



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh větrné elektrárny

Matěj Vlček

2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vlček** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **507675**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh větrné elektrárny

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a wind power plant

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište využití větrné energie v energetice.
- 2) Popište princip větrných elektráren.
- 3) Vyberte vhodnou lokalitu pro umístění větrné elektrárny.
- 4) Navrhněte větrnou elektrárnu ve vybrané lokalitě.

Seznam doporučené literatury:

CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-861-6719-4. MASTNÝ, Petr.
Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
RYCHETNÍK, Václav; PAVELKA, Jiří a JANOUŠEK, Josef. Větrné motory a elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
VOBOŘIL, David. Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČRO Energetice. 2015. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>. [cit. 2023-12-28].

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Kvaček ELEKTROTRANS a.s.

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Jiří Kvaček
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ÚDAJE O AUTOROVI PRÁCE

Jméno: Matěj

Příjmení: Vlček

E-mail: vlcekm16@fel.cvut.cz

Studijní etapa: bakalářská

Obor studia: Elektrotechnika, energetika a management (EEM)

Specializace: Aplikovaná elektrotechnika (technické zaměření)

Forma studia: prezenční

Ročník: 3.

Semestr: 6. (letní)

Akademický rok: 2023/2024

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kvaček

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 24. 5. 2024

Matěj Vlček

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce, panu Ing. Jiřímu Kvačkovi, a dále také panu Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D. za odborný dohled nad prací, věcné připomínky a rady, poskytnutí informací potřebných pro bakalářskou práci a v neposlední řadě za strávený čas, který mi byl ochoten věnovat.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje základy energie větru a jeho využití v minulosti a současnosti, kde probírá jeho využití k výrobě elektrické energie ve světě a v České republice. Dále se jsou zde probrány typy a základní parametry větrných turbín, způsoby regulace výkonu a popis nejrozšířenější větrné elektrárny se vztlakovou turbínou a horizontální osou. Probírá se zde také výběr vhodné lokace větrného parku na území České republiky. Na závěr je zde popisován návrh větrného parku ve vybrané lokalitě a s ním spojené výpočty jako je odhad vyrobené elektřiny za rok nebo hrubý odhad ceny a doby návratnosti projektu.

Klíčová slova: vítr, větrná energie, větrná turbína, popis větrné elektrárny, větrná elektrárna, větrný park, návrh větrné elektrárny

ABSTRACT

This bachelor's thesis describes the basics of wind energy and its use in the past and present, where it discusses its use for the production of electricity in the world and in the Czech Republic. Furthermore, it describes the types and basic parameters of wind turbines, methods of power regulation and a description of the most widespread wind power plants with a lift turbine and a horizontal rotational axis. The selection of a suitable location for a wind farm in the territory of the Czech Republic is also discussed here. At last, the design of wind farm in a selected location is described here and with it calculations such as an estimate of the electricity produced per year or a rough estimate of the project's price and payback period.

Keywords: wind, wind power, wind turbine, description of a wind power plant, wind power plant, wind farm, design of a wind power plant

OBSAH

ÚVOD	1
1. VYUŽITÍ VĚTRNÉ ENERGIE V ENERGETICE.....	3
1.1 Vznik větru	3
1.1.1 Globální cirkulace atmosféry	3
1.1.2 Vliv krajiny na rychlost větru	4
1.2 Energie a výkon větru	6
1.3 Historie využití větrné energie.....	9
1.3.1 Historie využití větrné energie pro výrobu elektrické energie	10
1.4 Větrné elektrárny ve světě	10
1.5 Větrné elektrárny v České republice.....	15
1.5.1 Větrný potenciál České republiky	17
2. PRINCIP A POPIS VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	19
2.1 Typy větrných turbín.....	19
2.2 Odporové větrné turbíny	19
2.3 Vztlkové větrné turbíny	20
2.3.1 Darrierova vztlková turbína	22
2.4 Účinnost větrných turbín	24
2.5 Generátory ve větrných elektrárnách.....	24
2.5.1 Asynchronní generátory	24
2.5.2 Synchronní generátory	25
2.6 Popis větrné elektrárny se vztlkovou turbínu s horizontální osou	25
2.6.1 Tubus.....	26
2.6.2 Gondola.....	26
2.6.3 Rotor	27
2.7 Regulace výkonu vztlkových turbín s horizontální osou.....	28
2.7.1 Regulace stall a aktivní stall	28

2.7.2	Regulace pitch	28
2.8	Větrné elektrárny na moři.....	29
3.	VOLBA VHODNÉ LOKALITY PRO UMÍSTĚNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	31
3.1	Větrná mapa České republiky	31
3.2	Důležité faktory ovlivňující výstavby větrných elektráren	32
3.2.1	Zákonem chráněné krajiny	32
3.2.2	Vzdálenost od obydlí a veřejné infrastruktury.....	34
3.2.3	Spolupráce s obcemi	34
3.2.4	Povolení spojená s výstavbou	34
3.2.5	Elektrická infrastruktura.....	35
3.2.6	Silniční infrastruktura	36
3.2.7	Přístupnost a struktura podloží lokality	36
4.	NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	37
4.1	Výběr lokace	37
4.2	Větrné podmínky ve vybrané lokaci.....	39
4.2.1	Rozdělení četností rychlostí větru.....	41
4.3	Výběr větrné elektrárny	42
4.4	Počet a rozmístění větrných elektráren ve vybrané lokalitě	43
4.5	Přístupové komunikace	45
4.6	Připojení k distribuční síti vn	46
4.7	Železobetonové základy.....	47
4.8	Výroba elektřiny	47
5.	POŘIZOVACÍ CENA A DOBA NÁVRATNOSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	49
5.1	Výdaje na výstavbu.....	49
5.1.1	Pozemky	49
5.1.2	Přístupové cesty	49
5.1.3	Připojení k distribuční síti	50

5.1.4	Železobetonové základy	50
5.1.5	Větrné elektrárny	51
5.1.6	Doprava dílů	51
5.1.7	Jeřábnické práce	51
5.1.8	Výsledná pořizovací cena	52
5.2	Náklady na provoz	52
5.3	Prodej elektřiny	52
5.4	Prostá doba návratnosti	53
ZÁVĚR		54
ZDROJE		55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – Globální cirkulace atmosféry [4]	3
Obr. 1.2 – Větrný mlýn pro čerpání vody na americkém středozápadě [5].....	9
Obr. 1.3 – První evropská větrná elektrárna v dánském Askově [6].....	10
Obr. 1.4 – Největší větrná farma na světě, Gansu Wind Farm, Čína [7]	11
Obr. 1.6 – Mapa větrných parků na území České republiky [7].....	15
Graf 1.6 – Instalace větrných elektráren v ČR podle výrobců k roku 2023 [11]	17
Obr. 2.1 – Savoniova odporová turbína [7].....	19
Obr. 2.2 – Savoniova odporová turbína bez mezery ve hřídeli [13]	20
Obr. 2.3 – Vznik vztlaku na listu turbíny obtékané větrem [7]	20
Obr. 2.4– Rozměry větrných turbín o různých výkonech [7]	21
Obr. 2.5 – Darrieova vztlaková turbína [7].....	22
Obr. 2.6 – Různé typy a adaptace Darrieovy vztlakové turbíny [7]	23
Obr. 2.7 – Popis větrné elektrárny se vztlakovou turbínou s horizontální osou [7]	25
Obr. 2.8 – Popis gondoly větrné elektrárny [7].....	27
Obr. 2.9 – Způsoby uchycení mořských větrných elektráren k mořskému dnu [21].....	29
Obr. 2.10 – Mapa mořských větrných parků v Severním moři [22].....	30
Obr. 3.1 – Větrná mapa České republiky udávající rychlost větru ve 100 m nad povrchem [16]	31
Obr. 3.2 – Mapa CHKO a NP České republiky [17]	32
Obr. 3.3 – Mapa soustavy chráněných území Natura 2000 [17]	33
Obr. 3.4 – Území vhodná pro umístění větrných elektráren a rozbor závažnosti střetů s ochranou přírody [18].....	33
Obr. 3.5 – Tahač přepravující list větrné elektrárny [7]	36
Obr. 4.1 – Letecký snímek vybrané lokality [32]	37

Obr. 4.2 – Letecký snímek vybrané lokality s hranicemi parcel [32]	38
Obr. 4.3 – Rozmístění větrných turbín ve vybrané lokalitě [32].....	44
Obr. 4.4 – Pozemní komunikace a přístupové cesty k větrným elektrárnám [32]	45
Obr. 4.5 – Připojení větrných elektráren k distribučnímu vedení vn 22 kV [32]	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Hodnoty koeficientu n pro různé typy povrchu [4]	5
Tab. 1.2 – Hodnoty korekčního součinitele k_h [4].....	6
Tab. 1.3 – Nárůst instalovaných výkonů větrných elektráren ve světě v letech 2004-2021 [9].....	14
Tab. 4.1 – Četnost, směr a průměrná rychlost větru ve vybrané lokaci pro návrh větrné elektrárny [20]	40
Tab 4.2 – Parametry větrné elektrárny Vestas V90-2.0 MW [33]	43

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1.1 – Závislost výkonu větru protékající plochou 1 m ² na jeho rychlosti [4].....	8
Graf 1.2 – Procentuální pokrytí spotřeby elektrické energie elektřinou vyrobenou větrnými elektrárnami ve vybraných evropských státech k roku 2020 [8]	12
Graf 1.3 – Instalovaný výkon pevninských větrných elektráren ve světě v roce 2020 [9]	13
Graf 1.4 – Instalovaný výkon mořských větrných elektráren ve světě v roce 2020 [9] .	13
Graf 1.5 – Souhrn instalovaného výkonu větrných elektráren v ČR v letech 2005-2023 [11].....	16
Graf 1.7 – Pokrytí spotřeby elektrické energie ČR větrnými elektrárnami [12]	18
Graf 1.8 – Větrný potenciál a aktuální instalace větrných elektráren v jednotlivých krajích ČR [12].....	18

Graf 2.1 – Porovnání účinnosti různých turbín v závislosti na jejich rychloběžnosti [7].	24
Graf 4.1 – Rozdělení směrů větru a průměrná rychlost větru [20]	40
Graf 4.2 – Denní četnost rychlostí větru v roce ve vybrané lokalitě	42
Graf 4.3 – Výkonová křivka větrné elektrárny Vestas V90-2.0 MW [33]	43

SEZNAM ZKRATEK

ČR	Česká republika
DPH	daň z přidané hodnoty
EU	Evropská unie
CHKO	Chráněné krajinná oblast
NP	národní park
UK	Spojené království Velké Británie a Severního Irska
US/USA	Spojené státy americké
vn	vysoké napětí

ÚVOD

V dnešní době je velký zájem o výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. Jedním z nich je například větrná energie, která se už po mnohá staletí využívala k různým účelům jako jsou například lodní doprava, mletí obilí či čerpání vody. Pokrok ve vývoji nových materiálů a technologií umožnil využití větrné energie k výrobě elektřiny.

Vyspělé země světa se snaží snížit svoji uhlíkovou stopu, která je z velké části tvořena emisemi z elektráren spalujících fosilní paliva. K tomu využívají elektráren využívajících obnovitelných zdrojů energie, mezi které se řadí zejména vodní, solární a větrné elektrárny. Těmito elektrárnami nahrazují ty existující nebo budují nové, čímž pokrývají rostoucí poptávku po elektřině.

Možnosti využití obnovitelných zdrojů energií k výrobě elektrické energie se liší v závislosti na regionu. Některé z nich umožňují využití potenciální energie vody, některé regiony jsou naopak velice slunné a bezoblačné, tudíž umožňují využití solárních elektráren a některé jsou velice větrné, což se nabízí k výstavbě větrných elektráren. V některých zemích tyto podmínky mohou umožnit kompletní přechod energetického sektoru k obnovitelným zdrojům energie a některým zemím naopak tyto podmínky chybí a musí přemýšlet jakým zdrojem elektřiny pokrýt poptávku, jednou takovou zemí je i Česká republika.

K roku 2024 Česká republika stále zaostává za mnoha evropskými zeměmi v podílu elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů. Ke kompletnímu nahrazení elektráren spalujících fosilní paliva těmito elektrárnami však nedojde, jelikož to lokální podmínky neumožňují, to však ale neznamená, že by se těchto zdrojů nemělo využívat na maximum. Pokud všechno půjde podle plánů a názor obyvatel České republiky se nezmění, tak v budoucnosti dojde k nahrazení elektráren spalujících fosilní paliva jadernými elektrárnami, které budou doplněny těmi využívající obnovitelné zdroje energie.

Konvenční elektrárny využívající synchronních generátorů, mezi které mimo jiné patří i jaderné elektrárny, jsou důležité pro elektrickou síť, jelikož slouží k udržování její

frekvence a napětí. Elektrárny využívají obnovitelných zdrojů je vzhledem k jejich intermitentní povaze vhodné doplňovat špičkovými elektrárnami jako jsou například přečerpávací elektrárny, které zároveň slouží k akumulaci elektrické energie.

Větrné elektrárny se v posledních letech staly jedním z nejlevnějších zdrojů elektřiny k instalaci a konkurují i elektrárnám spalujícím fosilní paliva. Ostatně jako další elektrárny využívající obnovitelných zdrojů, jsou větrné elektrárny ve světě stále častěji využívány, a tedy bude toto téma i v budoucnosti relevantní. Cílem této práce bude přiblížení znalostí o principu, popisu a návrhu větrné elektrárny každé osobě čtoucí tuto práci.

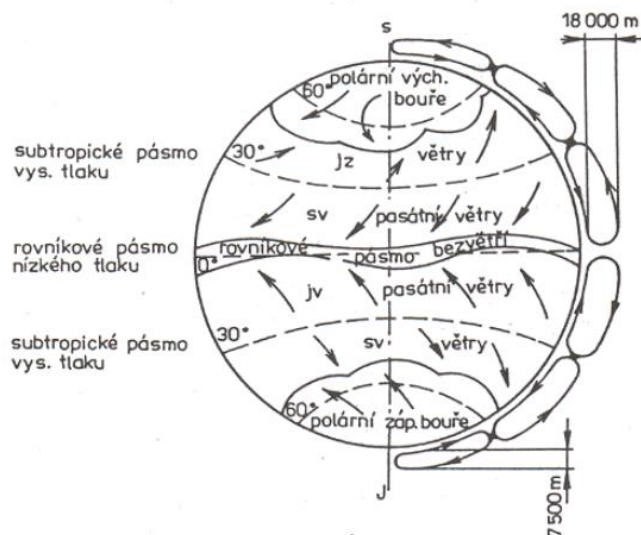
1. VYUŽITÍ VĚTRNÉ ENERGIE V ENERGETICE

1.1 Vznik větru

Vznik větru je podmíněn nerovnoměrným ohřevem povrchu Země slunečním zářením. Tento rozdíl v oteplování vedoucí ke vzniku teplotních odchylek na povrchu generuje variace v atmosférickém tlaku. V oblastech s vyšší absorpcí slunečního záření dochází k ohřátí vzduchu, který se následně stává lehčím a stoupá vzhůru, vzniká tak nízkotlaká oblast. Naopak v oblastech s nižší absorpcí slunečního záření dochází k ochlazení a poklesu vzduchu, což tvoří oblast s vyšším atmosférickým tlakem. Tento rozdíl tlaku vytváří pohyb vzduchu, kdy vzduch o vyšším tlaku proudí směrem k oblastem s nižším tlakem. V důsledku toho vzniká vítr, na jehož rychlost a směr má vliv geografie krajiny.

1.1.1 Globální cirkulace atmosféry

Dále má na větry vliv globální cirkulace atmosféry, která je výsledkem nerovnoměrného slunečního záření, které dopadá na povrch Země, dále rotací a natočenou rotační osou planety Země.



Obr. 1.1 – Globální cirkulace atmosféry [4]

Na rovníku sluneční paprsky dopadají kolmo k povrchu Země, což způsobuje výrazné ohřátí vzduchu. Tím na rovníku vzniká nízkotlaký pás, kde poté dochází k vertikálnímu vzestupu vzduchu a vytváření takzvaných ekvatoriálních nízkotlakých pásů. Vzduch, který stoupá na rovníku, se pak pohybuje směrem k pólům ve vyšších vrstvách atmosféry. Na 30° zeměpisné šířky vzduch klesá, což vytváří subtropické vysokotlaké pásmo. Oblast mezi rovníkem a 30° zeměpisné šířky je spojena s pravidelnými větry nazývanými pasáty, které směřují k rovníku a vlivem rotace Země směřují také na západ.

Cirkulace v oblasti mezi 30° a 60° zeměpisné šířky není zcela ovlivněna rozdíly teplot, ale především cirkulací v tropické a polární buňce. Převažující zde směry větrů k pólu a k východu, avšak toto proudění je extrémně proměnlivé a je silně ovlivněno lokálními vlivy. Pro tuto oblast je charakteristické nepravidelné střídání oblastí nízkého a vysokého tlaku.

Vzduch proudící od pólů se na 60° zeměpisné šířky ohřívá, stoupá a směřuje zpět směrem k pólům. Zde vytváří vysokotlakou oblast a následně vyvolané větry opět směřují směrem k rovníku, ale vlivem Coriolisovy síly směřují tyto větry na západ.

1.1.2 Vliv krajiny na rychlost větru

Krajina má významný vliv na rychlost a směr větru. Různé topografické prvky jako jsou hory, údolí, roviny nebo vodní plochy mohou ovlivňovat místní větrné podmínky různými způsoby.

Hory mohou blokovat nebo odklánět proudění vzduchu, což vede ke vzniku specifických větrných vzorů. Na závětrné straně hor často dochází k větrům, které jsou rychlejší a suché, což je možné pozorovat například v Kalifornii.

Údolí mohou fungovat jako kanály, kterými se vzduch pohybuje, což může vést k větším rychlostem větru v těchto oblastech.

V rovinných a otevřených oblastech mohou větry dosahovat vyšších rychlostí, protože nejsou blokovány žádnými překážkami.

Lesy a hustá vegetace mohou snížit rychlost větru, protože stromy a keře působí jako bariéra a zpomalují proudění vzduchu.

Vodní plochy se přes den ohřívají pomaleji než pevnina, což vytváří vzestupný vzdušný proud nad pevninou a sestupný nad vodou. Tento rozdíl v tlaku vzduchu způsobuje vánek, který proudí od vodní plochy k pevnině. V noci je to opačně, jelikož pevnina vychladne rychleji.

