gondoly Enercon E-44; převzato z [45]

- VtE pro vyšší výkonový rozsah 2000 – 3050 kW

Mezi tyto větrné elektrárny se zařazují typy E-70, E-82, E-92, E-103, E-115, E126 atd. Nejmenší jmenovitý výkon (2000 – 2350 kW) mají první 4 typy. Největší jmenovitý výkon z této skupiny má E-126, který dosahuje 3000 kW. Výška tubusu může být 58 – 113 m. Počet otáček dosahuje rychlosti 6 až 18 ot/min. Tyto VtE jsou určeny pro rychlost větru vyšší než 5 m/s. [44]

- VtE pro výkonový rozsah nad 3050 kW

Mezi tyto větrné elektrárny se zařazují typy E-115, E-126, E-138, E-147 a E-160. Nejmenší jmenovitý výkon má E-126 (3500 kW) a největší má E-160 (4600 kW). Ocelový

tubus dosahuje výšky nad 120 m. Rychlost počtu otáček se pohybuje mezi 5 až 11 ot/min. Tyto VtE jsou potřebné pro rychlost větru vyšší než 6 m/s. [44]

2.3.4 Nordex

Další uvedená společnost se nazývá Nordex, která sídlí v německém městě Rostock. Tato firma navrhuje, prodává a vyrábí větrné motory. V roce 2016 obchodní jednotka výroby větrných motorů spojila společnosti Acciona Windpower s výrobními jednotkami firmy Nordex, přičemž vznikla jedna firma, která se jmenuje Skupina Nordex. Zatímco Nordex vyniká v montáži lopatek a v citlivosti na hluku VtE, Acciona Windpower se specializuje na výrobu betonových stožárů, které se staví přímo na místě stavby větrné elektrárny. Skupina Nordex využívá větrné turbíny typu AW3000, které se nachází ve výšce 80 až 140 m a turbíny řady Delta4000 s výškou až 120 m. [46]

Platforma AW3000 se v dnešní době řadí k nejvýkonnějším modelům. Jedná se o větrnou elektrárnu se třemi lopatkami a jmenovitým výkonem dosahujícím 3000 kW. Technologie umožňuje možnosti proměnlivé rychlosti s hydraulickým ovládním sklonu pro každou lopatku rotoru, aby se minimalizovalo zatížení a zachytila se maximální energie. Zařazují se sem typy: AW125/3000 - 3150, AW132/3465, AW140/3000 a AW148/ 3000 – 3300. Typ AW125 se stal v roce 2018 nejprodávanější větrnou turbínou na americkém trhu. Tento typ je vhodný pro místa s mírným až silným větrem. Zapínací rychlost větru dosahuje při 3,5 m/s a vypínací rychlosti větru dojde při 25 m/s. Rychlost otáčení se pohybuje 7,3 – 14,7 ot/min. Nejnovějším vývojem řady AW3000 je AW148/3000, který je vhodný pro slabý vítr. Oproti AW125 dochází k zapínací, vypínací rychlosti větru a rychlosti počtu otáčení již při nižších hodnotách. [47]

Jak již bylo zmíněno, dále také Skupina Nordex využívá větrné turbíny z řady Delta4000. Mezi tyto řady se zařazuje speciální typ N149/ 4 – 4,5, jelikož se umožňuje přizpůsobit individuálním požadavkům provozovatele sítě, místním větrným podmínkám a omezením hluku. [48]

2.3.5 Wikov

Podnik Wikov industry a.s., která sídlí v Praze, se rozděluje do mnoho oblastí výrobních závodů. Z hlediska větrných elektráren jsou důležitá dvě odvětví. První odvětví se nazývá Wikov Gear s.r.o., který sídlí v Plzni. Wikov Gear se zaměřuje na vývoj a výrobu mechanických převodovek v tepelné, vodní a ve větrné energetice. Druhé odvětví se jedná o průmyslovou firmu Wikov Wind a.s. se sídlem v Praze. Wikov Wind se zaměřuje na kompletní dodávky větrných elektráren, jejich stavbu, servis a zajišťuje také stěžejní montáže strojoven i celého pohonu. [49], [50]

Wikov využívá gondolu větrné elektrárny s převodovkou, variátorem a synchronním generátorem. Variabilní otáčky rotoru VtE zajišťuje převodovka s variátorem (převodovka SPG). Výstupní otáčky jsou stále konstantní. Díky těmto konstantním otáčkám vytváří generátor elektrickou energii, kterou je možné přímo dodávat do sítě. [51]

Systém SPG dokáže plynule měnit převodový poměr v celém rozsahu otáček větrné elektrárny, přičemž dochází k zachování konstantních otáček generátoru. Regulace systému převodového poměru se provádí podle síly větru a rychlosti otáček. Vyšší převodový poměr garantuje produkci elektrické energie při nízkých rychlostech větru. Nižší převodový poměr zajišťuje výrobu elektrické energie při vyšších rychlostech větru. [50], [51]

Mezi tyto větrné elektrárny se zařazují typy: W2000/76, W2000/86 a W2000/93. W2000/xx se rozumí jako společnost Wikov, 2000 vyznačuje jmenovitý výkon 2000 kW a xx znamená průměr rotoru. Typ W2000/93 má z těchto tří větrných elektráren nejvyšší rozměry. Stožár dosahuje výšky od 80 do 100 m a průměr rotoru je 93 m. Při vyšším průměru rotoru je menší maximální rychlost rotoru. Tento typ má maximální rychlost rotoru 18,1 ot/min. Větrná elektrárna typu W2000/76 naopak vykazuje z této skupiny nejmenší rozměry. Věž je vysoká do 70 m, průměr rotoru je 76 m a maximální rychlost rotoru dosahuje 21,9 ot/min. Z hlediska převodového poměru má přirozeně největší hodnotu typ s velkým průměrem rotoru. W2000/93 má převodový poměr 136, naproti tomu W2000/76 má převodový poměr 115. Všechny uvedené větrné elektrárny využívají rotor se třemi lopatky. [52]

3 Návrh větrné elektrárny pro vybranou lokalitu

3.1 Základní podmínky a údaje pro výběr vhodné oblasti

3.1.1 Větrný potenciál

Velice důležitým kritériem pro umístění VtE se řadí dobré větrné podmínky v konkrétní lokalitě. Pokud by totiž daná oblast neměla dostatečně silný vítr, nemá velký význam si elektrárnu pořizovat. Zmapování těchto větrných podmínek na území ČR má na starosti Český hydrometeorologický ústav. Větrnou problematikou se také zabývá Ústav fyziky atmosféry Akademie Věd ČR, který dokonce z meteorologických údajů vytvořil pomocí počítačového programu větrnou mapu pro Českou republiku. Větrná mapa nám určuje průměrnou rychlost větru nejčastěji buď ve výšce 10 m nad zemským povrchem pro menší VtE, anebo ve výšce 100 m nad povrchem pro výstavbu velkých VtE. Vzhledem k mému návrhu menší elektrárny uvádím větrnou mapu s výškou 10 m nad zemí. Obr. 3.1 zobrazuje větrnou mapu, ze které lze poznat, že oblasti s největší průměrnou rychlostí větru jsou znázorněné červenou barvou. Naopak oblasti znázorněné modrou barvou značí nejmenší průměrné rychlosti větru. ČR má tedy opravdu málo oblastí, kde se větrná elektrárna vyplatí umístit. [53]

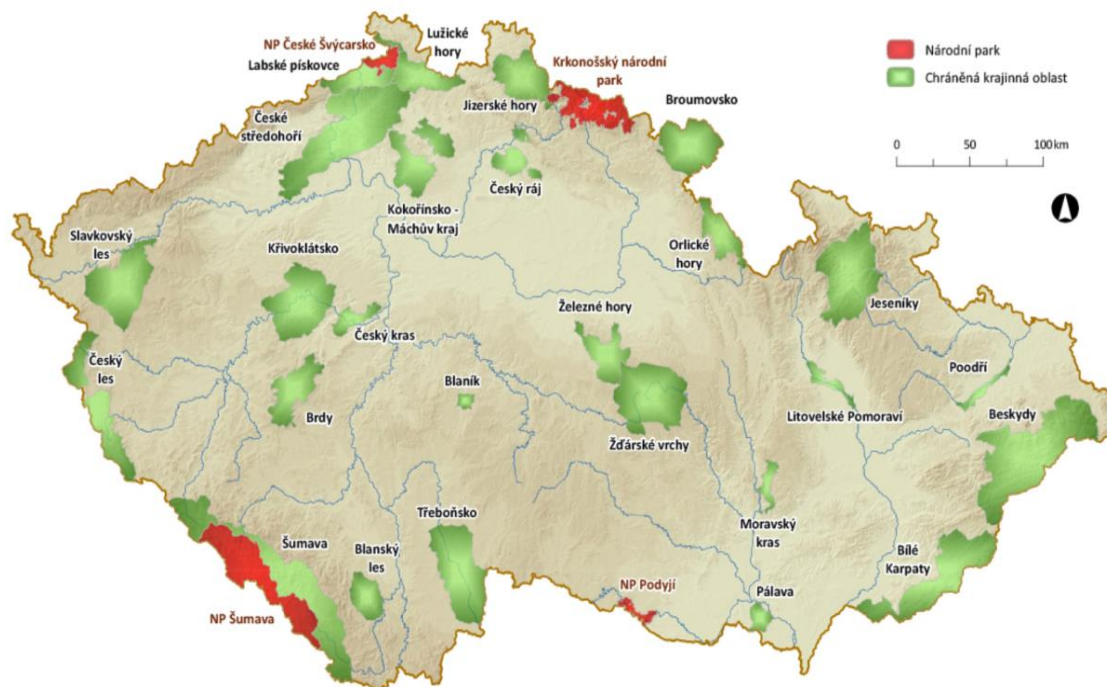


Obr. 3.1 Větrná mapa: Vypočtené pole průměrné rychlosti větru ve výšce 10 m nad zemí; převzato z [54]

