

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2019

**JAN
STŘELEČEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Střeleček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **464540**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh větrné elektrárny pro zadanou lokalitu

Název bakalářské práce anglicky:

Design of wind power plant for the specified location

Pokyny pro vypracování:

Pro vybranou lokalitu navrhnete větrnou elektrárnu alespoň ne dvou výkonových variantách a vyhodnotte její energetický a ekonomický potenciál.

Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši problematiky návrhu a provozu větrných elektráren.
- 2) Analýzu povětrnostních podmínek vybrané lokality.
- 3) Variantní návrh větrné elektrárny a vyhodnocení roční výroby.
- 4) Ekonomické posouzení navržených variant.

Seznam doporučené literatury:

Cetkovský, S a kol.: Větrná energie v ČR, ÚGN 2010

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc., ústav energetiky FS

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

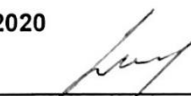
Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.06.2019**

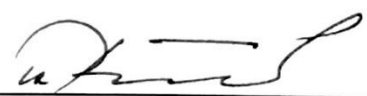
Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**



doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

23. 4. 2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

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 3.6.2019

.....
Jan Střeleček

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce, panu Doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc., za jeho čas, který mi byl ochoten věnovat, odborné vedení, věcné připomínky a rady. Dále bych chtěl panu Doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. společně s Ústavem energetiky Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze poděkovat za poskytnutí modelových dat potřebných k uskutečnění mé práce.

Anotační list

Jméno autora:	Jan Střeleček
Název BP:	Návrh větrné elektrárny pro zadanou lokalitu
Anglický název:	Design of wind power plant for the specified location
Akademický rok:	2018/2019
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 84 Počet obrázků: 9 Počet tabulek: 20 Počet příloha: 17
Klíčová slova:	Větrná elektrárna, větrná energie, vítr, návrh, Krušné hory, Vestas, V90, Enercon, E-101, vyrobená energie, ekonomická kritéria
Keywords:	Wind turbine, wind energy, wind, design, Krušné hory, Vestas, V90, Enercon, E-101, made energy, economic criteria
Anotace:	Práce se zabývá procesem návrhu větrné elektrárny. Ten obnáší volbu lokality umístění větrné elektrárny, stanovení povětrnostních podmínek zvolené lokality, dále výběr vhodných variant větrných elektráren a jejich porovnání na základě ekonomického zhodnocení.
Abstract:	This work deals with process of designing a wind turbine. It amount choise of wind turbine placement, provide of wind conditions for chosen locality, the next step is choise of appropriate variante of wind turbines and the comparison of them by economic criteria.

Obsah

Seznam použitých zkratk a jednotek.....	10
Úvod	12
1. Vítr a jeho nejistoty	13
1.1. Vznik větru.....	13
1.2. Dopad struktury krajiny.....	13
1.3. Ovlivnění rychlosti větru vertikálními změnami.....	15
1.4. Efekt překážek na proudění vzduchu	16
2. Měření hodnot větru.....	16
3. Charakterizování větrné situace.....	17
4. Energie, výkon a hustota větru	19
5. Roční a denní proměnlivost rychlosti větru	22
6. Větrný potenciál.....	22
6.1. Klimatologický (teoretický) potenciál větrné energie	23
6.2. Technický potenciál větrné energie	24
6.3. Realizovatelný potenciál větrné energie.....	24
6.4. Větrný potenciál České republiky.....	24
7. Větrné elektrárny	26
7.1. Aerodynamický princip.....	26
7.2. Osa otáčení rotoru	26
7.3. Generátory větrných elektráren	27
7.3.1. Synchronní generátory.....	27
7.3.2. Asynchronní generátory.....	27
7.4. Účinnost	27
7.5. Natáčení větrných elektráren.....	28
7.6. Výkon.....	29
7.7. Využití výkonu	30
8. Výběr lokality pro větrnou elektrárnu a povětrnostní situace zvolené lokality.....	31
8.1. Volba oblasti umístění.....	31
8.2. Lokalita stavby.....	32
8.3. Povětrnostní podmínky zvolené lokality	34
8.4. Energie větru	36
9. Volba větrných elektráren.....	38
9.1. Vestas V90.....	39
9.2. Enercon E-101	41