Rychlost větru má největší vliv na celkový i využitelný výkon větru. Pro přepočítání rychlosti větru z výšky, v jaké bylo prováděno měření, na jakoukoliv výšku můžeme použít následující vzorec

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

kde v^* ... je průměrná rychlost větru ve výšce h na zemském povrchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

v_0^* ... je průměrná rychlost větru ve výšce h_0 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

h ... je výška nad povrchem země, na kterou chceme převést rychlost větru [m],

h_0 ... je výška nad povrchem země, ve které bylo prováděno měření [m],

n ... je číselný koeficient drsnosti povrchu [-] (viz. tabulka 1.1).

Druh povrchu	Popis druhu povrchu	Číselný koeficient drsnosti povrchu n [-]
a	hladký povrch (vodní hladina, písek)	0,14
b	louka s nízkým travnatým porostem, oranice	0,16
c	vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
d	porosty vysokých kulturních plodin	0,21
e	lesy	0,28
f	vesnice a malá města	0,48

Tab. 1.1 – Hodnoty koeficientu n pro různé typy povrchu [4]

Pro snadnější výpočet rychlosti větru ve výšce h s referenční hodnotou rychlosti větru ve výšce 10 m nad povrchem země jsou v tabulce 1.2 uvedeny hodnoty korekčního součinitele k_h a lze ho provést pomocí následující rovnice

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

kde v_h^* ... je průměrná rychlost větru ve výšce h nad povrchem země [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

v_{10}^* ... je průměrná rychlost větru ve výšce 10 m nad povrchem země [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

k_h ... je korekční součinitel [-] (viz. tabulka 1.2).

Hodnoty korekčního součinitele k_h [-]										
Druh povrchu	Výška od povrchu									
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	35 m	40 m	45 m	50 m
a	0,91	1,00	1,06	1,10	1,14	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
b	0,90	1,00	1,07	1,12	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,29
c	0,88	1,00	1,08	1,13	1,18	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
d	0,86	1,00	1,09	1,16	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40
e	0,82	1,00	1,12	1,21	1,29	1,36	1,42	1,47	1,52	1,57
f	0,72	1,00	1,21	1,39	1,55	1,69	1,82	1,95	2,06	2,17

Tab. 1.2 – Hodnoty korekčního součinitele k_h [4]

1.2 Energie a výkon větru

Jelikož jsou rychlost a výkon větru časově závislé jednotky, můžeme energii větru protékající za danou dobu jednotkovou plochou vyjádřit pomocí následující rovnice

$$E = \int_{t_0}^t P_v \cdot dt \quad (1.3)$$

kde E ... je energie větru [J],

P_v ... je výkon větru [W],

t ... je doba trvání větru [s].

Energie větru je vlastně energie pohybující se hmoty neboli kinetická energie, kterou můžeme vyjádřit následující rovnicí

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.4)$$

kde E ... je energie větru [J],

m ... je hmotnost větru [kg],

v ... je rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Hmotnost větru m můžeme vyjádřit pomocí následující rovnice

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (1.5)$$

kde m ... je hmotnost větru [kg],

ρ ... je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

V ... je objem vzduchu [m^3],

A ... je plocha, kterou vzduch protéká [m^2],

s ... je dráha, kterou vzduch urazí [m].

Výkon větru je dán energií větru protékající danou plochou za daný čas a můžeme ho vyjádřit následující rovnicí

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} \quad (1.6)$$

kde P_v ... je výkon větru [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

E ... je energie větru [J],

A ... je plocha, kterou vzduch protéká [m^2],

t ... je doba, po kterou vzduch protéká danou plochou [s].

Po dosažení rovnic (1.4) a (1.5) do rovnice (1.6) a následných úpravách dostáváme výslednou rovnici pro výkon větru

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{s}{t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1.7)$$

kde P_v ... je výkon větru [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

ρ ... je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

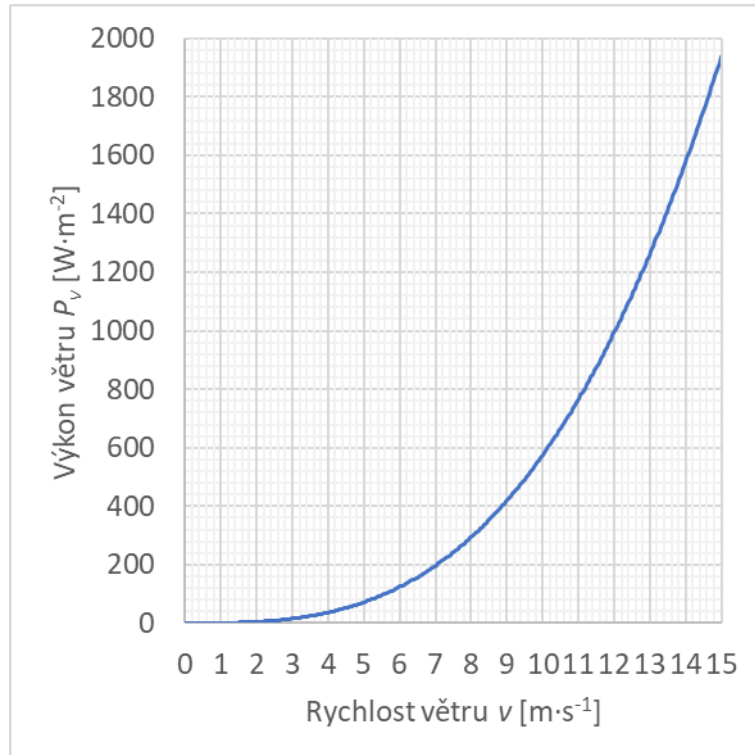
A ... je plocha, kterou vzduch protéká [m^2],

s ... je dráha, kterou vzduch urazí [m],

t ... je doba, po kterou vzduch protéká danou plochou [s],

v ... je rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Z výsledné rovnice je možné vidět, že výkon větru závisí na třetí mocnině rychlosti větru.



Graf 1.1 – Závislost výkonu větru protékající plochou 1 m^2 na jeho rychlosti [4]

1.3 Historie využití větrné energie

Historicky nalezla větrná energie využití v lodní dopravě a hrála klíčovou roli v jejím rozvoji a objevování světa. Plachetnice byly primárním prostředkem k přepravě lidí, zboží a kultury mezi různými částmi světa po tisíce let.

První záznamy o větrných mlýnech pocházejí už ze starověku. Byly používány především k mletí obilí nebo čerpání vody. Nizozemsko bylo jedním z prvních evropských regionů, kde větrné mlýny dosáhly širokého rozšíření. V 17. století byly využívány k odvodňování poldrů, což umožnilo získání nové orné půdy. V 19. století se větrné mlýny rozšířily do Spojených států amerických, kde sloužily k pohonu čerpadel vody a mletí obilí.



Obr. 1.2 – Větrný mlýn pro čerpání vody na americkém středozápadě [5]

K opětovnému využití větrné energie přišlo v druhé polovině 20. století s rostoucí obavou o životní prostředí a rozvojem výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů elektrické energie.

1.3.1 Historie využití větrné energie pro výrobu elektrické energie

Světově první větrnou elektrárnu postavil v na přelomu let 1887 a 1888 Američan Charles F. Bush. Rotor elektrárny měl průměr 17 m a byl tvořen 144 paprskovitě uspořádanými dřevěnými lopatkami. Výkon elektrárny byl při 500 ot/min 12 kW. [10]

První evropskou větrnou elektrárnu postavil Poul la Cour v roce 1891 v dánském Askově. Větrná elektrárna měla čtyři až šest lopatek o rámcové konstrukci propnuté plachtami, podobala se tedy klasickému větrnému mlýnu. [10]



Obr. 1.3 – První evropská větrná elektrárna v dánském Askově [6]

Poul la Cour se také zabýval akumulací vyrobené energie v podobě výroby vodíku pomocí elektrolýzy. Toto zařízení postavil v roce 1900 a dokázal vyrobit až 1000 litrů vodíku a 500 litrů kyslíku za hodinu. [10]

První moderní větrné turbíny byly postaveny v 70. letech 20. století a od té doby se technologie neustále zdokonalovala. Dnes je možné spatřit větrné elektrárny téměř ve všech koutech světa.

1.4 Větrné elektrárny ve světě

Větrné elektrárny hrají klíčovou roli ve světovém trendu k přechodu na obnovitelné zdroje energie. Jejich růst byl v posledních desetiletích exponenciální, přičemž mnoho

zemí investuje do větrné energie jako součást své strategie snižování emisí uhlíku a boje proti klimatickým změnám.

Rozvoj větrných elektráren roste zejména v Evropě, Asii a Severní Americe. Většinu globálního instalovaného výkonu tvoří pevninské větrné parky, ale na popularitě nabývají i mořské větrné parky, které mají výhodu silnějších a stálějších větrů. Jsou však dražší a technicky náročnější na instalaci a údržbu.

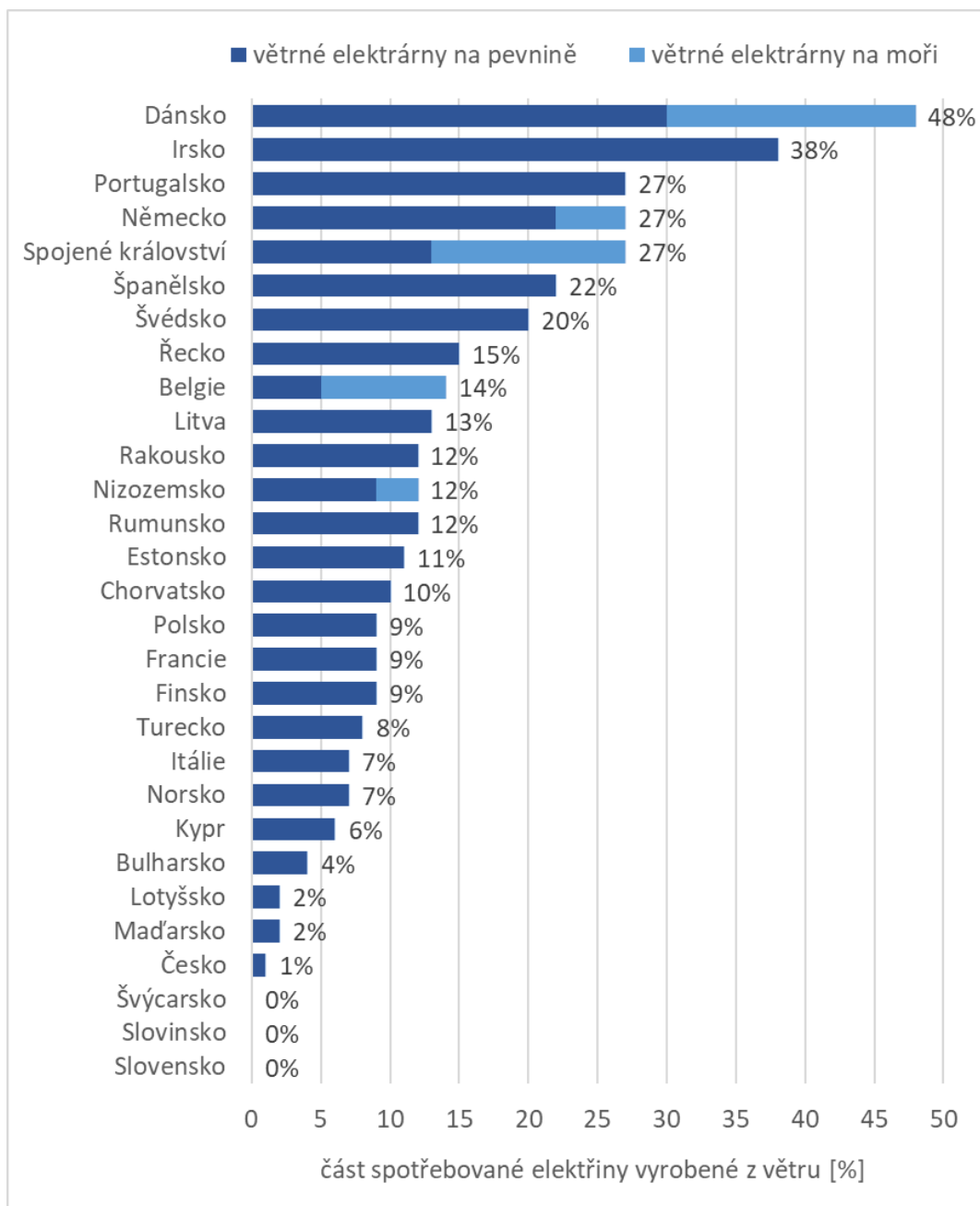
V současnosti je Čínská lidová republika světovým lídrem ve využití větrné energie s největším instalovaným výkonem větrných elektráren. Země investuje masivně do rozvoje pevninských i mořských větrných parků. V Číně se také nachází největší větrný park na světě Gansu Wind Farm, který se stále rozrůstá a aktuálně čítá kolem 8000 MW instalovaného výkonu větrných elektráren, cílový výkon je přibližně 20 GW.



Obr. 1.4 – Největší větrná farma na světě, Gansu Wind Farm, Čína [7]

Spojené státy americké jsou dalším předním hráčem v oblasti větrné energie s velkými větrnými parky rozmístěnými zejména v centrálních a severních částech země. Texas je státem s největší instalovanou kapacitou.

V Evropě jsou v instalovaném výkonu předními zeměmi Spolková republika Německo a Spojené království Velké Británie a Severního Irska. Německo má silnou infrastrukturu pevninských a mořských větrných parků, zatímco Spojené království vede v rozvoji především těch mořských.

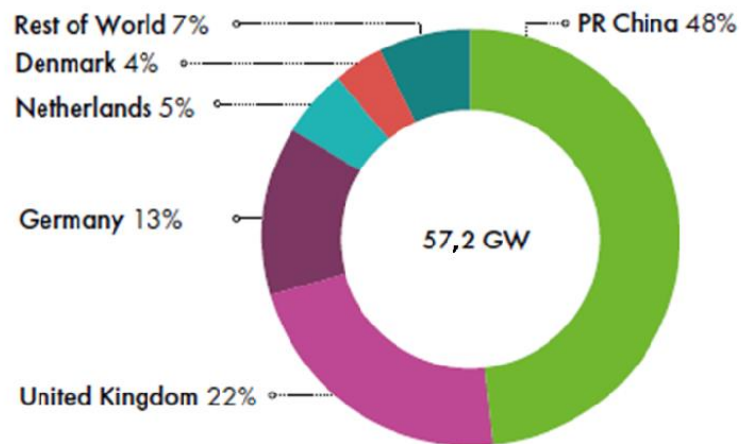


Graf 1.2 – Procentuální pokrytí spotřeby elektrické energie elektřinou vyrobenou větrnými elektrárnami ve vybraných evropských státech k roku 2020 [8]

Evropským i světovým lídrem ve využívání větrné energie je Dánsko, které k roku 2020 vyrábělo z větrné energie 48 % veškeré své spotřebované elektrické energie. Dánsko je známé svým raným přijetím výroby elektrické energie z větrné energie.

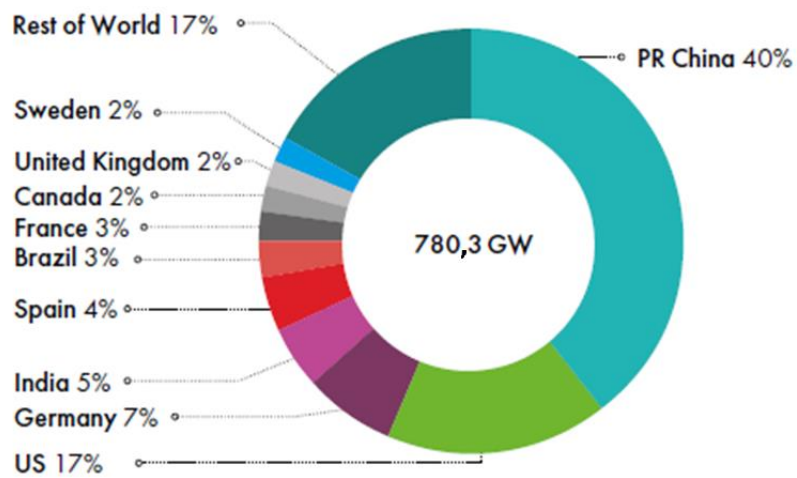
Česká republika výrazně zaostává ve výrobě elektrické energie z větru oproti ostatním evropským státům a k roku 2020 vyrobila pouze necelá 2 % své spotřebované elektrické energie z větrné energie.

Total installations offshore (%)



Graf 1.3 – Instalovaný výkon pevninských větrných elektráren ve světě v roce 2020 [9]

Total installations onshore (%)



Graf 1.4 – Instalovaný výkon mořských větrných elektráren ve světě v roce 2020 [9]

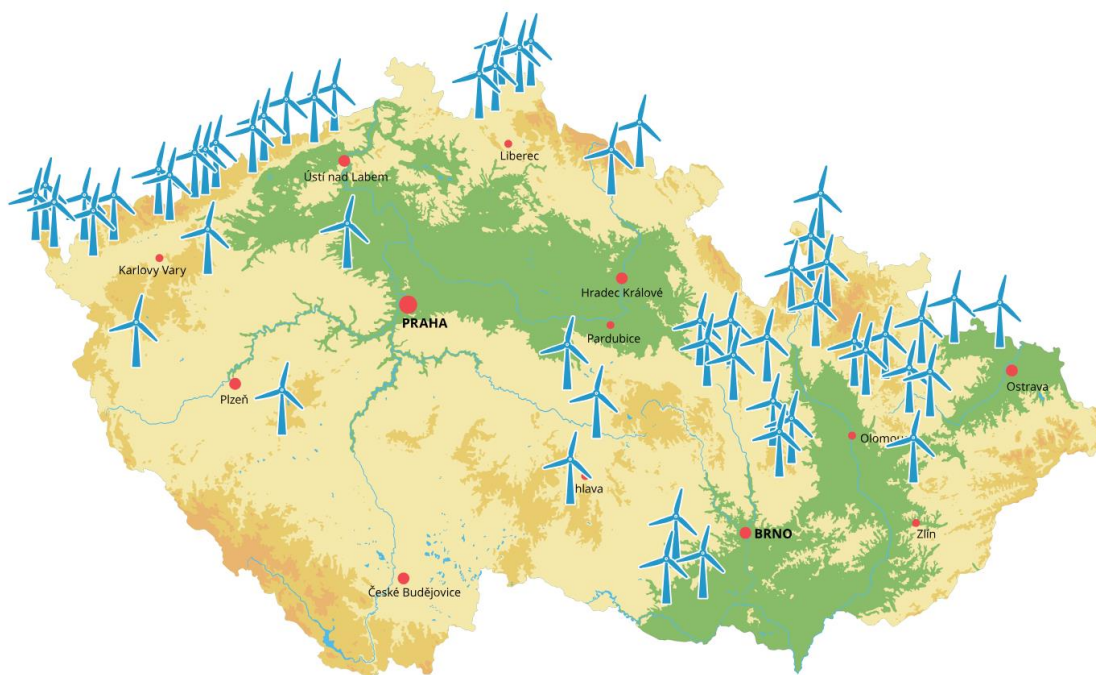
Rok	Instalované výkony větrných elektráren [MW]				Podíl VtE v EU [%]
	EU	USA + Kanada	Čína	Svět	
2004	34 205	7 169	764	47 620	71,8
2005	40 504	9 835	1 260	59 091	68,5
2006	43 069	13 035	2 604	74 052	58,2
2007	56 535	18 664	6 050	93 820	60,3
2008	64 949	27 606	12 104	120 550	53,9
2009	74 767	38 478	25 104	157 889	47,4
2010	84 650	44 306	44 733	197 637	42,8
2011	93 947	52 184	62 364	237 669	39,5
2012	105 696	66 207	75 564	282 482	37,4
2013	117 289	68 894	91 412	318 105	36,9
2014	129 060	75 571	114 604	369 695	34,9
2015	141 578	85 671	145 104	432 419	32,7
2016	153 730	94 084	168 732	486 790	31,6
2017	169 319	101 316	188 232	539 581	31,4
2018	178 826	109 481	211 392	591 549	30,2
2019	192 231	118 879	236 402	651 557	29,5
2020	203 260	135 895	290 739	744 978	27,3
Rok	EU bez UK	USA + Kanada	Čína	Svět	Podíl EU [%]
2021	188 892	148 651	338 309	837 451	22,6

Tab. 1.3 – Nárůst instalovaných výkonů větrných elektráren ve světě v letech 2004-2021 [9]

K největší nárůstu využívání větrné energie došlo v Číně, která mezi lety 2004 a 2021 přešla z velmi malého instalovaného výkonu větrných elektráren a stala se zemí s největším instalovaným výkonem větrných elektráren. Vyrobená elektřina z větrné energie však představuje v Číně pouze zlomek z celkové vyrobené elektrické energie. Většinu energetického mixu Číny stále tvoří uhelné elektrárny.