Další možností pro zvolení vhodné oblasti je možné určit z již fungujících větrných elektráren v okolí, protože lze zcela předpokládat, že i tam se vyskytují dobré povětrnostní podmínky. Často se však stává, že i tak je nutné pečlivě provést alespoň roční měření rychlosti větru na daném místě. Je to především z důvodu, že meteorologické stanice nemusí být přesné, jelikož nepočítají s drsností povrchu. Pravdou je, že nejlepší podmínky pro větrné elektrárny se nacházejí v přímořských oblastech, neboť se tam vyskytují silné větry až 80 % dní v roce. [55]

3.1.2 Chráněné oblasti

Před pořízením VtE je ještě důležité zjistit, zdali vybraná oblast nezasahuje do chráněného území. Větrné elektrárny nejsou přípustné pro: národní a přírodní rezervace a parky, chráněné krajinné oblasti, v blízkosti národních památek a další podobné oblasti. Tato podmínka se týká většiny větrných elektráren. Pokud si chce ale někdo pořídit vlastní malou elektrárnu, tak je potřeba získat souhlas orgánu ochrany přírody a krajiny. Z Obr. 3.1 a Obr. 3.2 lze vidět, že většina plochy CHKO a NP se ztotožňují s oblastmi vysokého větrného potenciálu. [56], [57]



Obr. 3.2 Mapa znázorňující CHKO a NP, kde by neměly být větrné elektrárny; převzato z [58]

3.1.3 Drsnost povrchu

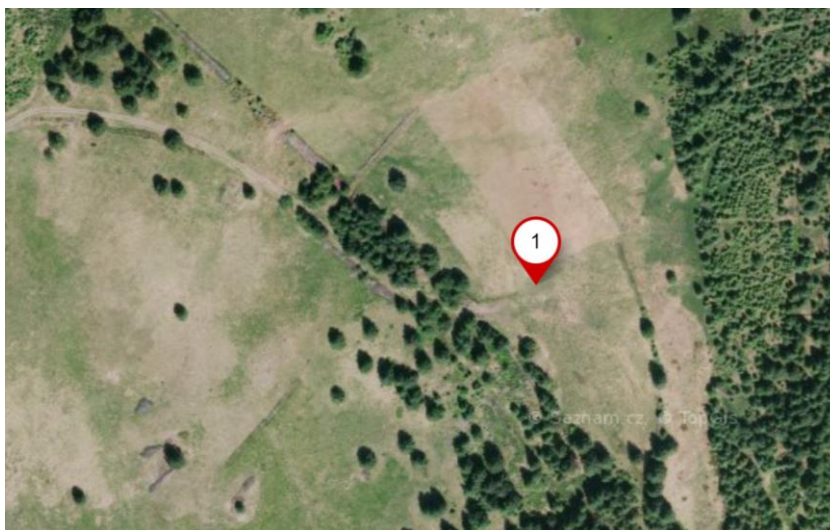
Při výběru oblasti by se měl brát také ohled na drsnost povrchu. Proudění větru v blízkosti povrchu je ovlivněno drsností povrchu. S postupně narůstající výškou se však rychlost větru logaritmičtě zvyšuje. Tudíž rychlost větru ve výšce 10 m je různá než ve výšce 100 m nad terénem. Vítr nad terénem je nejenom zpomalován zábranami, jako jsou např. budovy či údolí, ale také typem povrchu, kdy se jedná např. o les nebo vysokou trávu. Větrnou elektrárnu je nejlépe umístit v otevřeném prostoru. [55]

3.1.4 Proces VtE

Po vyřešení veškerých podmínek se již můžeme zabývat procesem větrné elektrárny na vybraném místě. Pokud bude obec souhlasit s výstavbou VtE, tak přichází většinou na řadu proces posouzení vlivů na životní prostředí – EIA, která hodnotí možný dopad elektrárny na blízké okolí. Dále musí investor zajistit, aby VtE byla v souladu s územním plánem obce. Poté by měl zažádat o rezervaci kapacity v elektrické síti a určení místa připojení. Následně se zahajuje územní řízení, které provádí přesnou realizaci a umístění stavby, a nato stavební řízení, jež má na starosti technické provedení VtE, kdy investor zažádá o vydání stavebního povolení. Na základě tohoto povolení investor zajišťuje financování projektu. Nakonec již může začít samotná stavba VtE, kdy musí později zrealizovaná elektrárna projít ještě zkušebním a kolaudačním řízením. Po skončení kolaudačního řízení konečně dochází k provozu elektrárny, která by měla sloužit kolem 20 let. Menší VtE se vyřizují trochu odlišně. V tomto případě je nutné také mít územní souhlas, stavební povolení, zajistit elektrické vedení a zařídit hlavně různá bezpečnostní řízení. Jeli VtE do 10 kW, pro vlastní potřebu a bez připojení k síti, tak již nic dalšího k zařizování není potřeba. [59], [60]

3.2 Konkrétní výběr a zhodnocení lokality

Navrhovanou větrnou mikroelektrárnu jsem se rozhodla umístit v oblasti Boží Dar, který se nachází na severu Karlovarského kraje. Tato VtE se bude využívat pro osobní spotřebu energie chaty. Boží Dar jsem si vybrala, protože je jeden z mála, který splňuje všechny podstatné podmínky.



Obr. 3.3 Vybraná lokalita; převzato z [61]

VtE bude umístěna v oblasti přívětivým větrným potenciálem. Průměrná rychlost větru se v této vybrané lokalitě vyskytuje totiž 5,22 m/s v 10 m nad zemským povrchem.

Vybraná oblast větrné mikroelektrárny se nenachází v CHKO či jiných podobných oblastech.

V okolí tohoto vybraného místa se vyskytuje nízký lesní porost. Proto by se mělo správně přihlížet k drsnosti povrchu. Podle Tab. 1.1 závislost n na drsnosti povrchu se uvádí hodnota pro nízké lesní $n = 0,21$. Pokud se však vezme v úvahu, že výška osy elektrárny bude mít $h = 10$ m a výška, ve které se provádí měření rychlosti větru $h_0 = 10$ m, tak drsnost povrchu nemá zcela velký význam. Pokud se totiž dosadí hodnoty do vzorečku (1.1) pro drsnost povrchu, tak lze zjistit, že průměrná rychlost větru zůstala stejná.

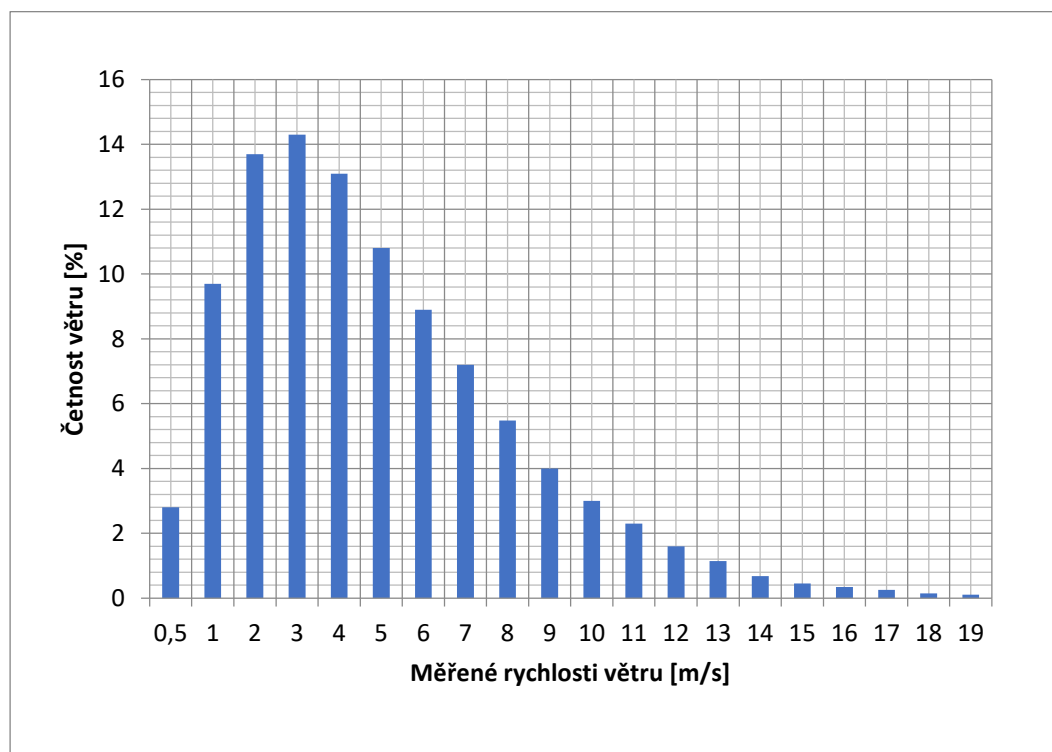
$$v^* = v_0^* * \left(\frac{h}{h_0}\right)^n = 5,22 * \left(\frac{10}{10}\right)^{0,21} = 5,22 \text{ m/s} \quad (3.1)$$

3.3 Četnost výskytu rychlostí větru

Hned po výběru oblasti přichází na řadu měření rychlosti větru na daném místě po dobu jednoho roku. Je však možné toto měření provádět mnohem déle, čímž se získá lepší představa skutečného větrného potenciálu na konkrétním místě.

Můj návrh VtE bude vycházet především podle informací z knihy [7] pro průměrnou rychlost větru 5 m/s za 1 rok, která je uvedená v Příloze 2: Četnost rychlostí větru v procentech pro průměrnou rychlost větru 5 m/s. Tato rychlost větru se bude později využívat k výpočtu návrhu větrného motoru.