10.	Vyrobená energie za dobu jednoho roku.....	42
10.1.	Vestas V90.....	43
10.2.	Enercon E-101	44
10.3.	Využití výkonu větrné elektrárny	45
11.	Náklady na realizaci větrné elektrárny.....	46
12.	Financování	48
13.	Provoz a údržba.....	48
14.	Roční výnosy.....	49
14.1.	Výkupní cena	49
14.2.	Zelený bonus	50
14.3.	Zvolená forma podpory.....	51
14.4.	Čistý roční zisk	51
15.	Ekonomické zhodnocení	52
15.1.	Doba návratnosti.....	52
15.1.1.	Prostá doba návratnosti	52
15.1.2.	Reálná doba návratnosti	53
15.2.	Čistá současná hodnota	54
15.3.	Vnitřní výnosové procento	55
16.	Citlivostní analýza.....	56
17.	Závěr.....	58
	Použité zdroje.....	60
	Seznam obrázků	65
	Seznam tabulek	66
	Seznam grafů.....	67
	Seznam příloh.....	68

Seznam použitých zkratek a jednotek

§ - dolar, jednotka měny

AV – Akademie věd

cca – cirka, přibližně, zhruba

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

ČR – Česká republika

ČVUT – České vysoké učení technické

DPH – daň z přidané hodnoty

ERÚ – Energetický regulační úřad

h – hodina, jednotka času

CHKO – Chráněná krajinná oblast

J – joule, jednotka práce a energie

$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ – joule na kilogram kelvin, jednotka měrné tepelné kapacity

$J \cdot m^2$ – joule na metr krychlový, jednotka energie na jednotku plochy

K – kelvin, jednotka termodynamické teploty

Kč – koruna česká, jednotka měny

kg – kilogram, jednotka hmotnosti

$kg \cdot m^{-3}$ – kilogram na metr krychlový, jednotka hustoty

km – kilometr, jednotka délky

km^2 – kilometr čtverečný, jednotka plochy

m – metr, jednotka délky

m n.m. – metry nad mořem, jednotka výškové vzdálenosti od hladiny moře

$m \cdot s^{-1}$ – metr za sekundu, jednotka rychlosti

m^2 – metr čtverečný, jednotka plochy

m^3 – metr krychlový, jednotka objemu

např. – například

NP – Národní park

Pa – pascal, jednotka tlaku

s – sekunda, jednotka času

SW – software

tzn. – to znamená

tzv. – takzvaně

VtE – větrná elektrárna

W – watt, jednotka výkonu

Wh – watthodina, jednotka energie

Wh·m² – watthodina na metr krychlový, jednotka energie na jednotku plochy

Úvod

Elektrická energie je nedílnou součástí lidského života a nároky na její množství, které lidé spotřebují, se neustále zvyšují. Zároveň se však čím dál více bojuje za snižování emisí oxidu uhličitého, což je vzhledem k faktu, kdy v ČR jsou hlavním zdrojem elektřiny uhelné elektrárny, nelehký úkol. Problém s těmito emisemi řeší např. jaderné elektrárny, které jsou druhým největším českým zdrojem elektřiny, ale díky jejich haváriím, jež se v minulosti po světě odehrály, jsou často lidmi označovány za bezpečnostní hrozbu a kupříkladu v sousedním Německu se již počítá s jejich postupným odstavením a nahrazením obnovitelnými zdroji, které při výrobě elektřiny rovněž žádné emise oxidu uhličitého nevypouštějí. Mezi obnovitelné zdroje se řadí vodní, sluneční či větrná energie. A právě větrnou energii, potažmo návrhem VtE v ČR a jejím ekonomickým zhodnocením, se tato práce zabývá.