1.5 Větrné elektrárny v České republice

Na území České republiky se nejvíce větrných elektráren nachází v Krušných horách na území Ústeckého a Karlovarského kraje. Dále se značná část větrných elektráren nachází v Libereckém kraji konkrétně ve Frýdlantském výběžku. V Olomouckém kraji se také nachází značná část instalovaného výkonu větrných elektráren.



Obr. 1.6 – Mapa větrných parků na území České republiky [7]

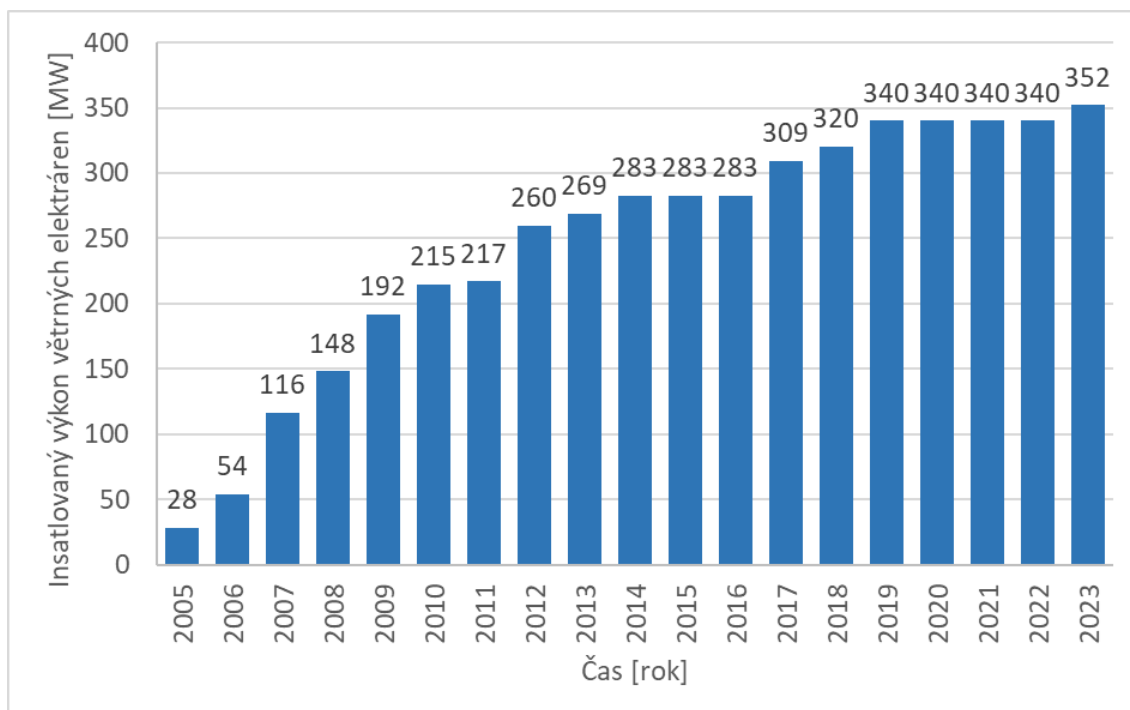
Největší větrný park se nachází v Ústeckém kraji na území obce Kryštofovy Hamry nedaleko od Chomutova. Větrné elektrárny se nachází na hřebeni Krušných hor v průměrné nadmořské výšce 850 m nad mořem. Větrná farma čítá 24 turbín E-82 od firmy Enercon GmbH, každá má výkon 2 MW, a tedy je celkový výkon větrné farmy Kryštofovy Hamry-Přísečnice 48 MW.

Druhý největší větrný park je poměrně nový, jelikož byl uveden do provozu v roce 2017, a nachází se v obci Václavice poblíž Hrádku nad Nisou. Tato větrná farma čítá 13 turbín o celkovém výkonu 26 MW. Jedná se o modely MM100, které byly vyrobeny firmou Senvion S.A., kterou od roku 2019 vlastní Siemens Gamesa Renewable Energy, S.A.

Výstavbě nových větrných elektráren v České republice často brání táhlé žádosti o stavební povolení nebo odpor obyvatel místních obcí. Ve většině států Evropské unie dochází k podpoře výstavby větrných elektráren ze stran místních obcí, kdy investoři poskytují část zisku těmto obcím.

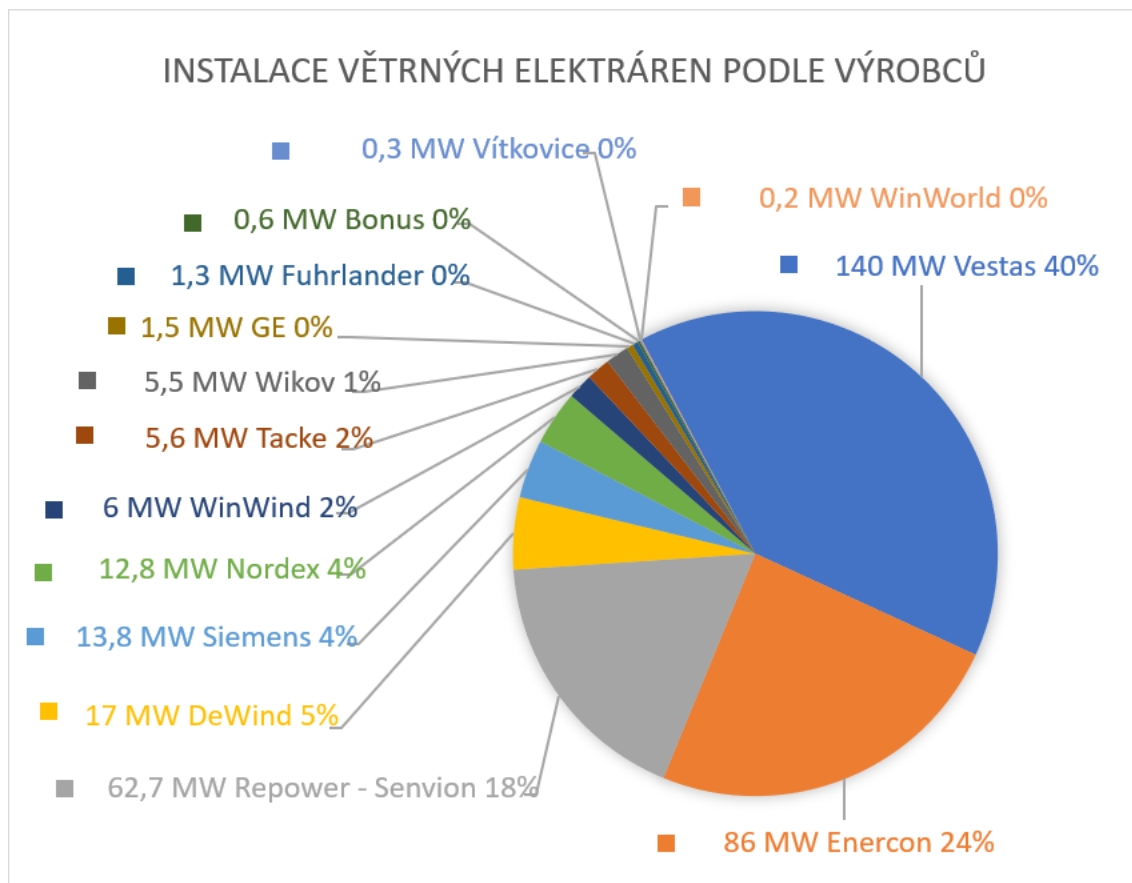
V dubnu 2024 vláda ČR schválila postup pro vymezení takzvaných akceleračních zón, které by měly urychlit povolovací procesy pro výstavbu elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie k výrobě elektřiny jako jsou fotovoltaické a větrné elektrárny. Získání všech potřebných povolení by v těchto zónách mělo trvat maximálně 12 měsíců, čímž by se výrazně urychlily procesy, které v současnosti mohou trvat i několik let. V těchto oblastech bude výrazně urychleno například posuzování vlivu na životní prostředí. Tyto akcelerační zóny by měly zahrnovat například takzvané brownfieldy, což jsou oblasti bývalých průmyslových zón nebo dolů. [31]

Průměrný roční počet nově vybudovaných větrných elektráren v České republice je velmi nízký v porovnání s ostatními zeměmi Evropské unie. Mezi lety 2019 a 2022 dokonce nebyly uvedeny do provozu žádné nové větrné elektrárny.



Graf 1.5 – Souhrn instalovaného výkonu větrných elektráren v ČR v letech 2005-2023 [11]

Na území České republiky jsou nejvíce zastoupeny větrné elektrárny od výrobců, jako jsou dánský Vestas Wind Systems A/S, německý Enercon GmbH a bývalý Repower-Senvion S.A., který nyní spadá pod Siemens Gamesa Renewable Energy, S.A.

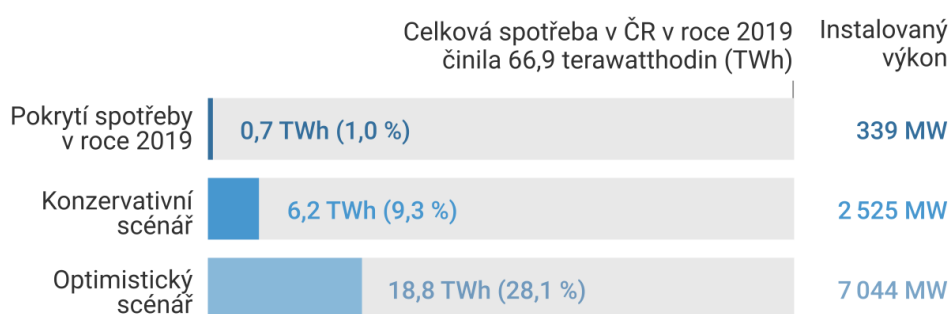


Graf 1.6 – Instalace větrných elektráren v ČR podle výrobců k roku 2023 [11]

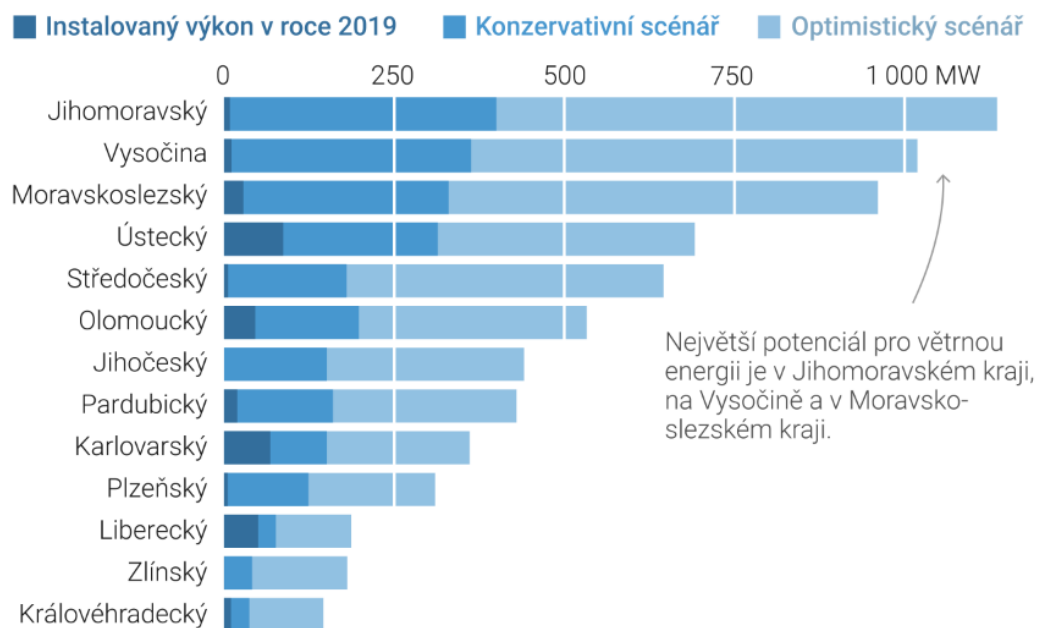
1.5.1 Větrný potenciál České republiky

Větrný potenciál udává, jakou část spotřeby elektrické energie lze pokrýt elektřinou vyrobenou větrnými elektrárnami. Studie provedená v roce 2020 Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd České republiky představuje dva scénáře, optimistický a konzervativní. Tato studie uvažuje místa, kde je výstavba větrných elektráren rentabilní a splňuje dostatečné vzdálenosti od veřejných infrastruktur a obydlí. Optimistický scénář už z názvu uvažuje velice optimistický přístup místního obyvatelstva k výstavbě větrné elektrárny. Konzervativní scénář uvažuje méně pozitivní přístup místního obyvatelstva k výstavbě větrných elektráren a z praxe více odpovídá realitě. Pokrytí spotřeby elektrické energie České republiky větrnými elektrárnami bylo v roce

2019 pouze 1 % neboli 0,7 TWh při instalovaném výkonu 339 MW. Optimistický scénář uvažuje, že by větrné elektrárny mohli pokrýt 28,1 % spotřeby elektřiny, potřebný instalovaný výkon větrných elektráren by v tomto případě činil 7044 MW. Více realistický konzervativní scénář uvažuje, že by větrné elektrárny mohly pokrýt 9,3 % spotřeby České republiky, potřebný instalovaný výkon větrných elektráren by v tomto případě měl být 2525 MW. Větrné lokality v České republice se často nachází v oblastech chráněných zákonem, a tedy je větrný potenciál poměrně nízký. Energetický mix České republiky by při uvažování obou scénářů musel být doplněn dalšími zdroji elektrické energie. [12]



Graf 1.7 – Pokrytí spotřeby elektrické energie ČR větrnými elektrárnami [12]



Graf 1.8 – Větrný potenciál a aktuální instalace větrných elektráren v jednotlivých krajích ČR [12]

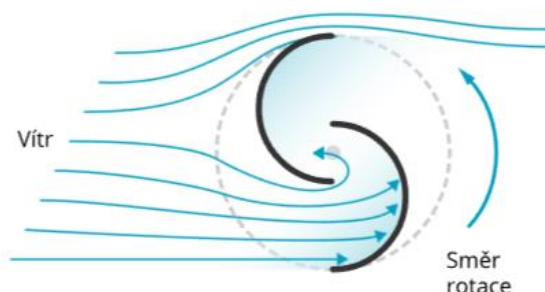
2. PRINCIP A POPIS VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

2.1 Typy větrných turbín

Obecně se větrné turbíny dělí podle jejich aerodynamického principu na odporové a vztlakové. Dále je možné větrné turbíny dělit podle jejich osy na vertikální a na horizontální.

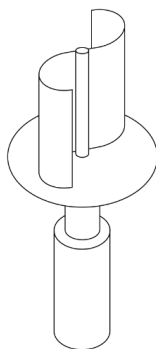
2.2 Odporové větrné turbíny

Princip činnosti odporové větrné turbíny spočívá v tom, že plocha lopatek klade vůči větru aerodynamický odpor. Na ploše lopatek dochází ke vzniku síly, a tedy i momentu, jehož působením dochází k rotaci turbíny. Obvodová rychlost turbíny musí být nižší než rychlost větru, jinak by nedocházelo ke vzniku momentu. Otáčky turbíny jsou přímo úměrné rychlosti větru.



Obr. 2.1 – Savoniova odporová turbína [7]

Mezi nejznámější odporovou turbínu patří Savoniova odporová turbína, jejíž osa je vertikální. Tvar lopatek připomíná písmeno „S“. Lopatky nejsou ve středu propojeny, aby mohlo docházet k proudění vzduchu a vyrovnání tlaku, což vede ke zvýšení účinnosti. Účinnost takovéto turbíny se pohybuje v rozmezí 15-20 %.

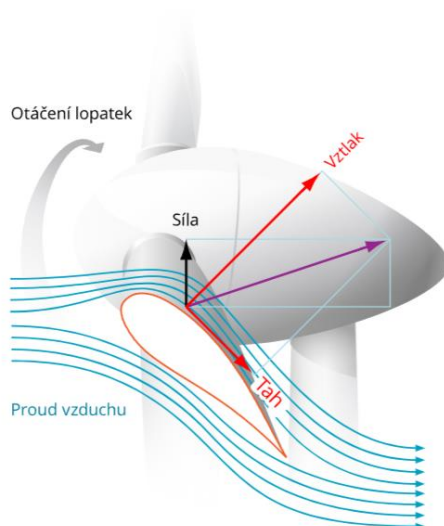


Obr. 2.2 – Savoniova odporová turbína bez mezery ve hřídeli [13]

Mezi výhody této turbíny patří nezávislost na směru větru a menší nároky na prostor, což je dáno tím, že má turbína vertikální osu. Další výhodou je, že dokáží pracovat i při nízkých rychlostech větru. Nevýhodou těchto turbín je jejich nízká účinnost, a proto se používá především pro malé výkony v urbanizovaných oblastech. Pro větší výkony se v nezastavěných oblastech používají vztlkové turbíny.