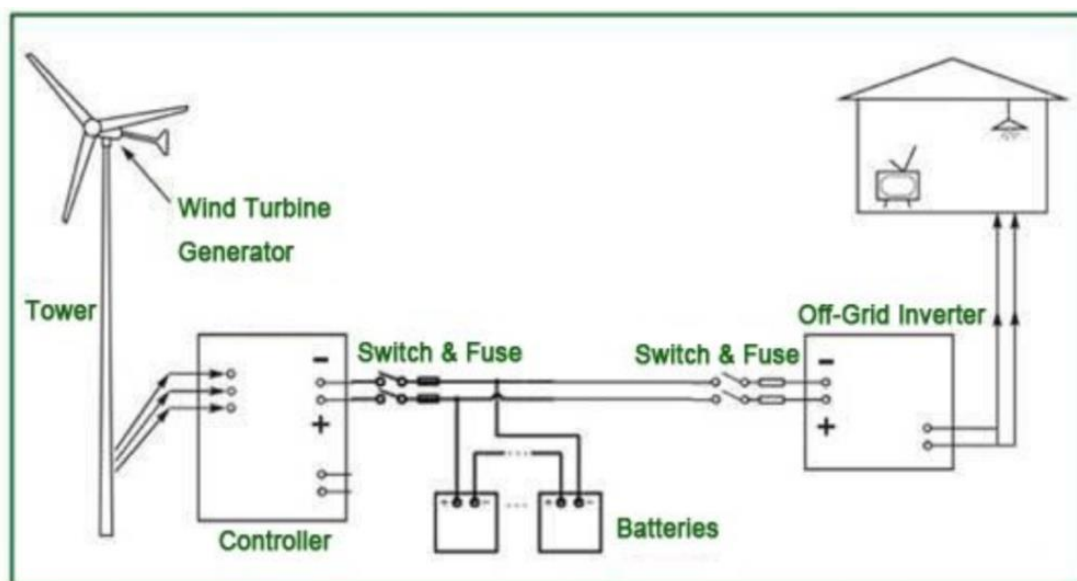
Při ročním trvalém měření se z hodinových odečtů získá 8 760 dat o průměrných hodinových rychlostech větru, z nichž se dá posoudit, jakou část této doby vítr vane určitou rychlostí. Na Obr. 3.4 je znázorněná sloupcová charakteristika četnosti rychlosti větru pro průměrnou rychlost větru 5 m/s, kde na vodorovné ose jsou vynesena data o měřené rychlosti větru, a na svislé ose je délka časového úseku, kdy vítr vane uvedenou rychlostí. [7]



Obr. 3.4 Četnost rychlosti větru pro průměrnou rychlost větru 5 m/s; vlastní zpracování

3.4 Schéma elektrického zapojení větrné mikroelektrárny do chaty

Navrhovaná mikroelektrárna bude k chatě připojena dle autonomního systému. Základem jsou samozřejmě potřebná zařízení pro fungování systému grid off. Ve VtE je umístěný generátor, který pomocí větru vyrábí střídavý elektrický proud. Proud pak teče do regulátoru, jehož úkolem je regulovat dobíjení akumulátorů. Při nabíjení regulátor řídí, aby se baterie nabíjela ideálním proudem. Regulátor tedy chrání baterie před přebíjením i vybitím. Do akumulátoru se uschovává pomocí proudu energie, ze které lze také čerpat, když větrná mikroelektrárna kvůli špatnému počasí není schopna pracovat. Součástí regulátoru je také usměrňovač, který přeměňuje střídavý proud na stejnosměrný. Mezi regulátorem a střídačem jsou umístěny ještě spínače a pojistky. Spínač je určený k vodivému spojení či rozpojení sítě a pojistka slouží k zajištění nadproudové ochrany. Proud poté vede na střídač, který mění stejnosměrný proud na střídavý. Střídač napájí domácí síť a běžné spotřebiče. [62]



Obr. 3.5 Schéma zapojení větrné mikroelektrárny do chaty; převzato z [63]

Zároveň je také důležité vyzdvihnout, že větrná mikroelektrárna bude umístěna na samostatném stožáru vedle chatky, kdy výška osy elektrárny bude dosahovat 10 m. Mikroelektrárna se tedy nebude nacházet na střeše, protože by se jinak přenášelo nepříjemné chvění na chatku.

3.5 Výpočet návrhu větrné turbíny

3.5.1 Energie větru

Je zřejmé, že větrná elektrárna je zařízení, které přeměňuje kinetickou energii větru na elektrickou energii. Kinetická energie E_k pohybujícího se vzduchu se uvádí vztahem

$$E_k = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (3.2)$$

kde m hmotu a v je rychlost větru. Hmotu lze vyjádřit pomocí vztahu

$$m = \rho * V = \rho * A * s \quad (3.3)$$

kde ρ je hustota vzduchu, V objem, A představuje plochu, kterou daný objem protéká. Poslední veličina s , je dráha, kterou urazí pohybující se vzduch. [7]

Je třeba brát na vědomí, že v praxi není možné dosáhnout stoprocentní transformace kinetické energie větru na mechanickou energii, jelikož jinak by došlo ke kompletnímu zastavení proudění větru přes větrnou turbínu, přičemž by účinnost měla nulovou hodnotu. [64]

3.5.2 Teoretický výpočet výkonu hustoty větru a energie za 1 rok

Nejprve si stanovíme teoretickou hustotu výkonu větru P_{vi} , kterou lze získat stoprocentním využitím kinetické energie větru proudícího jednotkovou plochou rotorových lopatek kolmou na směr proudění. Ze vzorečku (3.4) zcela vyplývá, že výkon je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti větru. Výkon větru tedy s rostoucí rychlostí větru stoupá a při menších rychlostech větru dosahuje výkon malých hodnot.

$$P_{vi} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 \quad (3.4)$$

Výkon a rychlost větru se v závislosti na čase mění. Energie protékající za určité časové období jednotkovou plochou je dána vzorcem

$$E_{vi} = P_{vi} * t_{vi} \quad (3.5)$$

kde P_{vi} vyznačuje výkon hustoty větru při proměnlivých rychlostech větru a veličina t_{vi} znamená, kdy vítr vane těmito rychlostmi. V této práci se čas bude vyjadřovat pomocí četnosti rychlostí větru odpovídající dané průměrné rychlosti. Četnosti budou uváděny v procentech. [7]

V Příloze 3 jsou vypočítané hodnoty podle vzorců (3.4) a (3.5). Vzhledem k tomu, že typické větrné elektrárny začínají vyrábět elektrickou energii až při rychlostech větru 3 m/s, tak nižší hodnoty jsou při výpočtu zanedbány.

Jak lze vidět z Přílohy 3, po sečtení všech jednotlivých energií pro každou rychlost nám vyjde energie $E = 18992,274 \text{ W/m}^2$. Důležité však je zjistit celkovou teoretickou elektrickou energii za 1 rok, která udává, kolik energie je schopná větrná turbína za rok vyrobit. Tato celková teoretická energie se vypočítá podle vzorce

$$E_T = \frac{\sum E_{vi} * 8760}{100} \quad (3.6)$$

kde $\sum E_{vi}$ představuje součet jednotlivých energií a 8760 znamená počet hodin v případě, že není přestupný rok. Výpočet vyrobené energie za 1 rok vyšel $E_T = 1663,723 \text{ kWh}$.

3.5.3 Výpočet spotřeby energie chaty za 1 rok

Dále je potřeba stanovit celkovou spotřebu energie chaty za 1 rok. Větrná mikroelektrárna bude pokrývat spotřebiče uvedené v Tab. 3.1. Vaříč, trouba a ohřívač vody budou připojeny na plynový zdroj.

Tab. 3.1 Spotřebiče pokrývané VtE v chatě

Spotřebič	Příkon [W]	Doba činnosti [h]	Spotřeba energie za den [kWh]	Spotřeba energie za rok [kWh]
Kombinovaná lednice	75	17	1,275	465,375
Mikrovlnná trouba	800	0,1	0,08	29,2
TV	100	1,5	0,15	54,75
Kompaktní žárovky (4 ks)	44	4	0,176	64,24
Další	125	0,76	0,095	34,675
Celkem	1144	22,7	1,781	648,24

Po určení příkonů a doby činností jednotlivých spotřebičů, které budou využity v chatě, se již může stanovit spotřeba energie za den a rok. Celková spotřeba energie za rok vyšla na hodnotu $E_S = 648,24$ kWh.

3.5.4 Reálný výpočet výkonu a energie větrné turbíny za 1 rok

Nyní se zaměříme na reálný výpočet hustoty výkonu větru proudícího plochou kolmou na směr proudění. Výkon větrné turbíny se vyjádří dle vzorce

$$P_{ji} = \frac{1}{2} * \rho * C_p * A * v_j^3 \quad (3.7)$$

kde ρ je hustota vzduchu s hodnotou $1,2 \text{ kg/m}^3$, C_p představuje výkonový součinitel, A znamená velikost plochy rotoru, který lze spočítat jako $A = \pi * r^2$ [m²], kdy r je poloměr rotoru a v_j vyjadřuje jmenovitou rychlost větru. [7]

Nejprve se však musí zjistit výkonový součinitel C_p , který je důležitý k určení odpovídající větrné turbíně. Kapacitní faktor, který znamená účinnost transformace energie z větru na energii elektrickou, lze určit vztahem [7]

$$C_p = \frac{E_S}{E_T} \quad (3.8)$$

kde, jak již bylo řečeno $E_S = 648,24$ kWh představuje celkovou spotřebu energie za rok a $E_T = 1663,723$ kWh získanou teoretickou energií pomocí větrné turbíny za rok. Po dosazení a následném výpočtu vyšlo $C_p = 0,389$. Když je již známa hodnota součinitele C_p , tak se nyní může určit příslušný typ větrné turbíny podle Tab. 3.2

Tab. 3.2 Hodnoty C_p a λ u typů větrných turbín; převzato z [7]

Typ rotoru	$C_{P \text{ opt}}$	λ_{opt}	λ_{max}
Mnoho-lopatkový (americký)	0,35	1,1	2
Trojlistý	0,18 – 0,39	2,5 – 6	-
Dvoulistý	0,20 – 0,48	6 – 10	-
Savonius, dělený	0,23	0,85	1,8
Darrieus třílistý	0,362	4,66	6,76
Darrieus jednolistý	0,236	6,1	10
Miskový kříž	0,0195	0,14	0,31

Z Tab. 3.2 lze vidět, že vypočtená hodnota C_p odpovídá typu rotoru trojlistému i dvoulistému. Vzhledem k tomu, že trojlistý rotor se rozbíhá při nižších rychlostech větru, má lepší vyvážení, vykonává nižší hlučnost a objevuje se na trhu mnohem častěji, než dvoulistý rotor, tak pro tento návrh větrné turbíny bude zvolen právě trojlistý rotor.