1. Vítr a jeho nejistoty

Jedním ze základních a nejvýznamnějších aspektů pro určení ekonomicky přínosného a smysluplného využití energie větru je znalost větrných kritérií dané oblasti, kterým je v první řadě rychlost větru. Ta je alfa a omegou celého návrhu VtE. Na Evropském kontinentu panují nejpříznivější rychlosti proudění vzduchu zpravidla ve státech, které se částí svého území dotýkají moře, tzv. státy přímořské. V případě ČR, která žádná pobřeží nemá, jedná se tedy o tzv. vnitrozemský stát, je zapotřebí, aby byl kladen důraz na věnování se v rámci republiky studiu větru a na základě zjištěných informací, byly pečlivě vybírány nejpříznivější polohy umístění [1]. Ty však v ČR dle [1] byly již ústavem AV zkoumány a pomocí zjištěných hodnot byla po vyřazení CHKO a NP stanovena plocha 885 km², která by byla pro stavbu VtE žádoucí. Z celkové plochy ČR se jedná o cca 1,12 % území.

1.1. Vznik větru

Planetu Zemi obklopuje atmosféra neboli plynný obal, a ta vyvolává díky působení svých sil na povrchu atmosférický tlak. Ten je fakticky definován jako kolmá síla k jakémukoli jednotkové ploše [2]. Díky slunci, které svoji vyzářenou energií zahřívá vzduch a zemský povrch, dochází k ovlivňování velikosti atmosférického tlaku. A protože zahřívání pro celý povrch není jednotné, záleží na typu terénu či jeho zbarvení, vznikají místa s odlišnými hodnotami tlaku [3].

Vzduch, kterému je zvyšována teplota, svůj tlak snižuje a obráceně, vzduch, který je ochlazován, svůj tlak zvyšuje [3]. Odlišné tlaky vzduchu jsou pro vznik větru zcela nezbytné. Je totiž utvářen přesunem vzduchu z oblastí s tlakem vyšším do oblastí s tlakem nižším. Následná rychlost proudění je odvislá od velikosti rozdílů tlaků mezi těmito místy [4].

Nesmí se zapomenout, že zeměkoule se kolem své osy také otáčí, což do pohybu vzduchu přivádí ještě Coriolisovu sílu. Ta utváří na každé polokouli několik obrovských cirkulačních buněk a přímo na rovníku se rozprostírá pásma bezvětří. Jednotlivé buňky nesou názvy – Hadleyova buňka, Ferrellova buňka, Polární buňka [4], [3], [5].

1.2. Dopad struktury krajiny

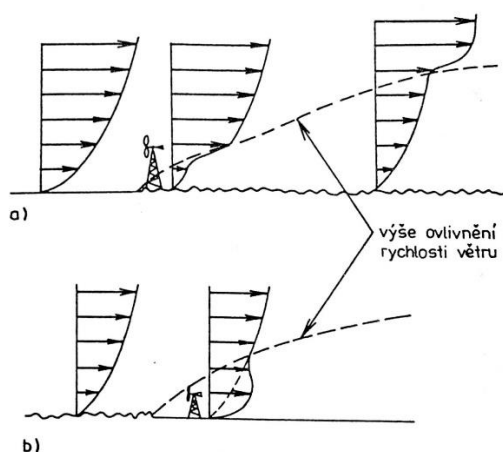
Dalším podstatným bodem, který mění rychlost proudění vzduchu a který má při návrhu VtE značný význam, je třecí síla. Tu vyvolává struktura krajiny spolu se zábranami, ať už přírodními nebo umělými, které na ní jsou umístěny. Způsob ovlivnění větru je následovný. Rychlost proudění se snižuje v závislosti na nárůstu drsnosti terénu, neboť ta řídí výkyv proudu vzduchu od izobarických cest. Toto ovlivnění není ovšem platné v celé mocnosti atmosféry,

nýbrž pouze v části zvané mezní vrstva, která je od povrchu až do výšky 0,5 nebo 2 km [6]. Podle [7] můžeme třecí účinek v mezní vrstvě u terénů s nízkou hodnotou drsnosti pozorovat asi do vzdálenosti 300 m od povrchu a u terénů, které se vyznačují vysokou hodnotou drsnosti, se může jednat až o vzdálenost okolo 600 m. Povrchovou drsnost lze číselně formulovat jako tzv. exponent drsnosti n [6], [4].