2.3 Vztlkové větrné turbíny

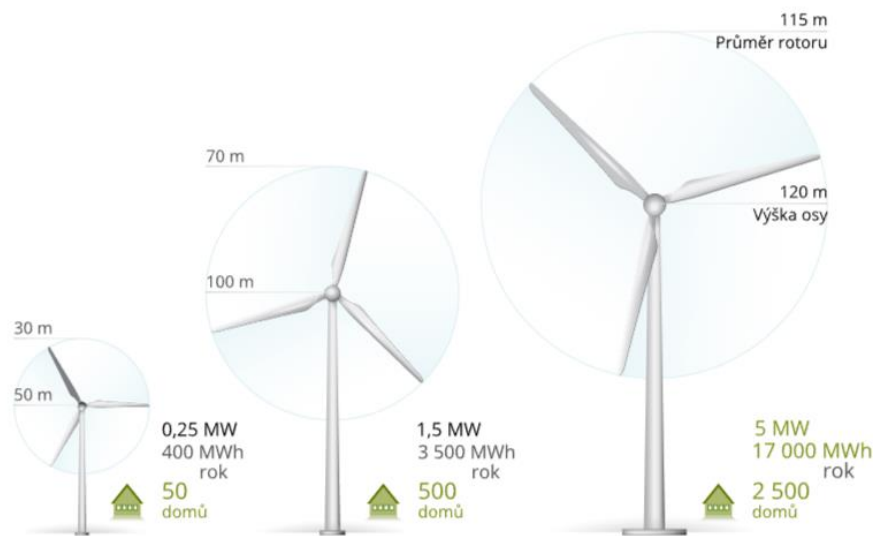
Vztlkové větrné turbíny využívají vztlkový princip k vytváření síly a momentu, která pohání generátor elektrické energie.



Obr. 2.3 – Vznik vztlaku na listu turbíny obtékané větrem [7]

Listy turbíny mají tvar aerodynamického křídla a pokud jsou obtékány větrem, dochází při správném nastavení listu na jedné straně ke vzniku přetlaku a na druhé ke vzniku podtlaku. Rozdíl tlaků vzduchu vytváří vztlakovou sílu kolmou ke směru větru.

Nejčastější provedení vztlakových turbín, se kterým se lze setkat, jsou turbíny s horizontální osou a třemi lopatkami. Účinnost těchto turbín může dosahovat i více než 40 %. Nevýhodou vztlakových turbín s horizontální osou je nutnost natáčení turbíny tak, aby směr rotace byl kolmý na směr větru.



Obr. 2.4– Rozměry větrných turbín o různých výkonech [7]

Výkon takovéto větrné turbíny lze spočítat pomocí vzorce

$$P_{turbína} = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v^3 \quad (2.1)$$

kde $P_{turbína}$... je výkon větrné turbíny [W],

η ... je účinnost větrné turbíny [%],

ρ ... je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

A ... je plocha větrné turbíny [m^2],

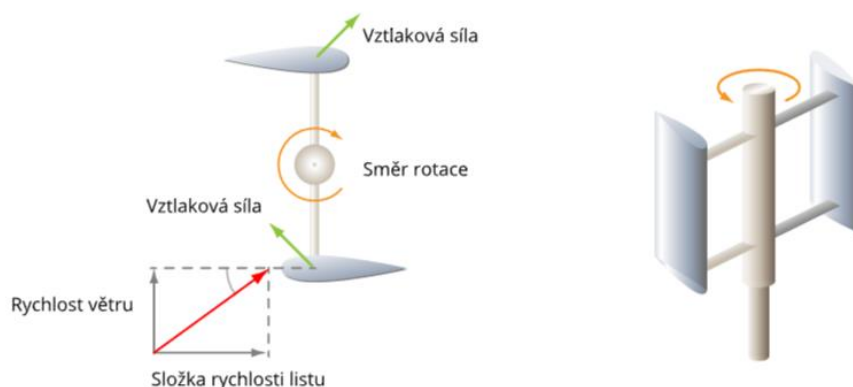
v ... je rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Vývoj nových materiálů umožnil dosáhnout rapidního růstu možných výkonů turbín. Na konci minulého století se výkony největších větrných elektráren pohybovaly v jednotkách MW a v dnešní době se pomalu blíží hranici 20 MW.

V červenci roku 2023 byla v Číně postavena největší větrná turbína na světě. Rotor této turbíny má průměr 260 metrů a stojí na 152 metrů vysoké věži. Výkon této turbíny dosahuje neuvěřitelných 16 MW a v blízké budoucnosti plánují postavit podobnou turbínu o výkonu 18 MW. Turbínu vyrobila společnost Ming Yang Smart Energy Group Limited a turbína nese označení MySE 16-260. Do této doby držela rekord největší turbína V236 od společnosti Vestas Wind Systems instalovaná na moři poblíž Dánska, jejíž rotor má o 24 metrů menší průměr a její výkon čítá 15 MW. [14]

2.3.1 Darrieova vztlaková turbína

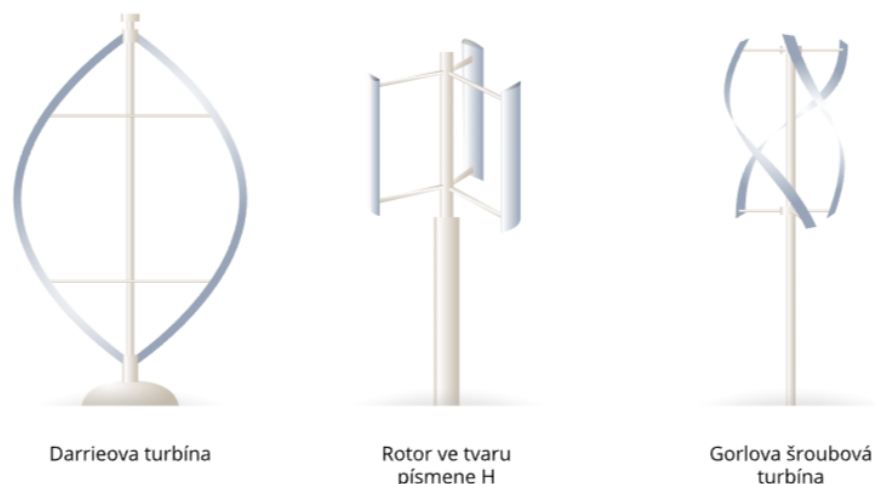
Dalším typem vztlakové turbíny je Darrieova turbína, která má vertikální osu rotace podobně jako Savoniova turbína, a tedy dokáže pracovat nezávisle na směru větru. Moment turbíny není konstantní a dochází k jeho sinusové pulzaci. Zatočením lopatek do spirály dosáhneme rovnoměrného momentu. Vztlaková síla vzniká pouze pokud se turbína otáčí, což znamená, že za normálního stavu není turbína schopna samovolného rozběhu. Pro rozběh můžeme použít dodatečnou Savoniovu odporovou turbínu nebo rozběhový motor.



Obr. 2.5 – Darrieova vztlaková turbína [7]

Obyčejná Darrieova turbína má tvar písmene „H“ . Pro malé výkony a malé hmotnosti lopatek nejsou na spojení s hřídelí turbíny příliš vysoké pevnostní požadavky. Pro zvětšení výkonu jakékoliv turbíny je nutné zvětšit její velikost, což také vede ke zvýšení hmotnosti lopatek. Pro velké výkony, řádově v MW, není konstrukce ve tvaru „H“ možná, a tedy se pouze používá konstrukce připomínající vejce. V této konfiguraci se tedy lopatky z části samy podpírají. Natočením lopatek do spirály dojde opět k větší rovnoměrnosti momentu. Vítr působící na středový díl turbíny se ji snaží převrátit, a proto se turbína ukotvuje pomocí lan, to u turbíny s horizontální osou není možné z důvodu potřeby natáčení proti směru větru.

Ačkoliv mají Darrieovy turbíny určité výhody jako jejich kompaktnější design a schopnost pracovat nezávisle na směru větru, převažují u nich v provedení pro velké výkony nevýhody. Oproti vztakovým turbínám s horizontální osou jsou náchylnější na vibrace způsobené turbulencemi, mají nižší účinnost a škálování velikosti turbíny s jejím výkonem je problematické. V energetice tedy našly uplatnění vztakové turbíny s horizontální osou. Darrieovy turbíny nacházejí uplatnění především jako malé větrné elektrárny pro podniky nebo domácnosti, jelikož nevyžadují složité mechanismy pro natáčení rotoru a lopatek.



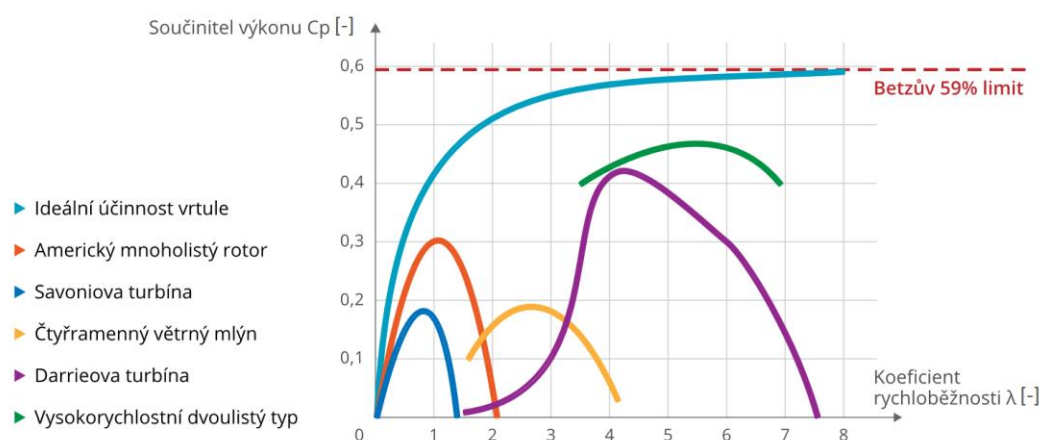
Obr. 2.6 – Různé typy a adaptace Darrieovy vztakové turbíny [7]

Účinnost této turbíny se pohybuje okolo 35 %, a tedy je vhodnou alternativou Savoniovy odporové turbíny.

2.4 Účinnost větrných turbín

Teoreticky nejvyšší účinnost větrných turbín popsal v roce 1919 Albert Betz. Betzův limit tvrdí, že pro jakýkoliv design turbíny lze dosáhnout nejvyšší účinnosti 59,3 %. V současnosti dosahují větrné turbíny více než 70 % Betzova limitu.

Koeficient rychloběžnosti je poměr mezi obvodovou rychlostí turbíny ku rychlosti větru. Vztlkové turbíny obecně z principu dokážou dosáhnout vyšší obvodové rychlosti než odporové turbíny.



Graf 2.1 – Porovnání účinnosti různých turbín v závislosti na jejich rychloběžnosti [7]

2.5 Generátory ve větrných elektrárnách

2.5.1 Asynchronní generátory

U středních výkonů větrných elektráren se jako generátory používají asynchronní motory s kotvou nakrátko, která pracují v generátorovém režimu. Pro chod v generátorovém režimu je nutné, aby otáčivá rychlost rotoru byla vyšší než otáčivá rychlost točivého magnetického pole, z čehož plyne, že při nízkých rychlostech větru a nízkých otáčkách rotoru turbíny není možný provoz. Tento problém lze vyřešit externím napájením rotoru neboli podsynchronní kaskádou, který je možný pouze u kroužkových motorů. Výhodou je, že asynchronní generátor má jednodušší konstrukci a je provozně spolehlivější. Nevýhodou je odběr jalového výkonu pro vytvoření točivého magnetického pole.

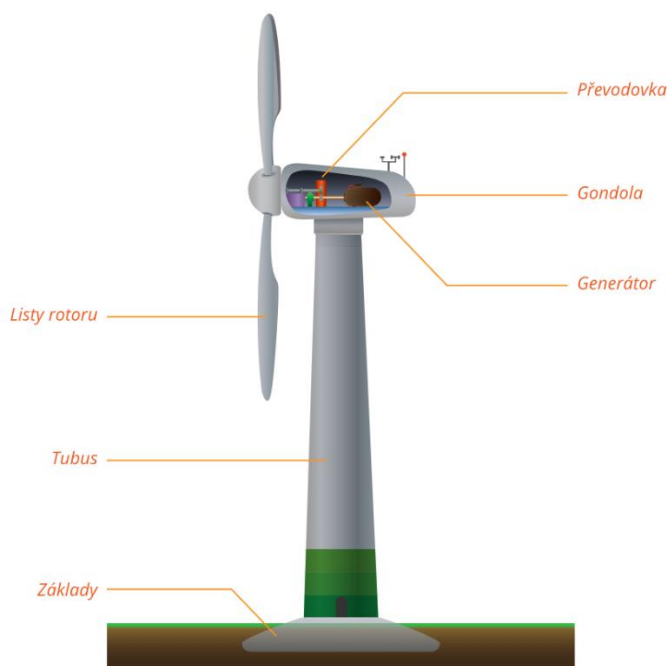
2.5.2 Synchronní generátory

Pro malé větrné elektrárny se využívají synchronní generátory s permanentními magnety na rotoru. Elektřina vyrobená těmito generátory se usměrní a je uložena v akumulátorech, kterou lze pomocí střídače rozstřídat a napájet ní spotřebiče v domácnosti nebo průmyslovém podniku. Malé větrné elektrárny jsou možnou alternativou fotovoltaických elektráren pro domácnosti a malé podniky.

Pro velké větrné elektrárny se také používají synchronní generátory. Frekvence výstupního napětí je přímo úměrná otáčivé rychlosti rotoru větrné turbíny, a tedy není stejná jako frekvence sítě. Je tedy nutné upravit frekvenci výstupního napětí pomocí frekvenčního měniče.

2.6 Popis větrné elektrárny se vztlakovou turbínou s horizontální osou OSOU

Základními částmi větrné elektrárny se vztlakovou turbínou s horizontální osou jsou tubus, gondola a rotor.



Obr. 2.7 – Popis větrné elektrárny se vztlakovou turbínou s horizontální osou [7]

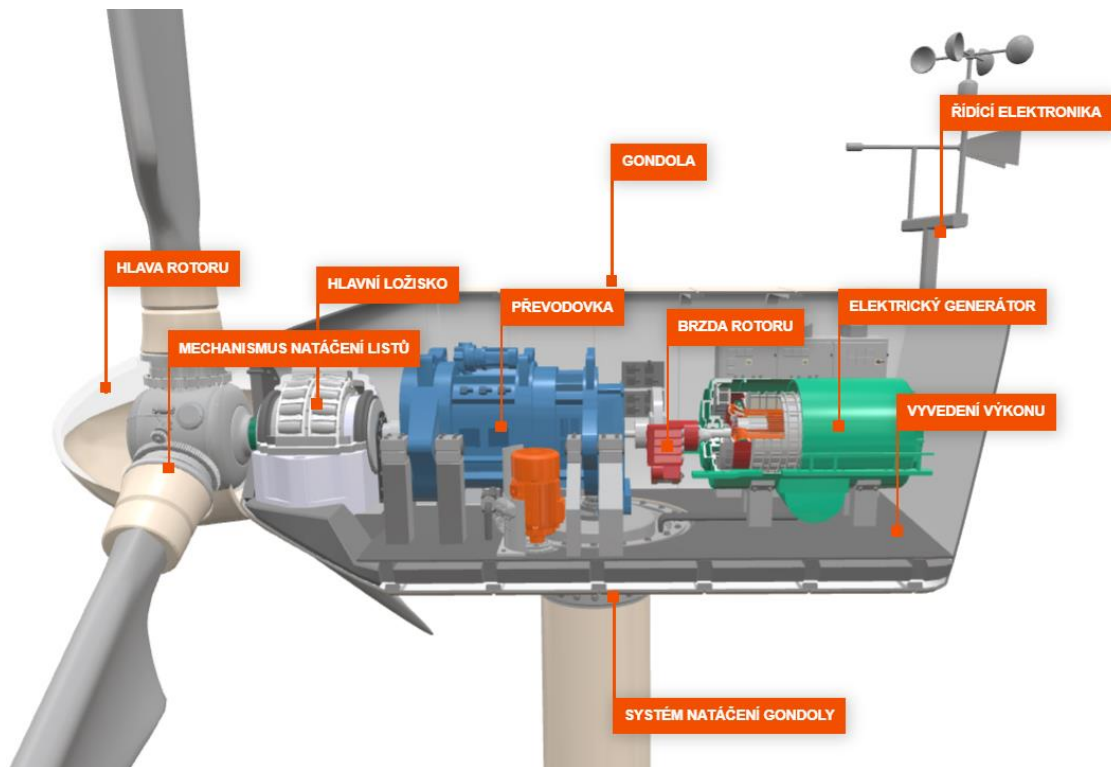
2.6.1 Tubus

Tubus je vyroben z oceli z důvodu vysokých nároků na pevnost a nosnost gondoly a rotoru. Zároveň musí být schopný odolávat vysokým větrům, při kterých nesmí dojít k jeho rozkmitání. Tubus stojí na železobetonovém monobloku, který musí dostatečně rozložit hmotnost celé větrné elektrárny a odolávat dynamickému horizontálnímu zatížení větrem působícím na tubus a rotor. Celý tubus je tvořen několika segmenty měřících pár desítek metrů, které jsou společně sešroubovány. Tloušťka stěn tubusu se pohybuje v jednotkách centimetrů. V přízemní části může být umístěn transformátor sloužící k převodu výstupního napětí elektrárny na hladinu vysokého napětí. Z ekonomických důvodů může tento transformátor sloužit pro více větrných elektráren v dané lokalitě a nemusí tedy být v každé umístěn. V prvním nadzemním patře tubusu jsou umístěny polovodičové měniče a střídače, které slouží k rozstředění stejnosměrného napětí přivedeného z gondoly na danou hodnotu a síťovou frekvenci. V tubusu je zároveň umístěn žebřík a výtah sloužící k dopravě obsluhy do gondoly.