U menších větrných motorů se však volí nižší výkonový součinitel. Bude se tedy počítat s menší hodnotou $C_p = 0,34$.

Ještě je nutné si stanovit poloměr rotoru větrné mikroelektrárny, která pokrývá domácí spotřebiče. Obecně platí, že pokud bude mít VtE větší poloměr rotoru, tak bude větší také výkon. V našem případě pokud by byl zvolen například opravdu malý poloměr rotoru, tak vyrobená energie by byla menší než energie spotřebovaná, což by se nevyplatilo. Proto bude zvolen vyšší poloměr rotoru $r = 0,85$ m, kdy vyrobená energie je větší než spotřebovaná.

Po zjištění potřebných veličin se nyní již může vypočítat výkon větrné turbíny podle zmiňovaného vzorečku (3.7). Poté se musí určit opět energie, která se vyjádří stejným způsobem, kdy se zjišťoval teoretický výpočet energie za 1 rok. Energie je tudíž dána vztahem

$$E_{ji} = P_{ji} * t_{vi} \quad (3.9)$$

kde P_{ji} je výkon větrné turbíny a t_{vi} znamená čas, kdy vítr vane.

V příloze 4. je uvedený skutečný výpočet výkonů a energií pro jednotlivé rychlosti větru. Součet energií pro každou rychlost vyšel $E = 14656,95$ W. Celková reálná energie za 1 rok, která se zjistí také dle vzorce (3.6) dosahuje hodnoty $E_R = 1283,949$ kWh. Jak je již známo, celková roční spotřeba energie v domě je $E_s = 648,24$ kWh. Byla tedy splněna podmínka, že vyrobená energie VtE je vyšší, než energie spotřebovaná. Přebytečná energie se pokryje na energetické ztráty (např. v generátoru, akumulátorech, střídači, atd.), ke které dochází při vedení elektrické energie. Zbylá energie se může poté také spotřebovat na další spotřebiče, které by mohl majitel využívat v chatce.

Z Přílohy 4 lze také vyčíst, že s postupujícím nárůstem rychlosti větru zároveň roste výkon větrné turbíny. Pro rychlost větru 5 m/s vychází jmenovitý výkon 57,879 W.

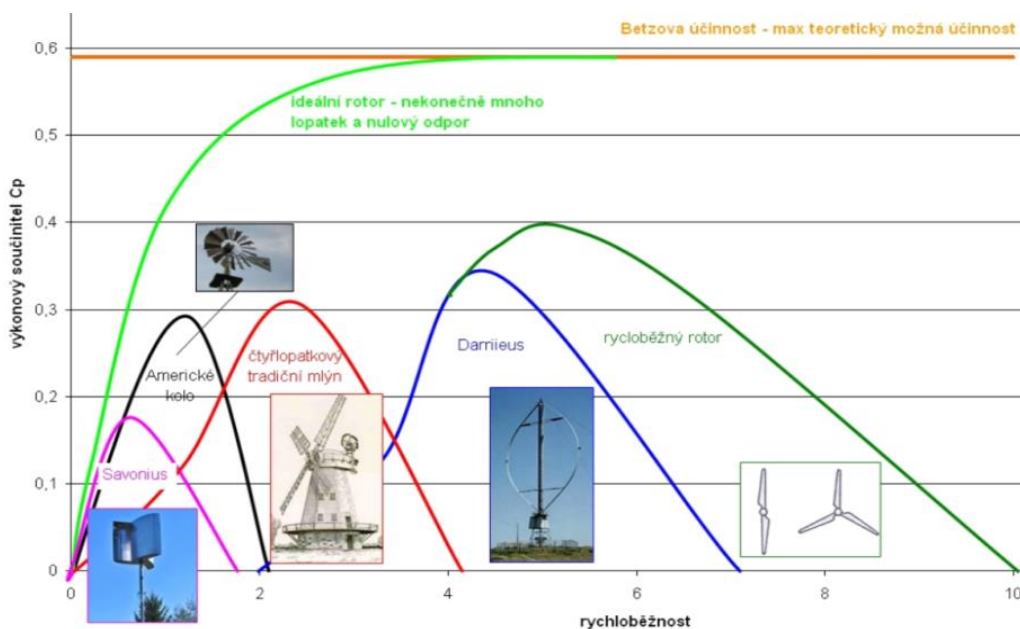
3.5.5 Výpočet jmenovitých otáček

Pro větrnou turbínu je nutné také zjistit jmenovité otáčky při jmenovitém výkonu, jenž odpovídá rychlosti větru pro 5 m/s. [7]

$$n_j = \frac{60 \cdot \lambda_0 \cdot v_j}{\pi \cdot D} \quad (3.10)$$

kde λ_0 představuje součinitel rychloběžnosti, v_j je jmenovitá rychlost větru a D znamená průměr rotoru.

Nejdříve se však musí určit součinitel rychloběžnosti λ_0 . Tato bezrozměrná veličina vyjadřuje poměr, jakou rychlostí se otáčejí konce lopatek vůči rychlosti větru. Pro každý typ rotoru se liší jeho rychloběžnost. Čím menší má rotor počet lopatek, tím vyšší má rychloběžnost, přičemž se rychleji rotor otáčí. Na Obr. 3.6 jsou znázorněny průběhy jednotlivých typů rotoru, ve kterém lze vidět, že rychloběžné rotory dosahují λ_0 nejvýše. U trojlístého rotoru se pohybuje od 2,5 do 6. Pro můj návrh VtE je zvolen součinitel rychloběžnosti $\lambda_0 = 5$. [65]



Obr. 3.6 Rozdělení rotorů větrných elektráren dle jejich rychloběžnosti; převzato z [65]

Po dosažení a následném výpočtu jmenovitých otáček rotoru podle vzorce (3.10) vychází otáčky $n_j = 280,862 \text{ min}^{-1}$.

3.6 Přehledné shrnutí podstatných údajů návrhu větrné turbíny

Veškeré vypočítané a zjištěné údaje z podkapitoly 3.5 na návrh větrné mikroelektrárny si nyní můžeme přehledně shrnout do Tab. 3.3.

Tab. 3.3 Shrnuté provozní údaje návrhu větrné turbíny

Průměrná rychlost větru	5 m/s
Výroba energie od rychlosti větru	3 m/s
Poloha větrné elektrárny	Proti směru větru
Osa otáčení rotoru	Vodorovná
Typ rotoru	Trojlistý
C_p – Výkonový součinitel	0,34
Poloměr rotoru	0,85 m
Velikost plochy rotoru	2,269 m ²
Jmenovitý výkon pro 5 m/s	57,879 W
Součinitel rychloběžnosti	5
Jmenovité otáčky rotoru	280,862 min ⁻¹
Výška osy větrné turbíny	10 m

4 Zhodnocení návrhu větrné elektrárny

Tato kapitola se věnuje samotnému zhodnocení navrhované větrné mikroelektrárny. Zhodnocení z energetického a ekonomického hlediska se provede na základě porovnání s vhodnými nabídkami, které se momentálně vyskytují na našem trhu. Nakonec se provede posouzení z ekologického hlediska na základě možných ekologických dopadů.

Na českém trhu se nachází pouze pár větrných mikroelektráren. Mnou navrhovaná větrná elektrárna odpovídá mikroelektrárně NE-500M, protože základní údaje jsou stejné. Následně bude VtE porovnána ještě s typem NE-400M, jehož poloměr rotoru je nižší. Obě tyto VtE jsou vhodné pomocí systému grid off dodávat elektrickou energii do spotřebičů, které jsou v chatě. NE-500M a NE-400M mají základní údaje uvedené v Tab. 4.1

Tab. 4.1 Provozní údaje NE-500M a NE-400M; převzato z [66], [67]

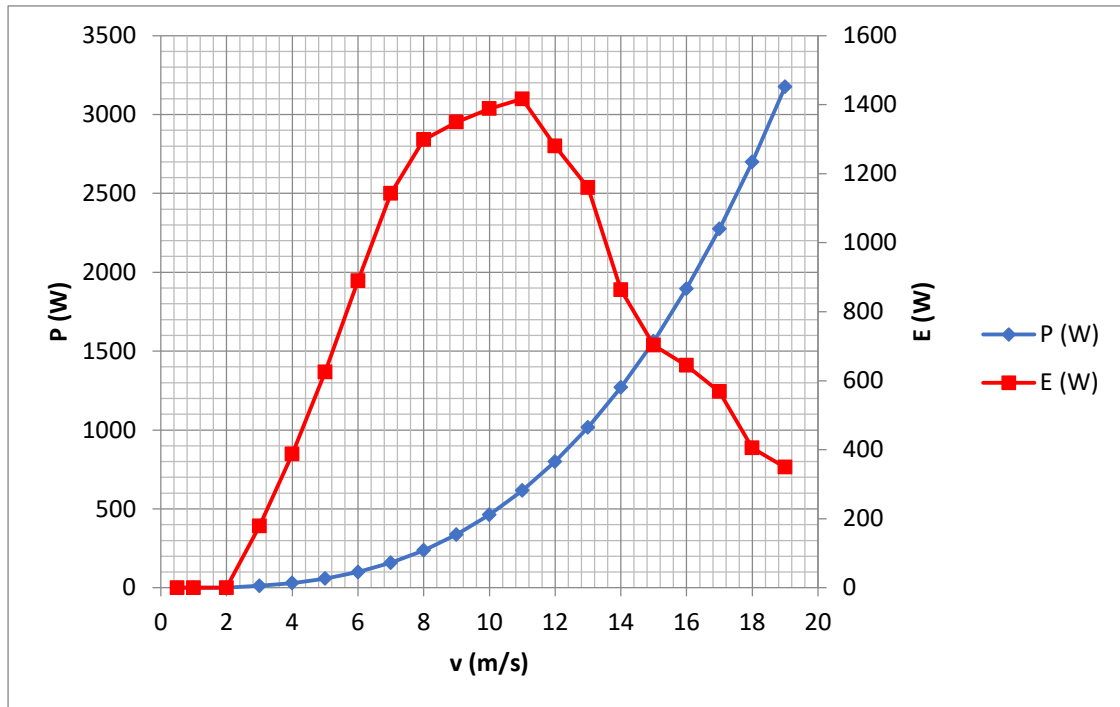
	VtE NE-500M	VtE NE-400M
Výroba energie od rychlosti větru	2,5 m/s	2,5 m/s
Osa otáčení rotoru	Vodorovná	Vodorovná
Typ rotoru	Trojlistý	Trojlistý
Poloměr rotoru	0,85 m	0,775 m
Velikost plochy rotoru	2,269 m ²	1,887 m ²
Jmenovitý výkon pro 5 m/s	57,879 W	48,116 W