Třída povrchu		n
1	Uhlazený povrch – hladina vody, písek	0,14
2	Louka s nízkými travinami či oranice	0,16
3	Značně vzrostlá tráva, nízké obiloviny	0,18
4	Nízké lesy, porosty vysokých kulturních plodin	0,21
5	Husté rozsáhlé lesy	0,28
6	Malá města, vesnice	0,48

Tab. 1 - Závislost exponentu drsnosti n na třídě povrchu [4]

Při návrhu VtE v ČR je třeba dávat pozor na hojné změny drsností území. Neboť chybné určení dopadu přechodu mezi drsnostmi může mít neblahý vliv na výrobní schopnosti větrné turbíny, a tedy její potenciální zisk. Konkrétně je třeba hlídat změny drsností v linii proudění vzduchu. V tomto případě totiž dochází např. při změně z jemné struktury na hrubou ke skokovému snížení rychlosti větru pod tzv. přechodovou výškou a nad ní k nárůstu rychlosti. Pokud nastane situace, kdy dojde ke změně drsností v opačné pořadí, tudíž z hrubé drsnosti na jemnou, dostaví se reakce v podobě navýšení rychlosti pod tzv. přechodovou výškou a rychlostní profil začne vzdáleně připomínat svislou „stěnu“ [4].



Obr. 1 - Vliv změn drsnosti povrchu na rychlostní profil: a) změna povrchu z jemné struktury na hrubou b) změna povrchu z hrubé struktury na jemnou [4]

1.3. Ovlivnění rychlosti větru vertikálními změnami

Vzhledem k závislosti rychlosti proudění vzduchu na výšce od povrchu se zavádí pojem rychlostní profil. S ním je úzce spjat i tzv. nulový bod rychlostního profilu, který ne vždy náleží výšce 0 m, tzn. povrchu. Pokud se bude jednat o krajinu se zvýšeným parametrem drsnosti v důsledku rozlohou významné flóry, kterou může být kupříkladu les, přechází nulový bod do tří čtvrtin vzrůstu tohoto přírodního porostu [7]. Mezi porosty, kde se tato korekce nulového bodu nevyžaduje, lze zařadit např. pole s obilovinami [4].

Dle vztahu pro rovinný povrch, který ve své publikaci uvádí [4], je možno z jednoho známého dlouhodobého průměru rychlosti v určité výšce dopočítat informativní průměrnou rychlost pro výšku druhou odlišnou, ve které by případně mohl být umístěn střed rotoru turbíny:

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

v^*	.....	průměrná rychlost větru v zamýšlené výšce h [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_0^*	.....	průměrná rychlost větru v referenční výšce h_0 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
h	.....	zamýšlená výška nad povrchem [m]
h_0	.....	referenční výška nad povrchem [m]
n	.....	exponent drsnosti povrchu [-]

Díky umístění ČR do středu Evropy, tedy odříznutí od moří a mořských pobřeží, a dále obklopení prakticky celého území pohořími, se většina povrchu republiky stává pro VtE nevhodnou. Potenciál pro využití větru se skrývá téměř výhradně v lokacích, které jsou v patřičné nadmořské výšce, jelikož v závislosti na jejím nárůstu se zvyšuje rychlost proudění vzduchu [4].