2.6.2 Gondola

Gondola větrné elektrárny je ve spodní části tvořena nosnou ocelovou konstrukcí. Stěny a horní část jsou tvořeny ze sklolaminátu za účelem snížení hmotnosti. Z rotoru větrné elektrárny je kinetická energie přenášena do gondoly pomocí hřídele, která je uložena v hlavních nosném ložisku a vstupuje do převodovky. Jelikož se otáčky rotoru pohybují v rozmezí 5-20 ot/min, je nutné je zvýšit na pracovní otáčky generátoru, které se pohybují v tisících otáčkách za minutu. Z důvodu kompaktnosti se především využívá převodovka planetového typu tvořena několika stupni a může být doplněna i dalšími stupni koaxiálního typu. Výstupní hřídel převodovky je přes spojku spojena s generátorem. Spojka slouží také ke kompenzaci rázů při velkých poryvech větru. Na výstupní hřídeli je zároveň připevněna brzda rotoru, která slouží k zabrzdění rotoru při vysokých rychlostech větru, pravidelné údržbě nebo krizových situacích. Generátor je ve většině případů synchronní a stator bývá tvořen více póly z důvodu snížení jeho pracovních otáček. Výstupní napětí bývá usměrněno a vyvedeno do tubusu. Vedení musí

být v mezní části volnější a částečně flexibilní, jelikož se změnou směru větru dochází k natáčení celé gondoly a s tím i rotoru. Na střeše gondoly jsou umístěny přístroje jako je například anemometr, který slouží k měření rychlosti a směru větru. Údaje z těchto přístrojů využívá řídicí elektronika větrné elektrárny pro svůj optimální a bezpečný chod.



Obr. 2.8 – Popis gondoly větrné elektrárny [7]

V současné době se lze také setkat s gondolami, které nahrazují převodovku mnoha pólovými generátory. Odstraněním převodovky se výrazně sníží hmotnost gondoly, ale musí dojít ke zvětšení rozměrů gondoly. Tyto gondoly lze poznat tím, že mají velice zakulatěný tvar oproti gondolám s převodovkou, které mají tvar kvádrů.

2.6.3 Rotor

Rotor větrné elektrárny je tvořen hlavou rotoru, k němuž jsou nejčastěji uchyceny tři rotorové listy. Listy musí být částečně pružné a schopné odolávat velkým odstředivým silám způsobenými rotací a tíhovým silám způsobenými vlastní vahou listů, a proto jsou vyrobeny ze sklolaminátu, který je vhodným materiálem pro toto použití. Rotorové listy

mohou být vybavené mechanismem pro jejich natáčení, což umožňuje plynule regulovat vznikající aerodynamické síly, a tedy i výkon elektrárny. V zimních obdobích může při nízkých teplotách docházet k námraze na listech, což vede ke snížení jeho aerodynamických vlastností, a proto jsou listy uvnitř vybaveny systémem vyhřívání pomocí teplého vzduchu, který slouží k odstranění námrazy při jejich velké akumulaci.

2.7 Regulace výkonu vztlakových turbín s horizontální osou

S rostoucí rychlostí větru rostou i aerodynamické síly působící na listy rotoru větrné elektrárny. Z konstrukčního hlediska jsou listy schopné odolávat jen určitému zatížení, a tedy je nutné je regulovat a omezovat výkon větrné elektrárny. Obecně existují dva systémy regulace, z nichž jeden je pasivní a druhý je aktivní. Existuje však i třetí způsob regulace výkonu, který využívá pasivních i aktivních vlastností.

2.7.1 Regulace stall a aktivní stall

Regulace stall pracuje na pasivním principu pomocí speciální konstrukce listu rotoru. Při vysokých rychlostech větru klesá vznikající aerodynamická síla působící na listy rotoru. Výhodou této regulace je menší počet pohyblivých částí a s tím i nenáročná údržba a spolehlivost.

Dalším způsobem regulace je aktivní stall, jejíž princip spočívá v pohybu určitých částí listu, čímž se zmenší vztlakové síly působící na list rotoru. Tímto dojde ke snížení výkonu turbíny. Snížení aerodynamické síly při této regulaci nevzniká pasivně, ale je instruováno aktivními pohyblivými prvky listu.

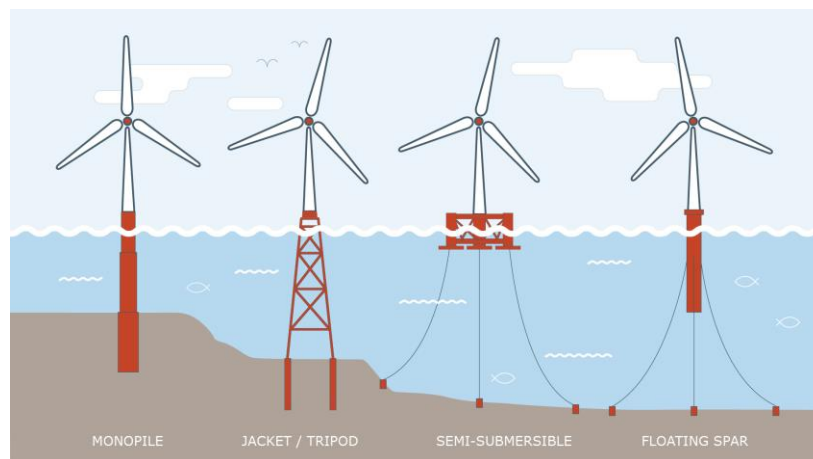
2.7.2 Regulace pitch

Regulace pitch pracuje na aktivním principu a to tím, že se natáčením listů rotoru snaží udržet konstantní aerodynamické síly, které na ně působí. Při vysokých rychlostech větru

a po překročení jmenovitého výkonu řídicí elektronika natočí listy o takový úhel, aby vznikající aerodynamické síly byly ekvivalentní jmenovitému výkonu větrné elektrárny. Tento způsob regulace také umožňuje jednoduchý rozběh turbíny natočením listů do vhodné polohy.

2.8 Větrné elektrárny na moři

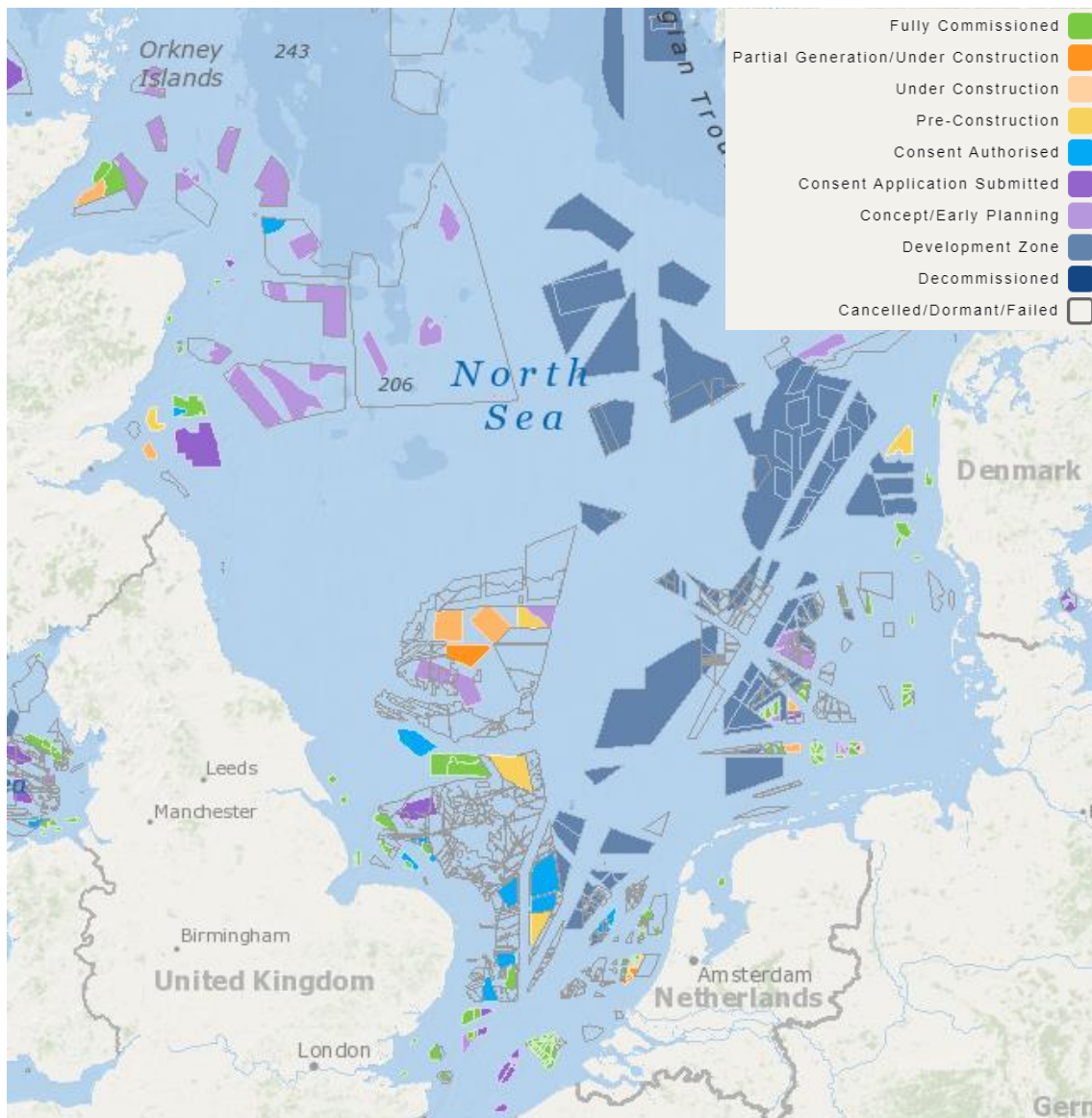
S výstavbou větrných elektráren na moři je spojeno mnoho benefitů. Větrné podmínky na mořích bývají často velmi stabilní a silnější, a tedy je koeficient využití větrných elektráren větší než těch umístěných na pevnině. Větrný potenciál u mořských větrných elektráren je větší než na pevnině, jelikož nedochází k omezením způsobenými dodržováním vzdáleností od obydlí a veřejných infrastruktur, což umožňuje výstavbu rozsáhlých větrných parků. Mezi větrnými parky je však nutné ponechat námořní koridory, které využívá lodní doprava. Před výstavbou je nutné zhodnotit potenciální vliv těchto staveb na mořské ekosystémy nebo migrační trasy ptáků. Větrné elektrárny umístěné na moři nejsou rozměrově omezeny, a tedy mohou dosahovat takových rozměrů, které aktuální technologie umožňují.



Obr. 2.9 – Způsoby uchycení mořských větrných elektráren k mořskému dnu [21]

S výstavbou větrných elektráren na moři je spojeno mnoho technických výzev. Instalace elektráren na moři je velmi náročná, jelikož jejich základy musí být umístěny na mořském dně nebo musí být schopné plavat, kde jsou poté ukotveny k mořskému dnu podobně jako některé ropné plošiny. Využitý způsob se odvíjí od hloubky moře v místě, kde je větrná elektrárna umístěna.

Vlivem vysoké salinity mořské vody dochází ke korozi ocelových dílů větrných elektráren rychleji než na pevnině, a tedy je nutné provádět údržby z tohoto hlediska častěji. Samotné údržby jsou na mořské hladině složitější z důvodu horší přístupnosti a nepříznivých podmínek moře.



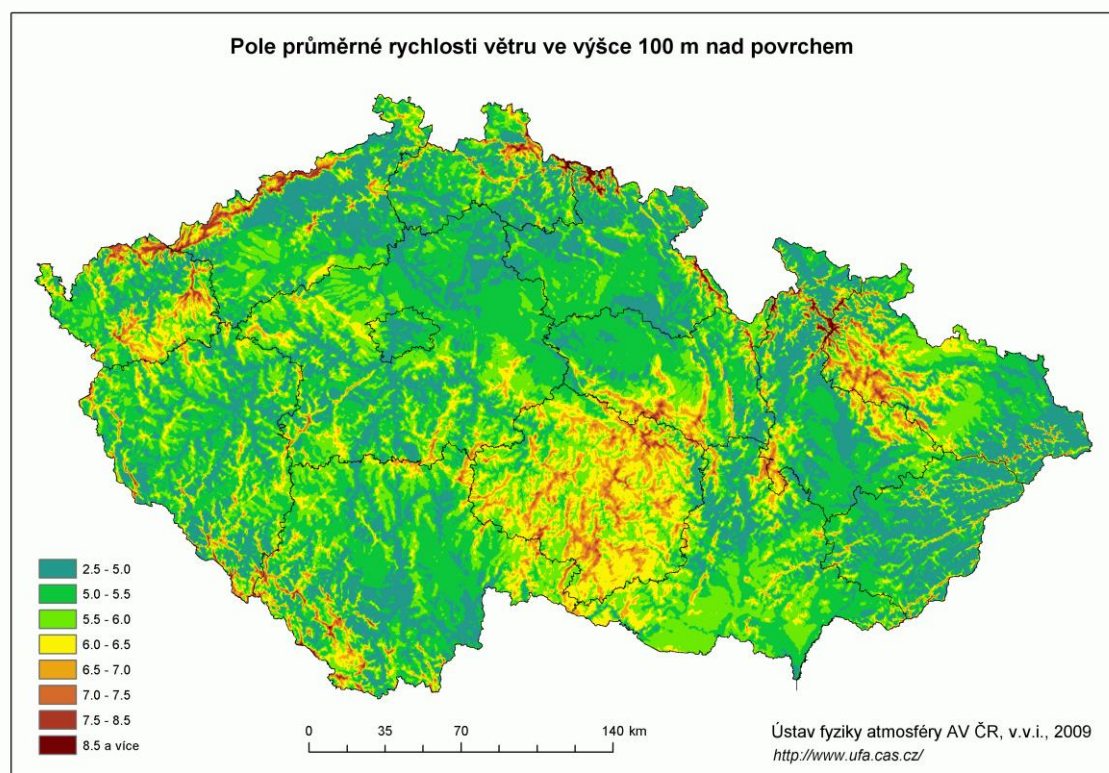
Obr. 2.10 – Mapa mořských větrných parků v Severním moři [22]

Přes všechny tyto nedostatky rozvoj mořských větrných elektráren pokračuje. Největší rozšíření našly v Severním moři, kde okolní státy intenzivně staví obrovské větrné farmy, za účelem snížení uhlíkové stopy nebo pokrytí rostoucí poptávky po elektřině. Jednou z výhod Severního moře je, že se průměrná hloubka pohybuje v desítkách metrů, což výrazně snižuje náklady na výstavbu.

3. VOLBA VHODNÉ LOKALITY PRO UMÍSTĚNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

3.1 Větrná mapa České republiky

Při návrhu větrné elektrárny je prvním krokem výběr vhodné lokality, který začíná u větrné mapy. Na území budoucí větrné elektrárny je nutné, aby zde docházelo k častým a stabilním větrům. Při návrhu velké větrné elektrárny, řádově v MW, se posuzuje průměrná rychlost větru ve výšce 100 m nad povrchem.



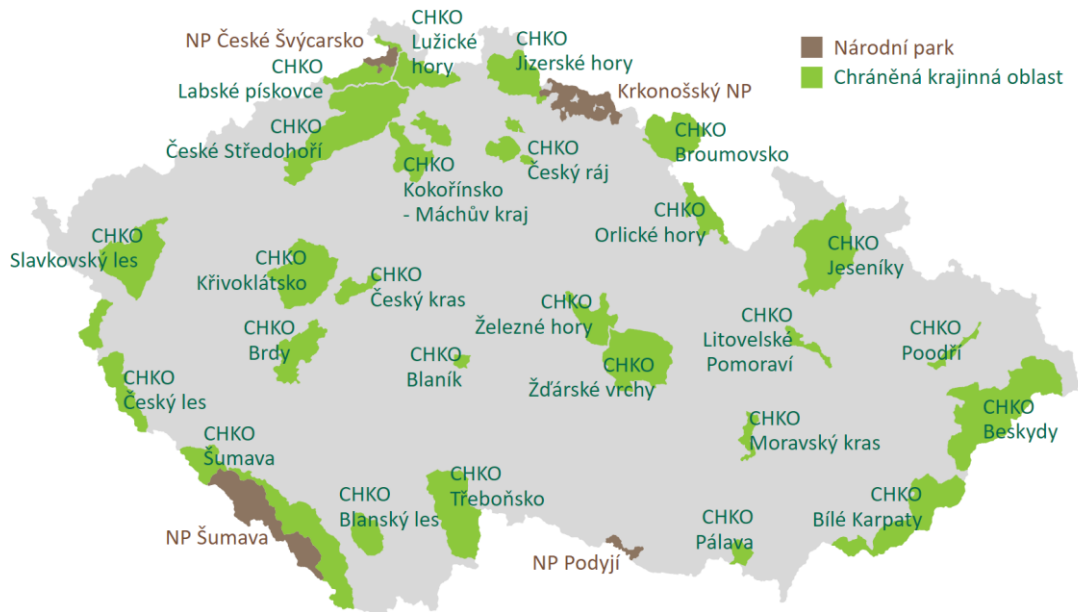
Obr. 3.1 – Větrná mapa České republiky udávající rychlost větru ve 100 m nad povrchem [16]

Pokud se podíváme na větrnou mapu České republiky, zjistíme, že se velice větrné lokality nachází především na horách na území Karlovarského, Ústeckého, Libereckého, Královéhradeckého, Olomouckého a Moravskoslezského kraje a také na území Českomoravské vrchoviny na území kraje Vysočina. Větrné nížiny se na rozdíl od jiných sousedních zemí na území České republiky nevyskytují.