4.1 Z energetického hlediska

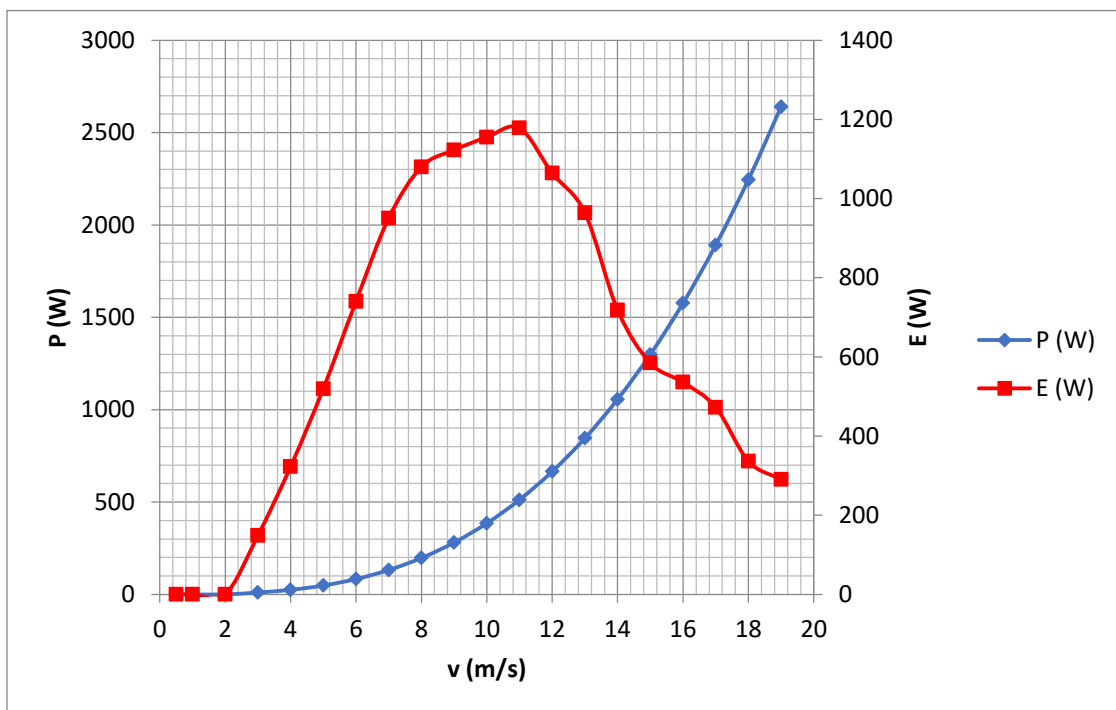
Množství větrné energie je závislé především na síle větru. Větrná energie se neprojeví tam, kde jsou malé povětrnostní podmínky. Její výkon závisí na rychlosti proudění větru a jeho trvanlivosti. Větrnou energii tudíž nelze jinak ovlivnit než větrem.

Celá podkapitola 3.5 byla zaměřena na výpočet návrhu větrné turbíny při roční průměrné rychlosti větru 5 m/s, která plně pokrývá základní spotřebiče nacházející se v chatce. Při konečném výpočtu se zjistilo, že vyrobená energie je přibližně 2 krát větší, než spotřebovaná energie. Výsledek rovněž odpovídá větrné elektrárně NE-500M.

Nyní se pro porovnání vypočítá roční vyrobená energie větrné elektrárny NE-400M. Princip výpočtu se provede stejným způsobem jako u návrhu větrné turbíny. Pouze u výkonu větrné turbíny podle vztahu (3.7) je potřeba pro NE-400M dosadit poloměr rotoru 0,775 m. V příloze 5 se nachází spočítaný výkon a energie pro jednotlivé rychlosti větru. Při konečném výpočtu bylo zjištěno, že vyrobená energie je zhruba o 1,6 krát větší, než spotřebovaná energie. Celková reálná výroba energie za rok, která se vypočítá dle vzorce (3.6), vychází na hodnotu $E_R = 1067,366$ kWh.



Obr. 4.1 Závislost výkonu a energie na měřené rychlosti větru u navržené větrné turbíny (NE-500M); vlastní zpracování



Obr. 4.2 Závislost výkonu a energie na měřené rychlosti větru u NE-400M; vlastní zpracování

Výše dva uvedené obrázky (Obr. 4.1 a Obr. 4.2) znázorňují jednotlivé průběhy výkonů a energií v závislosti na měřené rychlosti větru za období jednoho roku. Výkonová charakteristika udává, že výkon větru stoupá se třetí mocninou jeho rychlosti, zatímco charakteristika energie zobrazuje průběh připomínající paraboly s narůstající rychlostí větru. Znázorněná vyrobená energie je produktem výkonu větrné turbíny za této určité rychlosti a času, po který rychlost převládala. Z těchto obrázků a výpočtů je zřejmé, že větrná mikroelektrárna NE-500M dosahuje u obou charakteristik vyšších hodnot.

4.2 Z ekonomického hlediska

Vítr je nevyčerpatelný zdroj energie, který nic nestojí. Přesto je větrná energetika všech typů větrných elektráren značně vázána s ekonomickou problematikou. Jenom pouhý nákup větrné mikroelektrárny se pohybuje v rozmezí od 8 000 do 75 000 Kč. V České republice se větrné mikroelektrárny pro osobní účel zejména kvůli vysokým nákladům příliš nevyužívají.

Pro majitele jsou nejzásadnější měrné investiční náklady, které se skládají z ceny větrného motoru včetně pracovního stroje, stožáru a zařízení důležitá pro celkové zapojení grid off. Cenu mnohdy ovlivňuje velikost rotoru. Vyšší životnost větrné mikroelektrárny lze dosáhnout pomocí provozních nákladů na pravidelnou údržbu a správnou obsluhu. [7]

4.2.1 Stanovení nákladů

V našem případě si stanovíme základní náklady pro pořízení větrné mikroelektrárny včetně stožáru a zařízení, které jsou nutné pro systém grid off. NE-500M stojí 9 990 Kč, zatímco NE-400M stojí 8 490 Kč. [66], [67]

Nyní se uvedou ceny jednotlivých součástí, jež se vyskytují momentálně na našem trhu.

- Nejprve si určíme stožár, na kterém bude umístěna větrná mikroelektrárna. Sloup bude použit iSTA Breeze. Jedná se o kovový stožár, jehož délka lze rozšířit až do 10 m. Součástí tohoto sloupu jsou dlouhá upevňovací lana. Cena je stanovena na 10 012 Kč. [68]

- Dále se stanoví regulátor, který zajišťuje nabíjení akumulátorů. Regulátor nabíjení z větrné turbíny bude použit HST – DC 12/24, jehož cena je určena na 600 Kč. [69]
- Akumulátor bude využit typ GEL akumulátor 12V/200Ah Sunstone Power MLG12 – 200, který je vhodný pro větrné elektrárny. Byla zvolena baterie o kapacitě 200 Ah, aby se překonalo kratší bezvětří v dané lokalitě. Tento typ, který dosahuje životnosti až 12 let, stojí 9 270 Kč. [70]
- Střídač je nutný pro napájení domácích spotřebičů. Bude uplatněn střídač typu STAND ALONE 1kW, jehož cena je 2 820 Kč. [71]

Tab. 4.2 udává přehledně ceny těchto jednotlivých součástí. Ostatní drobné koupě pro celkový provoz větrné mikroelektrárny jsou zanedbány.

Tab. 4.2 Přehled cen jednotlivých součástí pro provoz větrné mikroelektrárny NE-500M

NE-500M	9 990 Kč
Stožár	10 012 Kč
Regulátor	600 Kč
Akumulátor	9 270 Kč
Střídač	2 820 Kč
Celkem	32 692 Kč

Obecně se rozumí, že pokud má větrná elektrárna velký poloměr rotoru, tak bude mít také vyšší cenu a naopak. Tento fakt platí i v našem případě. Jestliže by majitel VtE potřeboval vyrobit více energii, musí počítat rovněž s většími vstupními náklady.

4.3 Z ekologického hlediska

V současné době je důležité nenarušit životní prostředí. Pokud se u větrných mikroelektráren dodržují určité ekologické podmínky, tak na životní prostředí vyvolávají minimální dopady. V této podkapitole budou charakterizovány hlavní dopady na VtE a následně vyhodnocovány na moji navrhovanou větrnou mikroelektrárnu, která bude

umístěna v lokalitě Boží Dar. Některé hlavní vlivy již byly popsány v podkapitolách (3.1.1 – Větrný potenciál, 3.1.2 – Chráněné oblasti a 3.1.3 – Drsnost povrchu), kde bylo vyhodnoceno vhodné místo lokality na umístění větrné mikroelektrárny.

4.3.1 Čistý zdroj energie

Obecně lze VtE považovat za čistý zdroj energie, jelikož při jejich provozu nevyrábí žádné nebezpečné plyny ani emise na rozdíl od spalovacích nebo jiných podobných zařízení. Větrné elektrárny jako obnovitelné zdroje energie přispívají nenahraditelnou měrou k ochraně životního prostředí. Tento kladný význam se projevuje nejen na zdraví obyvatel a živočichů, ale rovněž i na rostliny. Zároveň výroba z větrné energie šetří fosilní paliva, která se na Zemi vyskytují ve velice omezeném množství. [74]

Pro jasnější představu můžeme provést porovnání navržené větrné mikroelektrárny s hnědouhelnou elektrárnou. Vypočítáme si, kolik se vytvoří emisních látek v hnědouhelné elektrárně při výrobě stejného množství elektrické energie za 1 rok na rozdíl od navrhované VtE. Hnědouhelná elektrárna spaluje energetické uhlí. Při výrobě 1 kWh vzniknou emise, které jsou přehledně uvedené v Tab. 4.3. Uvažuje se 65 % odsíření SO₂ a tuhé látky při 98 % odlučivosti filtrů elektrárny.