Postavení VtE na vyvýšených místech s sebou přináší i další značný prospěch, za který je např. považován přechod proudu vzduchu přes hřebeny hor neboli protáhlé horské vrcholy, kdy u proudových čar dochází k jejich přibližování, a tudíž zde lze očekávat nárůst větrné rychlosti [1]. Podle míry nárůstu jsou primárně rozlišovány tři způsoby přechodu větru přes tyto vrcholy. Proudění přes kolmou či šikmou osu hřebene nebo rovnoběžné s osou hřebenu. U vrcholu kolmého ke směru větru nastává největší urychlení, tudíž je nejvíce žádoucí. Šikmý vrchol dosahuje o něco nižšího zrychlení větru oproti kolmému, stále to však je nezanedbatelný přírůstek. Nejmenší navýšení rychlosti je možno očekávat u vrcholů s natočením ve shodném směru jako je směr větru [4].

U kolmého hřebene se dále lze setkat s oblým tvarem připomínajícím podkovu. Zde záleží na orientaci vyduté strany. Směřuje-li proti směru proudění vzduchu, lze předpokládat

významné navýšení rychlosti. V opačné případě, kdy vydutá část směřuje ve směru proudění, dochází k obtékání hřebene přes jeho úbočí a zintenzivnění rychlosti se stává zanedbatelným [6].

Mezi další pozitiva umístění VtE na vyvýšených místech, které jsou nejméně 150 m vysoké, se dle [4] řadí schopnost vyrábět elektrickou energii i během nočních nebo ranních hodin. Po setmění se teplota vzduchu snižuje, tudíž v důsledku nárůstu jeho hustoty padá dolů a kupí se v údolí. Proud větru ve vyšších oblastech se této mase studeného vzduchu následně vyhýbá a v údolí vzniká stav zvaný jako ranní bezvětří [4].

1.4. Efekt překážek na proudění vzduchu

Existují dvě elementární klasifikace proudění, jsou jimi: laminární a turbulentní proudění. Během laminárního proudění se proudnice vzduchu vzájemně neprotínají, nevznikají víry. S rostoucí vzdáleností od povrchu rychlost proudění stoupá. Naproti tomu u turbulentního proudění se proudnice vzájemně protínají a utvářejí víry. Částice vzduchu mají nevyrovnané rychlosti. Je vytvářeno díky různým přírodním či člověkem vybudovaným překážkami [7], [6].

Při střetu větru s bariérou dochází k jejímu obtékání, přetékání a podle pórovitosti i k částečnému prostupu skrz. Pro VtE v ČR budou onou bariérou, která bude z největší části tvořit zábranu proudění větru, jednotlivé stromy nebo celé lesní vegetace [6].

Již před zátarasem lze pozorovat drobnou turbulentní oblast, a to ve vzdálenosti asi dvou výšek bariéry [1]. Za ním oblast s víry zasahuje asi do pěti výšek. V obou případech dochází k poklesu rychlosti větru. Podle [8] zasahuje snížení rychlosti v zóně za zátarasem, tzn. v závětrí, až do dvacetinásobku výšky onoho zátarasu a rychlost větru se i v této vzdálenosti pohybuje teprve okolo 80 % původního nedotčeného rychlostního profilu. V silně zalesněné krajině je třeba ovšem kalkulovat ještě s výrazně navýšenou vírovostí proudu vzduchu. Při návrhu VtE je doporučováno se tomuto turbulentnímu proudění pokud možno vyhnout, jelikož by mohlo docházet k přílišnému zatěžování turbíny či jejímu následnému poškození [8].