3.2 Důležité faktory ovlivňující výstavbu větrných elektráren

3.2.1 Zákonem chráněné krajiny

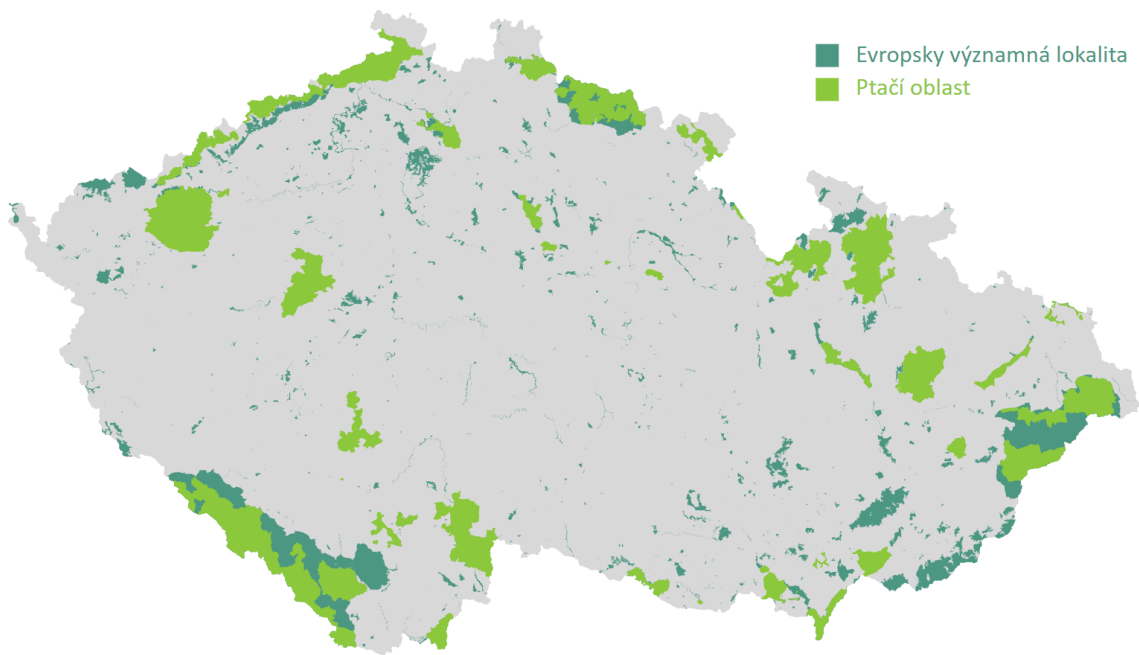
Jedním z hlavních problémů omezujících výstavbu nových větrných elektráren v České republice je, že se vhodné větrné lokality často nachází na území Chráněných krajinných oblastí nebo Národních parků.



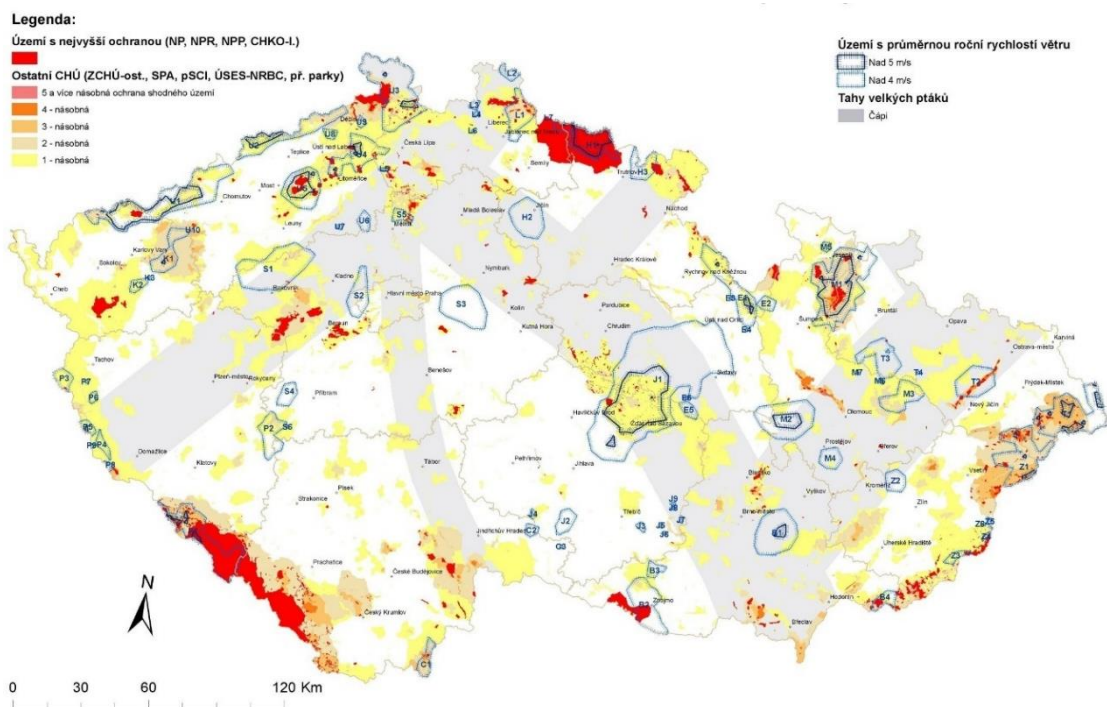
Obr. 3.2 – Mapa CHKO a NP České republiky [17]

Tyto oblasti jsou mimo jiné zahrnuty v soustavě chráněných území Natura 2000, kterou společně vytvářejí členské státy Evropské unie. Ta zahrnuje i některá maloplošná chráněná území a ptačí oblasti. V těchto oblastech se dbá na zachování krajinného rázu a přírody, a tedy je na většině území nemožné stavět mohutné stavby jako jsou větrné elektrárny.

Jako vhodné lokality se jeví větrné oblasti, které nejsou nějak zvláště chráněné a mezi ty se řadí zejména Krušné hory, část Jeseníků a Českomoravská vrchovina. V těchto lokalitách se nachází většina současných větrných parků a lokalit vhodných pro výstavbu dalších.



Obr. 3.3 – Mapa soustavy chráněných území Natura 2000 [17]



Obr. 3.4 – Území vhodná pro umístění větrných elektráren a rozbor závažnosti střetů s ochranou přírody

[18]

3.2.2 Vzdálenost od obydlí a veřejné infrastruktury

Lokalita budoucí větrné elektrárny se nemůže nacházet v bezprostřední blízkosti významných památek a obydlí, a to už z bezpečnostního hlediska tak i z hlediska hluku, jelikož jsou větrné elektrárny poměrně hlučné. Dále nelze větrné elektrárny stavět ve vojenských prostorech nebo poblíž letišť.

3.2.3 Spolupráce s obcemi

Po výběru vhodné oblasti je nutné najít v lokalitě pozemky, které by se mohly odkoupit, popřípadě pronajmout za účelem výstavby větrné elektrárny. Tyto pozemky mohou patřit soukromníkům a fyzickým či právnickým osobám jako jsou například obce.

Často dochází ke spolupráci mezi firmou a obcí nebo obcemi, na jejichž území by mohla větrná elektrárna stát. Obec se může finančně podílet na výstavbě a sdílet tak vlastnictví větrné elektrárny, z níž mohou obci plynout finance nebo také výhodnější ceny elektřiny pro obyvatele. Pokud se obec finančně nepodílí na výstavbě, může s developerem dojít k dohodě k vyplácení kompenzace za narušení krajinného rázu. V každém případě z těchto projektů často vedou finance do obecní kasy, které mohou být využity pro renovace, výstavby a další výhody pro obyvatelstvo. Tímto aspektem lze ovlivnit smýšlení obyvatel, kteří mohou svůj názor vyjádřit v místním referendu a rozhodnout tím o výstavbě větrné elektrárny v jejich okolí.

3.2.4 Povolení spojená s výstavbou

Po schválení výstavby větrné elektrárny občany nastupuje posouzení vlivů na životní prostředí. Tento proces hodnotí možný dopad na zvěř, rostliny, půdu, krajinu, obyvatele a zdraví. Výsledky poté budou udávat možné požadavky na úpravy výstavby a provoz větrné elektrárny. Toto posouzení může probíhat souvisle s ostatním „papírováním“.

Tak jako všechny elektrárny vyžadují licenci na výrobu elektrické energie, tak i provozovatelé větrných elektráren vyžadují tuto licenci, kterou vydává Energetický regulační úřad (ERÚ). Tuto licenci vyžadují instalace přesahující 10 kWp, které budou dodávat elektrickou energii do sítě.

Od ledna 2023 jsou výrobní elektrické energie z obnovitelných zdrojů definovány jako veřejná technická infrastruktura, což znamená, že lze větrné elektrárny umísťovat i na plochy, které nejsou k těmto účelům vyhrazeny v územních plánech. Zároveň lze výstavby výroben elektrické energie z obnovitelných zdrojů, jejichž instalovaný výkon přesáhne 1 MW, považovat za objekty ve veřejném zájmu. Tyto fakta mohou výrazně urychlit schvalovací procesy spojené s výstavbou větrných elektráren, které většinou trvají několik desítek měsíců. [19]

Pro výstavbu větrné elektrárny je dále nutné obstarat stavební povolení od stavebního úřadu.

3.2.5 Elektrická infrastruktura

Vyrobená elektrická energie musí být z místa výroby vyvedena do distribuční soustavy a provádí se nejčastěji na hladině vysokého napětí na napětí 22 kV nebo 35 kV v závislosti na lokaci. Pokud se bude budoucí větrná elektrárna nacházet v blízkosti již existujících elektráren, je možné, že při dimenzování distribuční soustavy v této lokaci bylo uvažováno do budoucnosti s další možnou výstavbou větrných elektráren, a tedy bude možné vyvádět vyrobený výkon bez rozsáhlých stavebních úprav lokální distribuční soustavy. Pokud tomu však tak nebude, je pravděpodobné, že bude muset dojít k přestavbě distribučního vedení na náklady developera, což povede ke zvýšení nákladů na výstavbu a ke zvýšení doby návratnosti projektu.

3.2.6 Silniční infrastruktura

S výstavbou větrné elektrárny je spojena i doprava jednotlivých dílů na místo stavby. Jednotlivé díly tubusu jsou sice rozměrné, ale nedosahují takových rozměrů jako rotorové listy. Listy rotoru jsou tvořeny jedním kusem a jejich délky se pohybují v desítkách metrů. Silniční komunikace, po kterých bude provedena přeprava jednotlivých dílů, nesmí obsahovat prudké zatáčky, zeleň v bezprostřední blízkosti nebo na takovém místě, na kterém by omezovala pohyb tahače s nákladem, a celkově musí umožnit přepravu těchto dílů.



Obr. 3.5 – Tahač přepravující list větrné elektrárny [7]

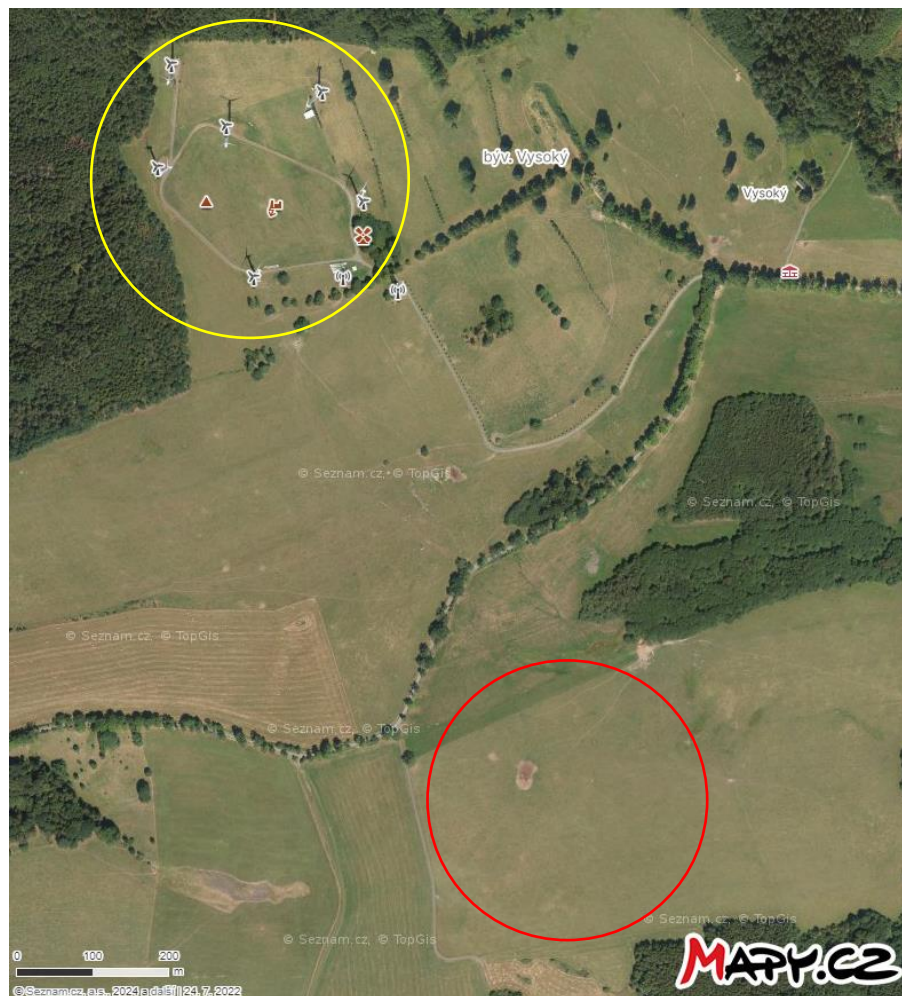
3.2.7 Přístupnost a struktura podloží lokality

Důležité je zvážit dostupnost lokality pro potřeby stavby a údržby větrné elektrárny. Pokud je terén obtížně přístupný, může to vést ke zvýšení nákladů na výstavbu. Povrch terénu může ovlivnit způsob výstavby základů větrných turbín a přístupových cest. Typ podloží může výrazně ovlivnit způsob a cenu výstavby železobetonových základů, například skalnatý terén může vyžadovat techniku pro jejich instalaci.

4. NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

4.1 Výběr lokace

Pro umístění větrné elektrárny jsem vybral oblast na katastrálním území Horní Vítkov, který je částí města Chrastava v Libereckém kraji. Kód katastrálního území města Chrastava je „KU.653845“. Zeměpisné souřadnice vybrané lokality jsou: „50.8588447N, 15.0071886E“. V blízkosti se nenachází žádná kulturní památka ani letiště, oblast zároveň neleží v žádném chráněném území či vojenském prostoru. Žádná obydlí se v bezprostřední blízkosti také nenachází.



(červeným kroužkem je vyznačena vybraná lokalita (v dolní části) a žlutým kroužkem je vyznačena existující větrná farma (v horní části))

Obr. 4.1 – Letecký snímek vybrané lokality [32]

V nedalekém okolí se nachází dva větrné parky. Nejbližším z nich je Lysý vrch u Albrechtic, kde stojí šest větrných turbín, a druhým nejbližším je Větrný park Václavice, který je druhým největším v České republice a čítá ho 13 turbín. V blízkosti také stojí jedna osamocená větrná elektrárna. Lokace je tedy vhodná pro výstavbu větrných elektráren a pokud to je možné, bylo by ji vhodné rozšířit o další větrné parky.

Vybraná oblast se nachází nedaleko hranice dvou katastrálních území Chrastavy a Frýdlant. Z organizačního důvodu je vhodné prozatím omezit rozlohu budoucího větrného parku na katastrální území pouze jednoho města. Tímto omezením nebudou muset probíhat dvě úřední řízení najednou, což bude časově i finančně méně náročné. Oblast byla tedy omezena pouze na katastrální území města Chrastava, což je možné vidět v následujícím obrázku.



(žlutý kroužek značí přibližnou oblast navrhovaného větrného parku; červená značí hranici katastrálního území Chrastava)

Obr. 4.2 – Letecký snímek vybrané lokality s hranicemi parcel [32]

Obě velké parcely patří jednomu majiteli a všechny malé čtvercové parcely patří dalšímu majiteli. Všechny se ale používají jako zemědělská půda využívaná pro pěstování sena nebo jako pastvy pro dobytek. Po dokončení výstavby větrné elektrárny a uvedení do provozu by se opět půda mohla začít využívat k zemědělským účelům.

Pokud by byli oba majitelé ochotni prodat nebo spíše pronajmout pozemky, mohlo by se pokračovat dál v projektu. Doporučuje se provést měření větru ve vybrané lokalitě po dobu alespoň jednoho roku, abychom měli představu o tom, jak se mění větrné podmínky v průběhu roku.

Dalším krokem by bylo ohlášení zájmu o výstavbu větrného parku obci, na jejímž území bychom chtěli stavbu provádět, a zastupitelstvo by muselo projevit souhlas s výstavbou nebo by vyhlásilo místní referendum a občané by vyjádřili svůj souhlas či nesouhlas s naším projektem.

Pokud by se obě strany vyjádřily kladně, mohla by se podat žádost o posouzení vlivu na životní prostředí, ze kterého by mohly vzejít různé požadavky na stavbu a její chod.

4.2 Větrné podmínky ve vybrané lokaci

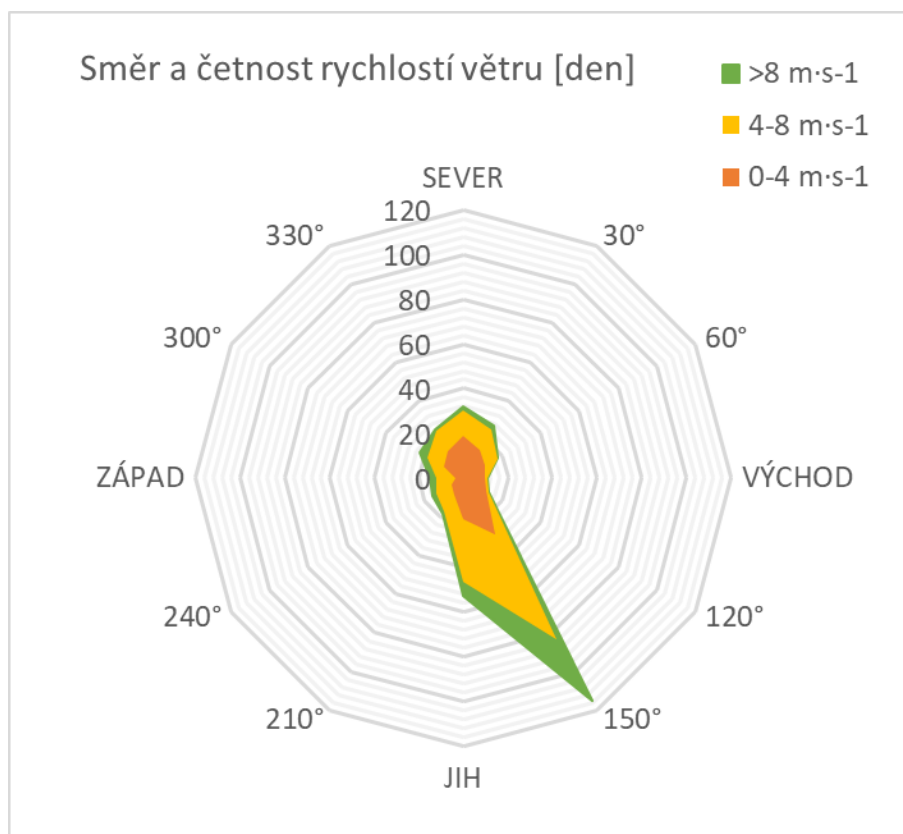
V tabulce 4.1 jsou uvedeny větrné parametry vybrané lokality jako jsou četnosti a směry rychlostí větru.