Tab. 4.3 Vzniklé emise při výrobě v hnědouhelné elektrárně; převzato od prof. Škorpila

Emise [g/kWh]	Tuhé látky	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Energetické uhlí	3	5,3	7,7	0,65	1213

Výpočet množství emisních látek za 1 rok provedeme například pro tuhé látky, která dosahuje hodnoty 3 g/kWh. Výroba energie za 1 rok u navrhované větrné mikroelektrárny vychází na $E_R = 1283,949$ kWh. Výpočet provedeme podle vzorečku

$$M_n = E_R * E_{koef} \quad (4.1)$$

kde M_n znamená množství emisí vyprodukované za rok, E_R vyjadřuje roční množství vyrobené energie a E_{koef} je emisní koeficient. Po dosazení a následném výpočtu vychází

množství emisí pro tuhou látku na hodnotu 3 851,847 g. V Tab. 4.4 jsou vypočítané také ostatní množství jednotlivých škodlivých látek při stejné výrobě energie za rok.

Tab. 4.4 Množství jednotlivých vyprodukovaných škodlivin při stejné roční výrobě energie

Emise [g/kWh]	Tuhé látky	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Množství škodlivých látek	3851,85	6804,93	9886,407	834,567	1557430,1

4.3.2 Hluk

Jeden z důležitých dopadů na nedaleké obytné okolí lze považovat hluk. Při provozu VtE nastávají dva typy hluků. První se nazývá mechanický hluk, který vzniká v gondole interakcemi mechanických součástí. Nejzásadnější zdroje hluku jsou v: generátoru, servomotoru, který natáčí samotnou gondolu, dále v chladících ventilátorech a také v převodovce, kterou gondola může, ale i nemusí mít. V dnešní době je již mechanický hluk snížen moderními technologiemi pod úroveň hluku aerodynamického. Druhý typ již zmíněný je hluk aerodynamický, jenž vzniká turbulentním prouděním vzduchu okolo otáčejících listů rotoru elektrárny a při průletu listů kolem tubusu. V tomto hluku jsou zastoupeny frekvence slyšitelného spektra, kdy člověk hluk vnímá jako menší hučení. Dnes je také tento typ hluku zřetelně omezen úpravou povrchu i tvarem listů rotoru. Obecně lze tedy říci, že díky technologickému vývoji jsou již současné VtE vysoce tiché. V blízkosti budov musí elektrárny splňovat hygienické normy. Podstatné je tudíž si nechat vypracovat odborný posudek pro akustickou studii. Hodnoty získané od výrobce si studie přepočte na hladinu slyšitelného zvuku na přesně stanoveném místě. Výsledek by měl poté prokázat dodržení platných hygienických limitů hluku. Mohou se také provádět hygienická měření, která při provozu elektrárny ověřují, zdali větrné turbíny dodržují limity. Limitní hladiny hluku v ČR jsou ve dne 50 dB a v noci 40 dB. [72], [73]

U navržené mikroelektrárny se předpokládá provoz s nehlukným chodem. Zvolená oblast se nenachází v obytné zástavbě ani v její blízkosti. Nejbližší domek se od domácí mikroelektrárny vyskytuje až několik set metrů za lesem.

4.3.3 Živočichové

Další z možných dopadů větrná elektrárna má na ptactvo a okolní zvěř. Pokud jsou však VtE vhodně umístěné, nepředstavují pro ptáky závažné nebezpečí. Známa organizace, která se nazývá Královská společnost pro ochranu ptáků, veškerou větrnou energetiku schvalují, jelikož nepředstavují závažnou hrozbu pro tuto faunu. Ptáci totiž přirozeně elektrárnu vidí a jednoduše ji oblétají. Větší riziko ale může nastat v noci nebo za mlhy. Nicméně doposud po celém světě došlo opravdu k minimálním tragickým událostem a to z důvodů, že VtE byly nevhodně umístěny anebo se jednalo o větrné farmy. [72]

Může se stát, že majitel větrné mikroelektrárny bude vlastnit nějaké své domácí zvíře anebo se mohou v blízkém okolí vyskytovat živočichové, kteří žijí volně v přírodě. Dlouholeté výzkumy zde také prokázaly, že veškeré větrné elektrárny jakéhokoliv typu během provozu nenaruší zvěři jejich každodenní pohodu a na tato zařízení si zvyknou. I když mikroelektrárny představují pro ptáky určité riziko vzhledem k její menší velikosti, můžeme se z mapy pro ptačí oblasti České republiky ujistit, že se Boží Dar v ní nenachází.

4.3.4 Stroboskopický efekt

Majitel by se měl dávat pozor také na stroboskopický efekt, jenž nastává mezi námi, větrnou elektrárnou a nízko stojícím sluncem. Tento efekt může způsobit nepříjemné kmitání světla a stínu. U některých VtE kmitání není mnohdy tak intenzivní, jelikož lopatky se otáčejí pomalu. Přesto by elektrárna měla být umístěna daleko od cizích obytných domů. S určitým stínem by měl však počítat potencionální majitel, který by chtěl VtE mít pro svůj osobní účel. Největší možný stín by nastal, pokud by neustále svítlo slunce a nikdy by se nevyskytovaly mraky. Samozřejmě ale vše záleží na skutečném meteorologickém počasí. [72]

Vzhledem k tomu, že ve zvolené oblasti se v blízkém okolí nenachází obydlí, tak by tento stroboskopický efekt neměl mít zcela zásadní vliv na občany. Navíc podle dlouhodobého meteorologického klimatu je v Božím Daru situace s podnebím příznivá, protože se slunce téměř neustále vyskytuje ukryté za mraky.

4.3.5 Televizní a radiový signál

Větrné elektrárny mohou mít vliv na rušení a blokadu elektromagnetických vln. Rušení televizních a rádiových signálů se projeví jedině, pokud tubus elektrárny bude umístěn přímo mezi anténou a vysílačem. Při roztočení rotoru je elektromagnetické vlnění střídavě zastíňováno a intenzita signálu začne kolísat. Dnes už naštěstí tento negativní dopad diváci nebo posluchači nepostřehnou, protože televizní a rádiové přijímače jsou usměřňovány automatickým vyrovnáním citlivosti. Navíc v současné době se lopatky rotoru vyrábějí z umělých pryskyřic, kdy se elektromagnetické vlny od nich neodrážejí. [72]

Na majitelově pozemku bude umístěna navrhovaná mikroelektrárna ve výšce 10 m pomocí stožáru, přičemž nedaleko se bude nacházet obytná chatka s anténou. Mikroelektrárna bude vyrobena z nevodivého materiálu.

4.3.6 Recyklace VtE

Každý provoz větrné elektrárny jakéhokoliv typu je omezený svojí životností. Klasické elektrárny dosahují zpravidla životnosti okolo 20 až 25 let. Po uplynutí celkové doby provozu, kdy již není VtE schopna pracovat, musí být prokazatelně provedena její likvidace. Může se zdát, že po této likvidaci už žádný přínos nikomu nepřinese. Nicméně likvidace je ale mnohdy výnosná, jelikož řadu materiálů elektrárny lze recyklovat. Jedná se především o ocel, měď a sklolaminát, které VtE může obsahovat. Kovové části se využijí zpět do výrobního procesu v ocelárnách. Generátor se uplatňuje většinou na náhradní díly. Skleněná vlákna se spalují ve speciálních cementárenských pecích. Některé komponenty VtE mohou být znovu využity v původním stavu, což představuje přirozeně výhodu na rozdíl od jiných výroben elektrické energie. [75]

I mikroelektrárny, které se využívají zpravidla pro osobní účel, mohou mnohdy zahrnovat části dílů, které se běžně recyklují. Zvláště například stožár, na kterém je tato malá VtE umístěna, může být znovu využit na stejný účel anebo ho může potencionální majitel prodat.

Závěr

Tato diplomová práce, která pojednávala o problematice větrných elektráren, je rozdělena do čtyř hlavních kapitol.

V první kapitole se zabývám teoretickými základy a možnostmi energetického využití větru, kdy jsem představila zásadní informace o větru a způsoby využití energie větru. V této kapitole se vyskytují dvě podstatné věci. Standartní výška pro měření a rychlosti větru je 10 m nad zemským povrchem. Způsob využití energie větru na elektrickou energii se využívají systémy, které jsou buď nezávislé anebo závislé na rozvodné síti.

V druhé kapitole popisují typy větrných elektráren, jejich konstrukční provedení a výrobce v Evropě. Větrné motory jsou uvedeny do několika hledisek, kdy jsem zjistila, že nejvíce užitečné jsou trojlísté vrtulkové motory, které pracují na vztlakovém principu. Proto je konstrukční provedení a velikosti VtE zaměřeno právě na ně. Mezi zásadní výrobce VtE, které se nacházejí v Evropě, jsou společnosti Vestas, Siemens Gamesa, Enercon, Nordex a Wikov.

V třetí kapitole se již zabývám návrhem větrné elektrárny pro vybranou lokalitu. Tento návrh VtE analyzuji na osobní účel pro majitele chaty, kdy není možné se připojit na rozvodnou síť. Na základě podmínek pro výběr vhodné oblasti jsem zvolila lokalitu v Božím Daru, jelikož splňuje všechny podstatné podmínky uvedené v podkapitole 3.1. Můj návrh VtE vychází zejména z knihy Větrné motory a elektrárny pro roční průměrnou rychlost větru 5 m/s, která se Božím Daru nachází. Hlavní část této kapitoly je výpočet návrhu větrné turbíny, kdy se zjišťuje roční spotřeba elektrické energie, teoretický a reálný výpočet energie větrné turbíny za 1 rok. Spotřeba elektrické energie v chatě vychází na 648,24 kWh, teoretický výpočet energie činí $E_T = 1663,723$ kWh a skutečný výpočet energie při volbě poloměru rotoru 0,85 m dosahuje hodnoty $E_R = 1293,949$ kWh.