2. Měření hodnot větru

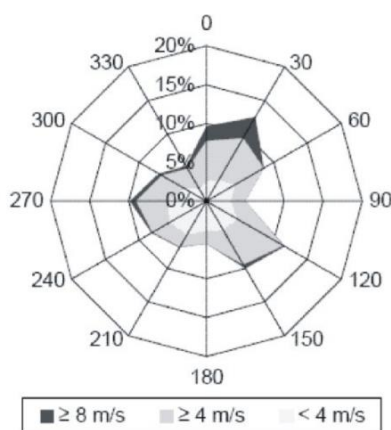
Kvůli nejpřesnějším hodnotám větrných trendů by bylo žádoucí provést měření rychlosti a směru větru přímo pro konkrétní území. To se realizuje pomocí tzv. stožárového měření. Nicméně to je při počátečním mapování vhodnosti lokality značně nákladné. Tudíž se používá matematické modelování větrné situace na základě sítě okolních měřících stanic, které má v ČR pod svojí záštitou ČHMU a předpokládaných povrchových vlivů na proudění [9].

Stanice v dnešních dnech z největší části zaznamenávají parametry větru automaticky, a to zpravidla pomocí miskových anemometrů, určených k měření rychlosti větru, a větrných směrovek, měřících směr větru [4]. Vzorkovací interval, jak se nazývá časový rozestup mezi jednotlivými záznamy, se zásluhou automatizace snížil, a to u nejpoužívanějších bodových měřících přístrojů na jednotky až zlomky vteřin. V praxi se z takto naměřených dat uchovává pouze jejich průměrná hodnota s krokem 5, 10 nebo 60 minut [9].

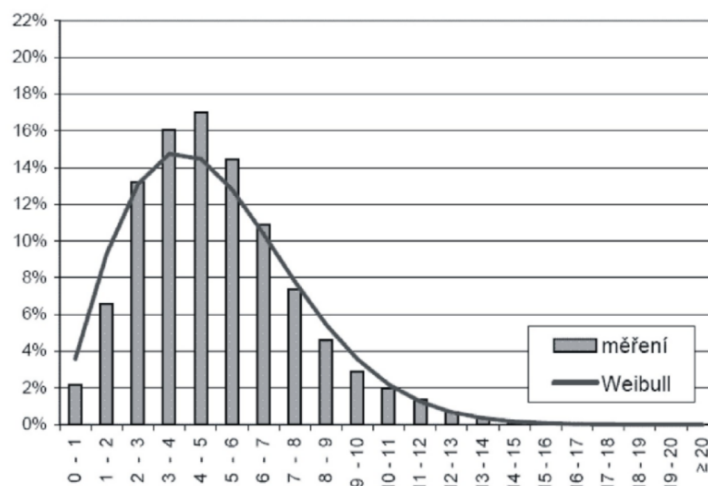
3. Charakterizování větrné situace

Rychlost a směr větru jsou velice proměnlivé údaje, které se mohou měnit v průběhu velmi krátkého časového úseku. Proto je pro stanovení větrných poměrů, jak bylo nastíněno v přechozí kapitole, nutné vycházet alespoň z průměrných hodnot stanovovaných po hodinových intervalech [9].

Záznam o směru větru se nejčastěji vynáší do tzv. větrné růžice. Jedná se o graf, který je rozdělen na jednotlivé dílky s určitým intervalem stupňů. U obr. 2 lze kupříkladu pozorovat rozdělení dle 30°. Do grafu se následně zakreslují dílčí směry větru dle jejich četnosti. Pokud se větrná růžice do některého z úhlů natahuje znatelně více než do ostatních, je tento směr označen za převládající směr větru [10].



Obr. 2 - Větrná růžice [9]



Obr. 3 - Četnost rychlostí větru [9]

Z průměrných hodnot po hodinových intervalech lze následně vypracovat četnost rychlostí větru, viz obr. 3. Na vodorovné ose jsou znázorněny hodnoty rychlostí a na ose svislé jejich procenta zastoupení z celkového množství dat. Tento sloupcový graf je ovšem možné při znalosti pouze průměrné rychlosti za delší časový úsek, např. rok, nahradit distribuční funkcí rychlosti větru. Konkrétně je využíváno tzv. Weibullovo rozdělení, které je definováno [4]:

$$f(x) = \frac{b \cdot x^{b-1}}{a^b} \cdot e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (3.1)$$