Tyto hodnoty byly získány z mapy větrných podmínek ve výšce 10 m nad povrchem Ústavu Fyziky Atmosféry Akademie Věd ČR [20]. Tyto hodnoty jsou však nevyhovující pro velké větrné elektrárny, jelikož jsou uváděny ve výšce 10 metrů na povrchu, a tedy je nutné je přepočítat na výšku, ve které se bude nacházet střed rotoru, což bude přibližně ve výšce 90 metrů na povrchu. K tomu jsem využil vzorce 1.1.

Ve vybrané lokaci velmi výrazně převažuje vítr z jihovýchodu až jihu, což je možné vidět v tabulce 4.1 a následujícím grafu 4.1.

Směr větru [°]	Četnost směru větru [den]				Průměrná rychlost větru v 90 m nad povrchem [m·s ⁻¹]
	Všechny rychlosti větru	0-4 m·s ⁻¹	4-8 m·s ⁻¹	>8 m·s ⁻¹	
0	31,78	18,70	11,58	1,50	5,66
30	27,03	14,46	10,59	1,97	6,15
60	17,90	11,36	6,17	0,37	5,24
90	10,96	9,86	1,10	0,00	3,22
120	13,15	11,61	1,50	0,00	3,49
150	115,05	28,96	54,17	31,92	9,37
180	52,60	18,37	28,31	5,88	7,54
210	18,63	8,47	8,66	1,50	6,70
240	15,71	6,21	7,49	2,01	7,40
270	14,98	3,69	8,58	2,74	8,60
300	22,28	9,64	8,69	3,94	7,57
330	25,20	13,92	10,67	0,62	5,81
celkem	365,25	155,30	157,53	52,41	6,40

Tab. 4.1 – Četnost, směr a průměrná rychlost větru ve vybrané lokaci pro návrh větrné elektrárny [20]



Graf 4.1 – Rozdělení směrů větru a průměrná rychlost větru [20]

Větrné elektrárny budou většinu doby svého provozu nasměrovány směrem na jihovýchod až jih.

4.2.1 Rozdělení četností rychlostí větru

Pro výpočet vyrobené elektřiny větrnou elektrárnou je nutné sestavit Weibullovo rozdělení četností různých rychlostí větru v roce. K tomuto potřebujeme znát průměrnou rychlost větru ve vybrané lokalitě přepočtenou na výšku, ve které se bude nacházet střed rotoru větrné turbíny. Potřebná průměrná rychlost větru je uvedena v tabulce 4.1 a její hodnota je $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pro sestavení rozdělení četnosti větru využijeme následující rovnici

$$f(v) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^b} \quad (4.1)$$

kde v ... je rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

a ... je součinitel určující polohu maxima [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

b ... je tvarový součinitel, který lze volit v rozmezí od 1,5 do 3 [-]. [3]

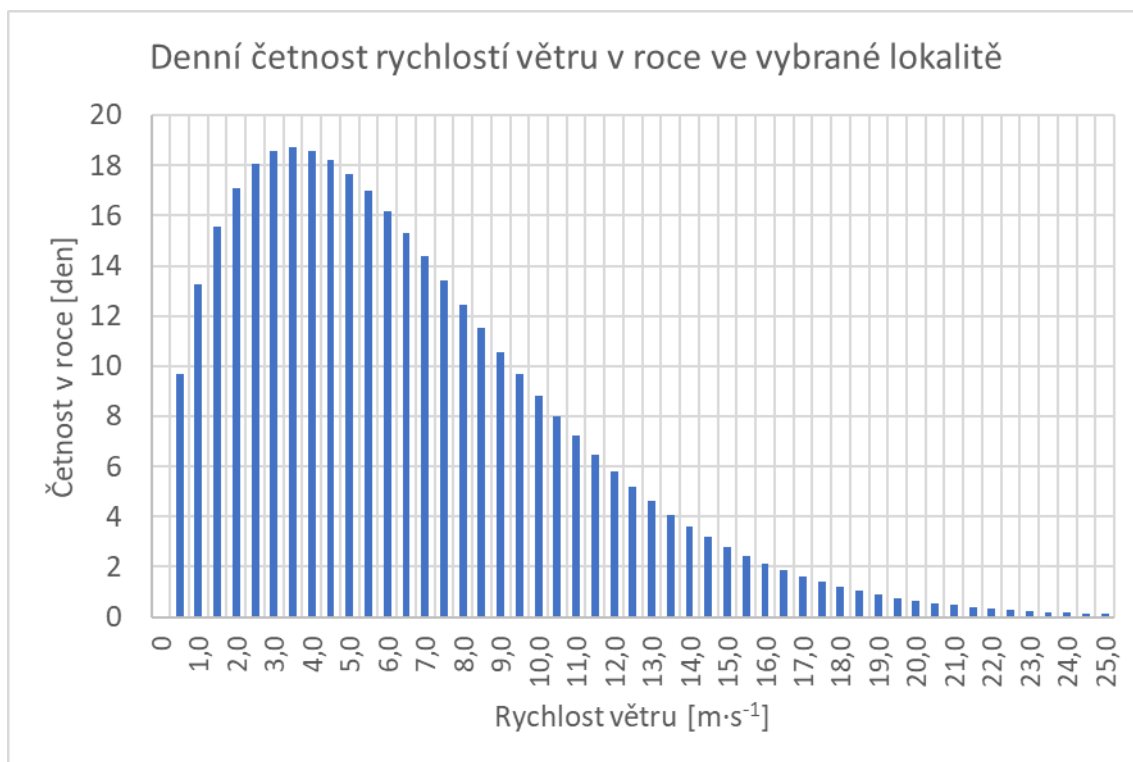
Součinitel určující polohu maxima a určíme následovně pomocí vzorce

$$a = \frac{v_{avg}}{0,88} \quad (4.2)$$

kde v_{avg} ... je průměrná rychlost větru ve vybrané lokalitě [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

a ... je součinitel určující polohu maxima [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. [3]

Průměrná rychlost větru v_{avg} ve vybrané lokaci je $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro sestavení rozdělení četností větru jsem zvolil hodnotu tvarového součinitele $b = 1,5$, jelikož při vyšších hodnotách neodpovídá rozdělení větrů reálným předpokladům. Po dosazení hodnoty průměrné rychlosti větru do rovnice (4.2) dostaneme hodnotu součinitele a , který dosadíme do rovnice (4.1) a získáme histogram, který je uvedený v grafu 4.2.



Graf 4.2 – Denní četnost rychlostí větru v roce ve vybrané lokalitě

Jak je již viditelné z grafu 4.2, tak toto rozdělení nereprezentuje dny nulové rychlosti větru neboli bezvětří.

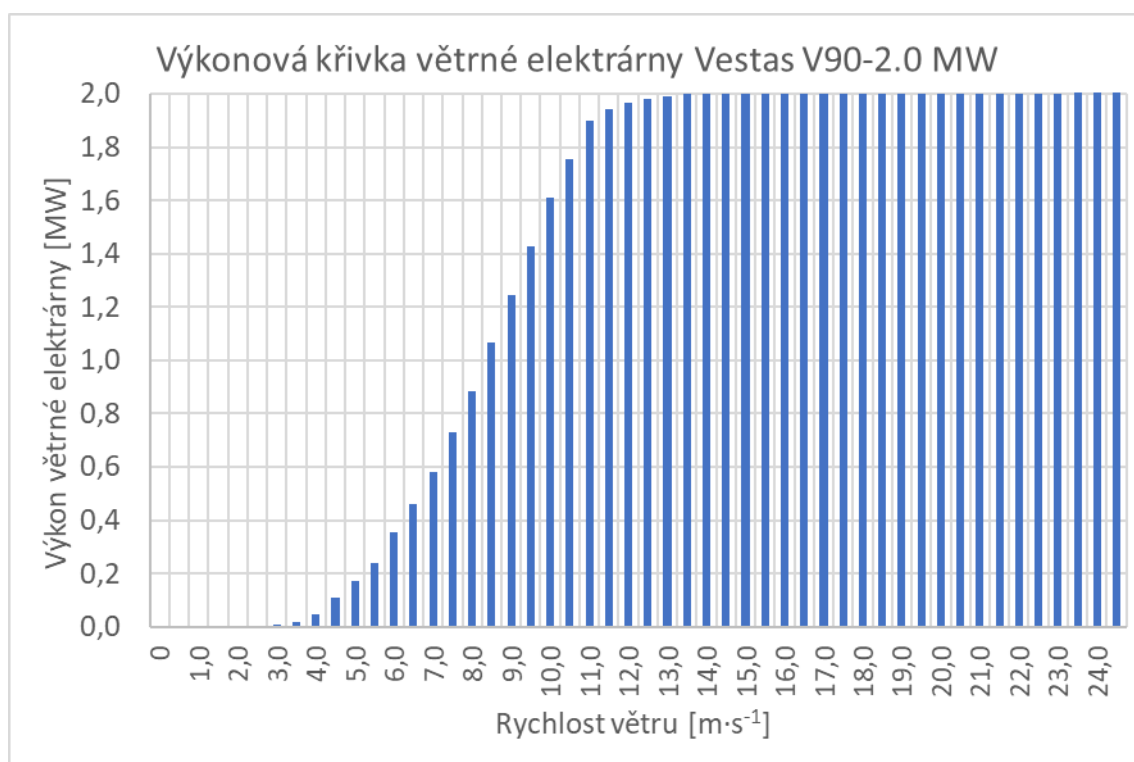
4.3 Výběr větrné elektrárny

Pro návrh ve vybrané lokalitě jsem vybral větrné elektrárny se vztakovou turbínou s horizontální osou od společnosti Vestas Wind Systems A/S model V90-2.0 MW. Tyto větrné elektrárny jsem vybral především z toho důvodu, že jsem k nim byl schopen dohledat parametry a přibližnou částku za použitou jednotku.

V následující tabulce a grafu jsou uvedeny klíčové parametry a vlastnosti vybrané větrné elektrárny.

Vybraná větrná elektrárna	
Výrobce	Vestas
Model	V90-2.0 MW
Generátor	asynchronní
Převodovka	ano
Typ regulace výkonu	pitch
Počet listů rotoru [-]	3
Jmenovitý výkon [kW]	2000
Průměr rotoru [m]	90
Naběžná rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	3
Jmenovitá rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	13,5
Maximální rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	25
Minimální výška tubusu [m]	80
Maximální výška tubusu [m]	120

Tab 4.2 – Parametry větrné elektrárny Vestas V90-2.0 MW [33]



Graf 4.3 – Výkonová křivka větrné elektrárny Vestas V90-2.0 MW [33]

4.4 Počet a rozmístění větrných elektráren ve vybrané lokalitě

Ve vybrané lokalitě se nachází dostatek volného prostoru, a tedy je možné zde vybudovat více než jednu větrnou turbínu. Aby se větrné elektrárny navzájem

neovlivňovaly turbulencemi, které snižují výrobu elektřiny a životnost větrných elektráren, doporučuje se je rozmisťovat tak, aby vzájemná vzdálenost byla přibližně pětinasobek průměru rotoru turbíny. [11] V praxi se však využívá přibližně trojnásobek, což je možné vidět na mnoho stávajících větrných parcích.

Průměr rotoru vybrané větrné turbíny je 90 m. Aby byly lépe využity pozemky vybrané lokality, budou od sebe větrné elektrárny vzdáleny více než trojnásobek průměru rotoru turbíny neboli 270 m. S těmito vzdálenostmi se na vybranou lokalitu vejdou tři větrné elektrárny, nejsevernější z nich se bude nacházet ve větší vzdálenosti od pozemní komunikace, která probíhá na severozápad od vybrané lokality. Rozmístění větrných elektráren je rozkresleno na obrázku 4.3.

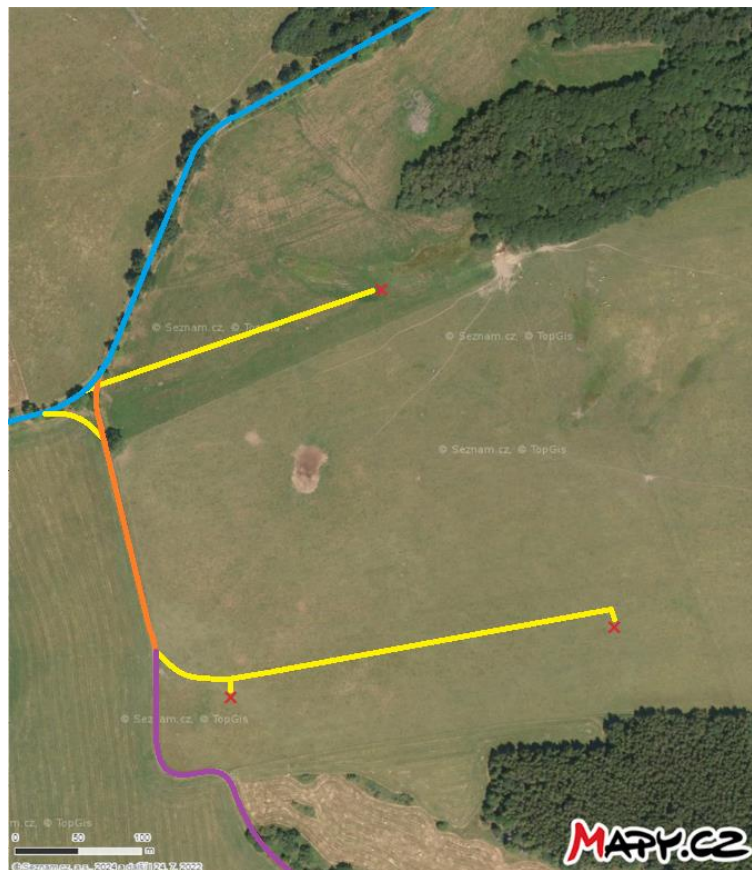


(červené křížky označují větrné elektrárny; červené oblasti označují celkovou plochu operační větrné elektrárny; žluté oblasti označují vzdálenost trojnásobku průměru rotoru větrné turbíny mezi větrnými turbínami; modrá značí pozemní komunikaci)

Obr. 4.3 – Rozmístění větrných turbín ve vybrané lokalitě [32]

4.5 Přístupové komunikace

Pro výstavbu a údržbu větrných elektráren bude nutné vybudovat přístupové komunikace, které by měly umožnit přístup jeřábu a dopravu dílů větrných elektráren na místa umístění. V blízkosti se nachází stávající štěrková cesta, kterou bude v určitém úseku nutné rozšířit a zpevnit. Celkově tedy bude potřeba vybudovat přibližně 700 m nových přístupových cest a upravit přibližně 230 m stávajících štěrkových cest. Přístupové cesty jsou za normálního provozu používány zřídka, a tedy se budují ze štěrku, jelikož je jejich výstavba levnější, jednodušší a šetrnější k životnímu prostředí. Pokud by však docházelo k jejich značné erozi, je možné provést určité úpravy za účelem zpevnění těchto cest.



(červené křížky označují větrné elektrárny; modrá značí stávající asfaltovou pozemní komunikaci; fialová značí stávající štěrkovou cestu; oranžová značí stávající štěrkovou cestu, kterou bude nutné upravit; žlutá značí přístupové cesty, které je potřeba vybudovat)

Obr. 4.4 – Pozemní komunikace a přístupové cesty k větrným elektrárnám [32]

4.6 Připojení k distribuční síti vn

V blízkosti vybrané lokality se nachází elektrické vedení vn 22 kV. Na toto vedení je také připojen blízký větrný park. Větrné elektrárny mají uvnitř tubusu transformátor sloužící ke zvýšení výstupního napětí na hladinu vn, a tím může být napětí 22 nebo 35 kV. Vybraná lokalita se nachází v oblasti, kde se využívá hladina vn 22 kV.

Vedení bude uloženo v zemi, aby se nemusely dodržovat dostatečné vzdálenosti od větrných elektráren a také, aby se mohla okolní zemědělská půda dále využívat bez dalších omezení. Kabelové vedení bude uzpůsobeno tak, aby bylo co nejkratší a bude směřovat k nadzemnímu vedení, které je na sever od vybrané lokality, kde dojde ke spojení těchto dvou vedení. Celková vzdálenost podzemního vedení, které bude nutné vybudovat, je přibližně 900 m. Instalace vedení bude provedena před samotnou výstavbou větrných elektráren.



(červené (červené křížky označují větrné elektrárny; oranžová značí sloup nadzemního vedení vn 22 kV; žlutá značí nadzemní vedení vn 22 kV; modrá značí navrhované podzemní kabelové vedení vn 22 kV)

Obr. 4.5 – Připojení větrných elektráren k distribučnímu vedení vn 22 kV [32]

4.7 Železobetonové základy

Větrné elektrárny budou vztyčeny na železobetonových základech, které slouží k rozložení jejich hmotnosti a zajištění stability. Skrze tyto základy je vyveden výkon větrné elektrárny pomocí podzemního kabelového vedení. Základy mohou mít kruhový, čtvercový nebo šestiúhelníkový tvar o průměru 15 m a tloušťce 2 m. Stavební jámy pro tyto základy musí být o něco větší než samotné základy. Pro 2MW větrné elektrárny se při výstavbě základů používá přibližně 500 m³ betonu, k čemuž je vhodné přičíst 10 % rezervu, a kolem 40 tun železné armatury. Celková hmotnost základů je přibližně 1 100 tun. [27]

4.8 Výroba elektřiny

Abychom mohli vypočítat vyrobenou elektrickou energii za rok je nutné znát rozdělení četností větru, které je uvedeno v grafu 4.2, a výkonovou křivku vybrané větrné elektrárny, která je uvedena v grafu 4.3. Pokud vynásobíme při korespondující rychlosti větru hodnotu výkonu větrné elektrárny z grafu 4.3 a počet dní výskytu této rychlosti větru v roce z grafu 4.2, dostaneme jednu hodnotu vyrobené elektrické energie. Toto lze popsat následující rovnicí

$$E_i = P_v \cdot T_v \cdot 24 \quad (4.3)$$

kde E_i ... je vyrobená elektřina při dané rychlosti větru [MWh],

P_v ... je výkon větrné elektrárny při dané rychlosti větru [MW],

T_v ... je počet dní výskytu dané rychlosti větru v roce [dny].

Jestliže toto provedeme pro všechny rychlosti větru, a následně sečteme tyto prvky, dostaneme vyrobenou elektřinu za rok. Toto lze popsat následujícím součtem

$$E = \sum_{i=0}^n E_i \quad (4.4)$$

kde E ... je celková vyrobená elektrická energie [MWh],

E_i ... je vyrobená elektřina při dané rychlosti větru [MWh],

n ... je počet hodnot na vodorovné ose (v našem případě 48) [-].