Poslední čtvrtá kapitola se věnuje zhodnocení návrhu VtE z energetického, ekonomického a ekologického. Energetické a ekonomické zhodnocení se provedlo na základě porovnání s dvěma vhodnými nabídkami vyskytující se na českém trhu. NE-500M vlastní stejný poloměr rotoru jako navrhovaná větrná mikroelektrárna. NE-400M má poloměr rotoru 0,775 m. Vzhledem k tomu, že NE-500M má větší poloměr rotoru

produkuje větší množství vyrobené energie. Z konečných výsledků však vyplynulo, že oba typy VtE pokryjí veškerou spotřebu energie. V ekonomickém zhodnocení jsem stanovila základní náklady pro zařízení, které jsou typické pro systém grid off. Průměr rotoru ovlivňuje cenu. Proto lze očekávat, že náklady na pořízení VtE NE-500M jsou vyšší než u NE-400M. Nakonec se tato práce zaměřuje na ekologické zhodnocení, kde je porovnání, kolik nežádoucích emisí vyprodukuje hnědohelná elektrárna oproti bezemisní VtE. Poté se vyhodnocují možné ekologické dopady na navrhovanou větrnou mikroelektrárnu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Energetika. *Obnovitelné a neobnovitelné zdroje energie* [online]. 5. 12. 2009 [cit. 25. 1. 2021]. Dostupné z: https://zs-zelatovska.cz/upload/files/neobnovitelne_a_obnovitelne_ZE.pdf
- [2] Epet. *Přednosti a nevýhody větrné elektrárny* [online]. 30. 5. 2019 [cit. 26. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/jak-funguje-vetrna-elektrarna-a-jake-jsou-jeji-prednosti-i-nevyhody/>
- [3] YouTube. *Jak vzniká vítr?* [online]. 27. 8. 2020 [cit. 28. 1. 2021]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=x1STAZIvbC4&ab_channel=OverSpace
- [4] In-Počasi. *Proč fouká a jak vzniká vítr?* [online]. 30. 3. 2015 [cit. 28. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-jak-vznika/>
- [5] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha 2010, 296 stran, ISBN: 978-80-247-3250-3.
- [6] Wikipedie. *Obrázek miskového anemometru* [online]. 13. 5. 2004 [cit. 29. 1. 2021]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anemometr#/media/Soubor:Anemometer.jpg>
- [7] RYCHETNÍK, V., JANOUŠEK, J., PAVELKA, J. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd., Vydavatelství ČVUT, Praha 1997, 199 stran, ISBN 80-01-01563-7
- [8] Větrníky. *Proudění vzduchu a systémy grid-off, grid-on* [online]. Nedatováno. [cit. 1. 2. 2021]. Dostupné z: <http://www.vetrniky.eu/myty.html>
- [9] Meteocentrum. *Směr a rychlost větru* [online]. Nedatováno. [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vitr>
- [10] Mundo. *Větrné mlýny* [online]. Nedatováno. [cit. 4. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.mundo.cz/holandsko/vetrne-mlyny-kinderdijk>
- [11] Svět Energie. *Obrázek větrného mlýna* [online]. Nedatováno. [cit. 4. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/historicky-vetrny-mlyn/vyklad>
- [12] Slideserve. *Systémy připojené i nepřipojené k rozvodné síti* [online]. 1. 10. 2020 [cit. 7. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/rocco/v-trn-energie>
- [13] ŠÍPAL, Jaroslav. *Obnovitelné zdroje energie – Způsoby získávání elektrické a tepelné energie z obnovitelných zdrojů*. 1. vyd. Ústí nad Labem 2014, 125 stran, ISBN: 978-80-7414-742-5.
- [14] Csve. *Betonový základ VtE* [online]. Nedatováno. [cit. 8. 2. 2021]. Dostupné z: <https://csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>
- [15] YouTube. *Výprava na střeche VtE* [online]. 6. 5. 2016 [cit. 11. 2. 2021]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=8noTq60Xams&ab_channel=badatele.net
- [16] Csve. *Stožár VtE* [online]. Nedatováno. [cit. 11. 2. 2021]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>
- [17] Csve. *Příhradový stožár VtE* [online]. Nedatováno. [cit. 13. 2. 2021]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/prihradovy-stozar-vetrne-elektrarny/228>
- [18] Csve. *Prefabrikovaný betonový stožár VtE* [online]. Nedatováno. [cit. 13. 2. 2021]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/prefabrikovany-betonovy-stozar-vetrne-elektrarny/227>
- [19] Wikipedie. *Obrázek ocelového stožáru VtE* [online]. 1. 6. 2006 [cit. 13. 2. 2021]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_turb%C3%ADna#/media/Soubor:Windenergy.jpg
- [20] Wind turbine models. *Obrázek příhradového stožáru VtE* [online]. Nedatováno. [cit. 13. 2. 2021]. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/932->

- nordex-n43-lattice
- [21] Oze.tzb-info. *Rotor VtE* [online]. 7. 11. 2016 [cit. 14. 2. 2021]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14893-jak-se-stavi-vetrna-elektrarna>
- [22] Skupina ČEZ. *Gondola VtE* [online]. Nedatováno. [cit. 15. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/vitr/jak-funguje-vetrna-elektrarna>
- [23] Wikipedia. *Schéma VtE* [online]. 1. 2. 2007 [cit. 15. 2. 2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design#/media/File:Wind_turbine_int.svg
- [24] Oenergetice. *Druhy větrných turbín* [online]. 28. 2. 2015 [cit. 16. 2. 2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnost-i-zakladni-rozdeleni>
- [25] Kinematika. *Aerodynamický princip – popis a obrázek* [online]. Nedatováno [cit. 17. 2. 2021]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_11.pdf
- [26] SCHULZ, Heinz. *Savoniův rotor – Návod na stavbu*. 1. české vyd. Ostrava-Plesná 2005, 77 stran, ISBN: 80-86167-26-7.
- [27] FEKT VUT. *Obrázky Savoniova větrného motoru* [online]. Nedatováno. [cit. 21. 2. 2021]. Dostupné z: https://www.fekt.vut.cz/conf/EEICT/archiv/sborniky/EEICT_2010_sbornik/01-Bakalarske_projekty/04-Silnoprouda_elektrotechnika_a_elektroenergetika/01-73044.pdf
- [28] Zilková. *Darrieusův větrný motor* [online]. 2015 [cit. 21. 2. 2021]. Dostupné z: https://fmph.uniba.sk/fileadmin/fmfi/studium/ukazky_zaverecnych_prac/Zilkova_bp.pdf
- [29] Školavďf. *Provedení a funkce jednotlivých typů VtE*. Nedatováno. [cit. 1. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.skolavdf.cz/sites/default/files/uploaded/download/Vetrne%20elektrarny.pdf>
- [30] Energie21. *Obrázek větrné mikroelektrárny*. 7. 5. 2017 [cit. 1. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.energie21.cz/vetrne-mikroelektrarny-zatim-malo-efektivni/#gallery-3>
- [31] Csve. *Výroba elektrické energie v letech 2019 a 2020*. 8. 1. 2021 [cit. 2. 3. 2021]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/evropske-vetrne-elektrarny-loni-vyrobily-mezirocne-o-7-elektriny-vice-n/522>
- [32] Enviweb. *Vyrobená energie v Evropě*. 26. 2. 2020 [cit. 2. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/115651>
- [33] Csve. *Obrázek instalace větrných elektráren dle výrobců v MW*. 31. 12. 2019 [cit. 3. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.csve.cz/clanky/grafy/280>
- [34] Wikipedia. *Základní informace o Vestas*. 10. 3. 2021 [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Vestas>
- [35] Oenergetice. *Vestas – instalace rekord*. 18. 5. 2020 [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vetrne-elektrarny/vestas-jako-prvni-svete-dodal-pres-10-gw-vetrnych-turbin-za-rok>
- [36] Vestas. *Fakta o Vestas*. Nedatováno. [cit. 12. 3. 2021]. Dostupné z: <http://vestas.cz/>
- [37] Csve. *Gondola VtE výrobce Vestas*. Nedatováno. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: [https://csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-\(vyrobce-vestas\)/332](https://csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-(vyrobce-vestas)/332)
- [38] Vestas. *Produkty Vestas*. Nedatováno. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.vestas.com/en/products#!>
- [39] Slideserve. *Obrázek VtE gondoly Vestas*. 19. 11. 2014 [cit. 15. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/amela-frank/wind-turbines-technology>
- [40] Wikipedia. *Základní informace o Siemens Gamesa*. 13. 3. 2021 [cit. 15. 3. 2021].

- Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens_Gamesa#Onshore_turbines
- [41] Siemens Gamesa. *Fakta o Siemens Gamesa*. Nedatováno. [cit. 17. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.siemensgamesa.com>
- [42] Wikipedia. *Základní informace o Enerconu*. 1. 3. 2021 [cit. 17. 3. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Enercon>
- [43] Csve. *Gondola VtE výrobce Enercon*. Nedatováno. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: [https://csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-\(vyrobce-enercon\)/333](https://csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-(vyrobce-enercon)/333)
- [44] Enercon. *Produkty Enerconu*. Nedatováno. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/products/>
- [45] Archiexpo. *Obrázek VtE gondoly Enercon*. Nedatováno. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.archiexpo.com/prod/enercon/product-88093-969022.html>
- [46] Wikipedia. *Základní informace o Nordex*. 7. 3. 2021 [cit. 20. 3. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nordex#Delta-Class>
- [47] Linquip. *AW3000 Nordex*. Nedatováno [cit. 20. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.linquip.com/company/4591/nordex-se/manufactured>
- [48] Nordex online. *Delta4000 řady Nordex*. Nedatováno [cit. 20. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.nordex-online.com/en/product/product-main-page/>
- [49] Wikov. *Wikov Industry*. Nedatováno. [cit. 22. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.wikov.com/cs/o-nas/struktura-skupiny-wikov>
- [50] Technický deník. *Wikov Wind*. 1. 1. 2006 [cit. 23. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/wikov-wind-vetrne-elektrarny-nove-generace_13861.html
- [51] Csve. *Gondola VtE výrobce Wikov*. Nedatováno. [cit. 25. 3. 2021]. Dostupné z: [https://csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-variatozem-asynchronnim-generatorem-\(cesky-vyrobce-wikov\)/334](https://csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-variatozem-asynchronnim-generatorem-(cesky-vyrobce-wikov)/334)
- [52] The Wind Power. *Typy VtE Wikov*. 20. 10. 2020 [cit. 25. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.thewindpower.net/manufacturer_en_117_wikov.php
- [53] Tzbinfo. *Větrné podmínky v ČR*. 15. 4. 2013 [cit. 30. 3. 2021]. Dostupné z: https://m.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i?fbclid=IwAR1b49-OiETI3em0__nkP-uvVCMyezjQOIEXELT11WxAEqp2aoH-kiBba00
- [54] Csve. *Obrázek Větrné mapy ve výšce 10 m nad zemí*. Nedatováno [cit. 30. 3. 2021]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>
- [55] Spvez. *80 % silného větru v přímořských oblastech*. Nedatováno. [cit. 1. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/vitr.htm>
- [56] Čez. *Chráněná oblast*. 2. 6. 2011 [cit. 1. 4. 2021]. Dostupné z: http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/databaze/pdf/Obnovitelne_zdroje_v_CR.pdf
- [57] Publi. *Legislativa pro malé VtE*. Nedatováno. [cit. 2. 4. 2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/03.html#3-5>
- [58] dTest. *Obrázek CHKO a NP*. 1. 7. 2020 [cit. 4. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.dtest.cz/clanek-8142/chranene-krajinne-oblasti>
- [59] Csve. *Proces projektu VtE*. Nedatováno [cit. 4. 4. 2021]. Dostupné z: [https://csve.cz/clanky/povolovaci-proces-pro-projekty-vte/521#prettyPhoto\[gal\]/0/](https://csve.cz/clanky/povolovaci-proces-pro-projekty-vte/521#prettyPhoto[gal]/0/)
- [60] Mpo.efekt. *Legislativa mikroelektrárny*. 14. 5. 2019 [cit. 8. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/cz/programy-podpory/efekt/i-ekis/107094>
- [61] Mapy. *Obrázek vybrané oblasti pro VtE*. Nedatováno. [cit. 8. 4. 2021]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?vlastnibody&x=12.8513654&y=50.4001793&z=16&base=ophoto&uc=>
- [62] CVUT. *Regulátor nabíjení*. 25. 5. 2016 [cit. 10. 4. 2021]. Dostupné z:

- <https://core.ac.uk/download/pdf/47183939.pdf>
- [63] Pinterest. *Obrázek připojení VtE k chatě*. Nedatováno. [cit. 10. 4. 2021]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/473089135826176654>
- [64] zcu. *Využití energie větru – Benedikt*. Nedatováno. [cit. 11. 4. 2021]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/21_-Krajina-a-ZP_54-55/54_IUT/141_Vyuziti-energie-vetru---Benedikt---P0.pdf
- [65] csve. *Obrázek rychloběžnosti a výhody trojlistého rotoru*. Nedatováno. [cit. 11. 4. 2021]. Dostupné z: <https://csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310#prettyPhoto>
- [66] vidoza. *Větrná mikroelektrárna NE-500M*. Nedatováno. [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z: <https://vidoza.cz/vetrne-turbiny/3905-mala-vetrna-elektrarna-ne-500m-3-12v.html>
- [67] vidoza. *Větrná mikroelektrárna NE-400M*. Nedatováno. [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z: <https://vidoza.cz/vetrne-turbiny/3901-mala-vetrna-elektrarna-ne-400m-3-24v.html>
- [68] ekouspora. *Stožár pro VtE*. Nedatováno. [cit. 18. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.ekouspora.cz/stozar-pro-vetrnou-elektrarnu-ista-breeze-do-15-kg.html>
- [69] bazos. *Regulátor nabíjení*. 6. 4. 2021 [cit. 18. 4. 2021]. Dostupné z: <https://elektro.bazos.cz/inzerat/134692801/controller-1224v-regulator-nabijeni.php>
- [70] vselektro. *Akumulátor*. Nedatováno. [cit. 19. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.vselektro.eu/gel-akumulator-12v-200ah-sunstone-power-mlg12-200/>
- [71] ekouspora. *Střídač/invertor*. Nedatováno. [cit. 19. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.ekouspora.cz/menic-m22-off-grid-invertor-220v-ac.html>
- [72] Hnutí duha. *Ekologické dopady VtE*. září 2006 [cit. 25. 4. 2021]. Dostupné z: https://hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/typo3/vitr_2006.pdf
- [73] Elektro – časopis pro elektrotechniku. *Typy hluku VtE*. srpen 2009 [cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vysetrovaní-hluku-z-vetrnych-elektraren--10869>
- [74] Publi. *VtE a životní prostředí*. Nedatováno. [cit. 2. 5. 2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/90/05.html>
- [75] tzbinfo. *Recyklace VtE*. 11. 2. 2021 [cit. 10. 5. 2021]. Dostupné z: <https://oze.tzbinfo.cz/vetrna-energie/21841-likvidace-a-recyklace-vetrnych-elektraren-na-konci-zivotnosti>

Přílohy

Příloha 1 - Průměrná rychlost větru ve zvolené lokalitě

zem. šířka: 50°24'3.550"N

výška nad zemí (střed rotoru): 10 m

zem. délka: 12°50'56.566"E

průměr rotoru: 1.7 m

maximální výkon: 5000 W

směr větru [°]	relativní četnost				prům. rychlost [m/s]	parametry Weibull	
	vše	0-4 m/s	4-8 m/s	> 8 m/s		A [m/s]	k
0	11.3%	4.01%	5.92%	1.37%	5.10	5.75	2.27
30	4.4%	2.18%	2.19%	0.03%	4.07	4.57	2.84
60	2.9%	1.87%	0.94%	0.08%	3.48	3.91	1.77
90	3.5%	1.28%	2.08%	0.15%	4.72	5.30	2.81
120	11.2%	3.28%	6.87%	1.05%	5.22	5.86	2.77
150	16.0%	3.72%	11.43%	0.85%	5.28	5.87	3.47
180	6.6%	2.73%	3.69%	0.18%	4.47	5.03	2.75
210	8.4%	2.95%	4.76%	0.69%	4.94	5.57	2.53
240	9.2%	2.95%	4.51%	1.74%	5.57	6.28	2.11
270	8.2%	1.96%	4.19%	2.05%	6.17	6.96	2.34
300	8.8%	2.11%	4.25%	2.44%	6.33	7.15	2.23
330	9.6%	3.46%	4.93%	1.21%	5.10	5.76	2.21
celkem	100%	32.51%	55.75%	11.85%	5.22	5.89	2.36

Příloha 2 – Četnost rychlostí větru v procentech pro průměrnou rychlost větru 5 m/s

Rychlosti větru v_i [m/s]	Četnost výskytu rychlostí větru 5 m/s [%]
3	14,3
4	13,1
5	10,8
6	8,9
7	7,2
8	5,48
9	4
10	3
11	2,3
12	1,6
13	1,14
14	0,68
15	0,45
16	0,34
17	0,25
18	0,15
19	0,11

Příloha 3 - Teoretický výpočet výkonu hustoty větru a energie

Rychlosti větru v_i [m/s]	Četnost výskytu rychlostí větru 5 m/s [%]	Výkon hustoty větru P_{vi} [W/m²]	Energie E_{vi} [W/m²]
3	14,3	16,2	231,66
4	13,1	38,4	503,04
5	10,8	75	810
6	8,9	129,6	1153,44
7	7,2	205,8	1481,76
8	5,48	307,2	1683,456
9	4	437,4	1749,6
10	3	600	1800
11	2,3	798,6	1836,78
12	1,6	1036,8	1658,88
13	1,14	1318,2	1502,748
14	0,68	1646,4	1119,552
15	0,45	2025	911,25
16	0,34	2457,6	835,584
17	0,25	2947,8	736,95
18	0,15	3499,2	524,88
19	0,11	4115,4	452,694
Celkem		21654,6	18992,274

Příloha 4 - Reálný výpočet výkonu a energie navržené větrné turbíny a NE-500M (s poloměrem rotoru 0,85 m)

Rychlosti větru v_i [m/s]	Četnost výskytu rychlostí větru 5 m/s [%]	Výkon větrné turbíny P_{ii} [W]	Energie E_{ji} [W]
3	14,3	12,502	178,779
4	13,1	29,635	388,212
5	10,8	57,879	625,103
6	8,9	100,017	890,147
7	7,2	158,822	1143,522
8	5,48	237,076	1299,177
9	4	337,556	1350,223
10	3	463,039	1389,118
11	2,3	616,305	1417,502
12	1,6	800,132	1280,211
13	1,14	1017,297	1159,719
14	0,68	1270,579	863,994
15	0,45	1562,758	703,241
16	0,34	1896,609	644,847
17	0,25	2274,912	568,728
18	0,15	2700,445	405,067
19	0,11	3175,987	349,359
Celkem		16711,553	14656,95

Příloha 5 - Reálný výpočet výkonu a energie větrné turbíny NE-400M (s poloměrem rotoru 0,775 m)

Rychlosti větru v_i [m/s]	Četnost výskytu rychlostí větru 5 m/s [%]	Výkon větrné turbíny P_{ii} [W]	Energie E_{ji} [W]
3	14,3	10,393	148,622
4	13,1	24,636	322,727
5	10,8	48,116	519,658
6	8,9	83,145	739,992
7	7,2	132,032	950,627
8	5,48	197,085	1080,025
9	4	280,615	1122,460
10	3	384,932	1154,794
11	2,3	512,344	1178,391
12	1,6	665,162	1064,259
13	1,14	845,695	964,092
14	0,68	1056,252	718,251
15	0,45	1299,144	584,615
16	0,34	1576,679	536,071
17	0,25	1891,168	472,792
18	0,15	2244,92	336,738
19	0,11	2640,245	290,427
Celkem		13892,56	12184,541

Příloha 6 – Příklad zapojení větrné mikroelektrárny viz Aeroplast