V našem případě vyrobí větrná elektrárna 5665,07 MWh elektřiny za rok. Vypočtena byla pouze vyrobená elektřina jedné větrné elektrárny, ale ve vybrané lokalitě plánujeme postavit tři. Za předpokladu, že se větrné elektrárny nebudou navzájem ovlivňovat turbulencemi a „krást“ si tedy větrnou energii, můžeme vynásobit vypočtenou hodnotu roční vyrobené elektrické energie počtem větrných elektráren. Tímto se dostáváme k výsledné vyrobené elektřině za rok navrhovaným větrným parkem, což je 16995,2 MWh.

Roční koeficient využití větrné elektrárny můžeme vypočítat pomocí následující rovnice

$$k_r = \frac{E}{P_N \cdot t_r} \quad (4.5)$$

kde k_r ... je koeficient ročního využití [-],

E ... je celková vyrobená elektrická energie [MWh],

P_N ... je jmenovitý výkon větrné elektrárny [MW],

t_r ... je počet hodin v roce (365,25·24) [h].

Koeficient ročního využití je v našem případě 32,31 %, což je vyšší než průměrná hodnota větrných elektráren v České republice, která je 23 %. [11]

5. POŘIZOVACÍ CENA A DOBA NÁVRATNOSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

5.1 Výdaje na výstavbu

Mezi výdaje na výstavbu větrné elektrárny patří samotná koupě větrných elektráren, koupě či pronájem pozemku, vybudování přístupových cest, vybudování kabelového vedení vn, vybudování železobetonových základů, a nakonec doprava dílů a jejich sestavení.

Cenové odhady jsou velmi hrubé a některé výdaje mohou být zanedbány, a tedy se výsledná výše potřebné investice může velmi lišit od reálné částky tohoto projektu.

Všechny částky jsou uváděny v cenách bez DPH.

5.1.1 Pozemky

Pro jednodušší výpočet budeme uvažovat, že dojde ke koupi pozemků, na kterých by navržená větrná elektrárna měla stát. Odhadovaná cena za 1 m² pozemku je 35,70 Kč bez DPH, pro tento odhad jsem využil webové stránky Odhad Zdarma [23]. Celková výměra všech pozemků je 191 829 m² a cena těchto pozemků je tedy 6,85 mil. Kč bez DPH.

5.1.2 Přístupové cesty

K větrným elektrárnám bude nutné vybudovat 700 m nových a upravit 230 m stávajících příjezdových štěrkových cest. Cena za 1 m² štěrkové cesty je přibližně 1 240 Kč bez DPH [26]. Cenu za úpravu štěrkové cesty budu považovat za třetinovou oproti výstavbě nové. Celková cena přístupových cest je tedy 963,07 tis. Kč bez DPH.

5.1.3 Připojení k distribuční síti

Budeme uvažovat, že nedaleké existující nadzemní vedení vn 22 kV umožní z hlediska zatíženosti připojení navrhovaných elektráren k distribuční síti. Délka podzemního vedení vn, které bude nutné instalovat, je přibližně 900 m, k čemuž ještě přičteme rezervu 50 m. Instalovaný výkon navrhovaného větrného parku je 6 MW a výstupní napětí větrných elektráren je 22 kV, fázový proud je tedy přibližně 157,5 A. K připojení tedy využijeme tři jednožilové kabely o průřezu odpovídajícímu fázovému proudu 157,5 A a uložení v zemi, což je při využití hliníku 50 mm², ale prodejce nabízí nejmenší průřez 70 mm², který tedy využijeme. Cena takového kabelu je 229,48 Kč bez DPH za 1 m [24]. Celková cena kabelu je tedy 654,02 tis. Kč bez DPH. Cena výkopových prací pro uložení kabelového vedení pod zem je přibližně 331 Kč bez DPH za 1 m, tato cena je však přibližná a může se lišit v závislosti na rozměrech potřebného výkopu [25]. Cena výkopu pro uložení kabelového vedení vn je 297,9 tis. Kč bez DPH.

5.1.4 Železobetonové základy

Pro výstavbu železobetonových základů budeme uvažovat hodnoty rozměrů a potřebných materiálů uvedených v podkapitole 4.7. V navrhovaném větrném parku se mají nacházet tři větrné elektrárny, což znamená, že na výstavbu základů bude potřeba 1500 m³ betonu, k čemuž ještě přičteme 10 % rezervu, a 120 tun železné armatury. Pro umístění základů bude také nutné vyhloubit stavební jámy o přibližném průměru 17 m a hloubce 4 m, což je přibližně 908 m³ zeminy. Cena za 1 m³ betonu vhodného pro základy je přibližně 3340 Kč bez DPH [28]. Cena 1 kg betonářské výztuže je přibližně 28,35 Kč bez DPH [29]. Cena vyhloubení 1 m³ zeminy s jejím odvozem je přibližně 826 Kč bez DPH [25]. Celková cena betonu tedy je 5,51 mil. Kč bez DPH, celková cena potřebných výztuží je 3,4 mil. Kč bez DPH a cena vyhloubení tří stavebních jam je 2,25 mil. Kč bez DPH. Výsledná cena tří železobetonových základů je tedy 11,16 mil. Kč bez DPH.

5.1.5 Větrné elektrárny

K výstavbě budeme chtít použít nové větrné elektrárny V90-2.0 MW od firmy Vestas, jejichž cenu jsem ale nedokázal dohledat, a tedy pro odhad jejich ceny využiji dvojnásobek ceny použitých. Jednu takovou větrnou elektrárnu z roku 2006 a výšce tubusu 85 m jsem našel na webu wind-turbine-models.com [30], kde je inzerována cena 477 500 €. Cenu uvažuji jako cenu bez DPH. Uvažovaná cena jedné nové větrné elektrárny je tedy 955 000 €, cena tří je tedy přibližně 2 865 000 € bez DPH, což je k 12.5.2024 celkem 71,49 mil. Kč bez DPH.

5.1.6 Doprava dílů

Na místo stavby bude nutné dopravit jednotlivé díly větrných elektráren. Segmenty tubusu jsou většinou nejméně problémovým dílem, jelikož nejsou v porovnání s ostatními díly tak rozměrné a těžké. Gondola větrné elektrárny je nejtěžším dílem, jelikož váží 68 tun. Nejproblémovějším dílem na převoz jsou listy rotoru, které jsou dlouhé 45 metrů. Jelikož se mi nepodařilo cenu nadrozměrných nákladů dohledat, budu uvažovat, že by tato cena mohla dosahovat 5 mil. Kč bez DPH. Tato částka by se mohla lišit v závislosti na vzdálenosti, kterou by byly díly potřeba dopravit.

5.1.7 Jeřábnické práce

Pro sestavení větrné elektrárny na místě, kde se bude nacházet, je nutné objednat jeřábovou službu. Jeřáb bude sloužit k manipulaci s jednotlivými díly větrné elektrárny, které vyzdvihne do potřebné výšky, kde jej montéři smontují dohromady. Sestavení větrných elektráren trvá přibližně týden, jelikož jsou ale v návrhu uvažovány tři jednotky, bude sestavení všech elektráren trvat přibližně tři týdny. Jelikož se mi nepodařilo cenu jeřábových služeb dohledat, budu uvažovat, že by tato cena mohla dosahovat 5 mil. Kč bez DPH.

5.1.8 Výsledná pořizovací cena

Výsledná pořizovací cena je součet všech dílčích výdajů, což je 103,35 mil. Kč bez DPH.

5.2 Náklady na provoz

Náklady na provoz jsou při bezproblémovém chodu nulové, jelikož větrné elektrárny využívají větrné energie, a tedy nepotřebují žádné externí palivo.

Jako náklady na provoz mohou být považovány pravidelné inspekce a případné výměny opotřebovaných dílů větrné elektrárny. Při výstavbě nových větrných elektráren bychom měli roční náklady na provoz uvažovat jako 1-2 % investičních nákladů.

Roční provozní náklady tedy uvažuji jako 2 % investičních nákladů, což je 2,02 mil. Kč bez DPH.

5.3 Prodej elektřiny

Energetický regulační úřad neboli ERÚ každý rok stanovuje výkupní ceny elektřiny pro elektrárny, které využívají obnovitelných zdrojů energie, jako jsou například vodní, fotovoltaické, větrné, spalující biomasu či bioplyn a další. Výkupní cena pro každý zdroj elektřiny se liší a pro větrné elektrárny uvedené do provozu v roce 2024 je tato cena 2 659 Kč/MWh bez DPH. [34] Další alternativou by bylo prodávat elektřinu za tržní cenu, ke které bychom dostávali zelené bonusy. Tímto lze na vyrobené elektřině více vydělat, ale je také možné, že se výsledná cena bude pohybovat níže než pevně daná výkupní cena. Tato možnost již ale pro nově postavené větrné elektrárny od roku 2022 neexistuje, a tedy musíme zvolit pevně danou výkupní cenu, která je tedy 2 659 Kč/MWh bez DPH.

Hrubý roční příjem z prodeje elektřiny získáme vynásobením vyrobené elektřiny za rok výkupní cenou, tím se dostáváme k částce 45,19 mil. Kč. Z této částky ještě odečteme náklady na provoz a dostáváme čistý roční příjem, který je tedy 43,16 mil. Kč.

5.4 Prostá doba návratnosti

Prostá doba návratnosti projektu udává, za jakou dobu dojde k návratu vložené investice.

Prostou dobu návratnosti můžeme spočítat pomocí následujícího vzorce

$$T_s = \frac{IN}{CF} \quad (5.1)$$

kde T_s ... je doba návratnosti [rok],

IN ... je pořizovací cena [mil. Kč],

CF ... je roční příjem z prodeje elektřiny po odečtení daně a nákladů na provoz [mil. Kč·rok⁻¹].

Pořizovací cena navrhovaného větrného parku je 103,35 mil. Kč bez DPH a čistý roční příjem je 43,16 mil. Kč. Po dosazení těchto hodnot do vzorce (5.1) dostáváme dobu návratnosti 2,35 let.

Životnost větrné elektrárny většinou bývá minimálně 20 let, což znamená, že celkové příjmy z větrné elektrárny mohou potenciálně dosáhnout 718,78 mil. Kč. Po skončení životnosti mohou být větrné elektrárny repasovány a tím prodloužena jejich životnost za zlomek ceny oproti kompletní výstavbě nových větrných elektráren.

ZÁVĚR

Navrhovaná větrná farma se bude nacházet v Libereckém kraji na území města Chrastava a bude se skládat ze tří jednotek V90-2.0 MW od firmy Vestas. Celkový instalovaný výkon větrné farmy bude 6 MW a ročně by měla vyrobít 16 995,2 MWh elektrické energie. Koeficient ročního využití navrhované farmy by měl být 32,31 %, což je vyšší než průměrná hodnota větrných elektráren v České republice. Výsledný hrubý odhad výdajů potřebných k výstavbě větrných elektráren je 103,35 mil. Kč bez DPH. Čistý roční příjem po odečtení nákladů na provoz je 43,16 mil. Kč. Odhad prosté doby návratnosti větrné farmy je 2,35 let.

Z výpočtu roční vyrobené elektřiny a následného koeficientu využití můžeme vidět, že se navržená větrná farma nachází na místě s vhodnými povětrnostními podmínkami. Velké množství větrných parků se nachází i na místech s horšími větrnými podmínkami, než je vybraná lokalita, jedním z nich je například nedaleký větrný park Václavice. Odhadovaná roční výroba elektřiny bude s velkou pravděpodobností nižší, jelikož použitý způsob výpočtu nebere v potaz dny bezvětří. Tím pádem bude i koeficient využití nižší a bude se blížit průměrné hodnotě pro Českou republiku. Množství vyrobené elektřiny a koeficient využití se také v průběhu roku mění v důsledku změny ročního období.

Nehledě na všechny tyto nedostatky je tato lokalita vhodná k výstavbě větrných elektráren, čímž by došlo ke zvýšení podílu elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů a snížení uhlíkové stopy České republiky.

ZDROJE

- [1] VOBOŘIL, David. Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR. Online. O Energetice. 2015. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni>. [cit. 2023-12-28].
- [2] CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-861-6719-4.
- [3] RYCHETNÍK, Václav; PAVELKA, Jiří a JANOUŠEK, Josef. Větrné motory a elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [4] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [5] DOHNAL, Radomír. Americký středozápad jako epicentrum větrné energetiky. Online. Ekologické Bydlení. 2013. Dostupné z: <https://www.ekobydleni.eu/energie/americky-stredozapad-jako-epicentrum-oze>. [cit. 2024-01-07].
- [6] Poul La Cour Museet. Online. C2024. Dostupné z: <https://www.poullacour.dk>. [cit. 2024-01-07].
- [7] Energetika zblízka. Online. ČEZ. Svět Energie – Vzdělávací portál ČEZ. C2020. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka>. [cit. 2024-05-18].
- [8] Wind energy in Europe 2020. Online. Wind Europe. 2020. Dostupné z: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2020-statistics-and-the-outlook-for-2021-2025/>. [cit. 2024-05-18].
- [9] Větrné elektrárny ve světě. Online. Česká společnost pro větrnou energii. C2021. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/clanky/vetrne-elektrarny-ve-svete/283>. [cit. 2024-01-08].

- [10] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. Online. Odborné časopisy. 2005. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>. [cit. 2024-01-08].
- [11] Větrné elektrárny v ČR – Aktuální instalace. Online. Česká společnost pro větrnou energii. 2024. Dostupné z: <https://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>. [cit. 2024-05-18].
- [12] Potenciál větrné energie v ČR. Online. Fakta o klimatu. C2024. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/potencial-vetrne-energie-cr>. [cit. 2024-05-18].
- [13] Hellfirez. Online. Internet Archive – Wayback Machine. 2000. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20180613122817/http://www.hellfirez.de/web/referate/inhalte/Physik_Energie.htm. [cit. 2024-05-18].
- [14] Seznam Zprávy. Online. MAREK, Jan. Roztočila se největší větrná turbína na světě. Energií uživí celé město. 2023. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/>. [cit. 2024-02-11].
- [15] Česká společnost pro větrnou energii. Online. Větrné elektrárny v ČR – Statistika. C2023. Dostupné z: <https://www.csve.cz/>. [cit. 2024-02-11].
- [16] Větrná energie. Online. Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR. C2024. Dostupné z: <https://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty/vetrna-energie/>. [cit. 2024-05-18].
- [17] Ochrana území. Online. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR. C2024. Dostupné z: <https://www.nature.cz/ochrana-uzemi>. [cit. 2024-05-18].
- [18] KAŠINSKÝ, Jan. Zemský ráj to na pohled II. Online. OSEL – Objective Source of E-Learning. 2017. Dostupné z: https://www.osel.cz/9280-zemsky-raj-to-na-pohled-ii.html?typ=odpoved&id_prispevku=151857. [cit. 2024-05-18].

- [19] KRÝŽOVÁ, Sofie. Kvůli zeleným zdrojům už není třeba měnit územní plán. Jsou ve veřejném zájmu. Online. Seznam Zprávy. 2023. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-firmy-kvuli-zelenym-zdrojum-uz-neni-treba-menit-uzemni-plan-jsou-ve-verejnem-zajmu-225017>. [cit. 2024-05-18].
- [20] Větrné podmínky ve výšce 10 m, podmínky pro malé větrné elektrárny. Online. Ústav fyziky atmosféry Akademie věd ČR. 2024. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>. [cit. 2024-05-18].
- [21] JAKOBSEN, Erlend Gjelstad a IRONSIDE, Nikolas. Oceans unlocked - a floating wind turbine. Online. COWI. 2021. Dostupné z: <https://www.cowi.com/insights/oceans-unlocked-a-floating-wind-future>. [cit. 2024-05-18].
- [22] Global Offshore Renewable Map. Online. Dostupné z: <https://map.4coffshore.com/offshorewind/>. [cit. 2024-05-18].
- [23] Odhad Zdarma. Online. Dostupné z: <https://www.odhad-zdarma.cz/>. [cit. 2024-05-18].
- [24] 22-AXEKVCEY 1x70/16 Energetický kabel se zvýšenou odolností s dvojitým pláštěm. Online. Elektro Viola. C2024. Dostupné z: <https://viola.cz/produkt/178539-22-axekvcey-1x70-16-energeticky-kabel-se-zvysenou-odolnosti-s-dvojitym-plastem>. [cit. 2024-05-18].
- [25] Výkopové práce – ceník. Online. Ceník Řemesel. 2024. Dostupné z: <https://www.cenikremesel.cz/vykopove-prace-cenik/>. [cit. 2024-05-18].
- [26] Příjezdová cesta. Online. Ing. Jan Špás | Projekty-RD.cz. 2023. Dostupné z: <https://projekty-rd.cz/prijezdova-cesta-2/>. [cit. 2024-05-18].
- [27] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny VII. – Jak se staví větrná elektrárna. Online. TZBinfo. 2016. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/14893-jak-se-stavi-vetrna-elektrarna>. [cit. 2024-05-18].

- [28] Beton cena. Online. CEMEX CZ. C2024. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/beton-cena>. [cit. 2024-05-18].
- [29] Tyč betonářská ocelová průměr 8 mm délka 6 m. Online. Stavebniny DEK. C2024. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/4400992001-tyc-betonarska-8-6m-delka>. [cit. 2024-05-18].
- [30] Vestas V90/2000. Online. Wind-turbine.com Global Marketplace. Dostupné z: https://wind-turbine.com/windkraftanlagen/70151/vestas-v90-2000.html?utm_source=wind-turbine-models&utm_medium=cpc&utm_campaign=offers. [cit. 2024-05-18].
- [31] Vláda schválila postup pro tzv. akcelerační zóny obnovitelných zdrojů energie. Online. O Energetice. 2024. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/rychle-zpravy/vlada-schvalila-postup-pro-tzv-akceleracni-zony-obnovitelnych-zdroju-energie>. [cit. 2024-05-18].
- [32] SEZNAM.CZ. Mapy.cz. Online. Dostupné z: <https://mapy.cz/>. [cit. 2024-05-19].
- [33] Vestas V90/2000. Online. The Wind Power. C2005-2024. Dostupné z: https://www.thewindpower.net/turbine_en_32_vestas_v90-2000.php. [cit. 2024-05-19].
- [34] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ VĚSTNÍK 5/2023. Online. Energetický Regulační Úřad. C2024. Dostupné z: <https://eru.gov.cz/energeticky-regulacni-vestnik-52023>. [cit. 2024-05-19].