- x rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
- a součinitel a [-]
- b součinitel b [-]
- e Eulerovo číslo [-]

Oba součinitelé a i b jsou kladné. Součinitel a je vázán na průměrnou rychlost větru, nicméně jeho hodnota, která značí umístění maxima funkce, je vyšší než zmiňovaného průměru [11]. Zhruba lze dle [4] součinitel popsat vztahem:

$$a = \frac{v^*}{0,88} \quad (3.2)$$

- v^* průměrná rychlost větru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
- a součinitel a [-]

Součinitel b stanovuje tvar rozdělení. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 1,5 až 3 a je odvozována podle různých distribučních funkcí větru [4].

Na základě znalosti startovací rychlosti V_{tE} , kdy generátor začíná vyrábět elektrickou energii a hraniční rychlosti, která už pro generátor není vhodná, lze křivku zredukovat do podoby, kdy dovoluje určit celkovou energii protékající monitorovanou plochou. Tato energie závisí zvláště na součiniteli b , kdy při jeho zvětšování dochází k zúžení diagramu, a tím se bude kvantum protékající energie zmenšovat. Pro případ poklesu hodnoty součinitele b bude pro energii platit opak [1].

4. Energie, výkon a hustota větru

Definice energie se formuluje jako dovednost hmoty vykonávat práci. Velice důležité je také neopomenout první termodynamický zákon tzv. zákon zachování energie. I když je v běžné mluvě či písemné formě rozšířené slovní spojení „výroba energie“, není to pravdivý výrok. Zmíněný první termodynamický zákon říká, že energii nelze vyprodukovat z ničeho. Nedá se tedy vytvořit nebo zničit, ale pouze jí je možné transformovat na jiný typ energie [12]. V případě větrné energie se jedná o přetvoření kinetické energie větru na energii elektrickou.

Obecným vzorec pro kinetickou energii lze dle [13] stanovit energii obsaženou v proudícím vzduchu:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4.1)$$

E kinetická energie větru [J]
 m hmotnost proudícího vzduchu [kg]
 v rychlost proudícího vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Hmotnost sledovaného proudícího vzduchu je možné dále popsat vzorcem [13], [4]:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (4.2)$$

m hmotnost proudícího vzduchu [kg]
 ρ hustota proudícího vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 V objem proudícího vzduchu [m^3]
 A plocha, kterou vzduch proudí [m^2]
 s vzdálenost, kterou proudící vzduch urazí [m]

V rámci V_{tE} je za plochu A považována kruhová plocha vymezená průměrem rotoru, ale je možné od této kruhové plochy ještě odečíst střed rotoru, tzv. náboj, na který jsou lopatky upevněny. Vzniká tedy plocha o tvaru mezikružní [7].

Hustota vzduchu je proměnlivá hodnota, která je závislá na teplotě a tlaku, jenž podléhá nadmořské výšce, kdy s její rostoucí hodnotou tlak klesá. V dané nadmořské výšce se tlak dále mění podle ročních období. Zjednodušeně lze říct, že hustota vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou klesá, tudíž klesá výkon VtE . Orientačně se dá tento klesající trend odhadnout na základě tab. 2 [6]. Pokud bude vyžadována přesná hodnota výkonu VtE , bude potřeba počítat s hustotou vzduchu pro danou nadmořskou výšku, kterou lze určit vzorcem [4]:

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot T} \quad (4.3)$$

- ρ hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 p_b barometrický tlak v dané nadmořské výšce [Pa]
 r plynová konstanta [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], pro vzduch cca $287 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 T termodynamická teplota vzduchu [K]

Nadmořská výška (m)	0	300	400	500	600	700	800	900	1000
Výkon v %	100	97	96	95	94	93	93	92	91

Tab. 2 - Ztráta výkonu v závislosti na rostoucí nadmořské výšce [6]

Po vepsání obou vztahů 4.1 a 4.2 do vzorce pro výpočet teoretického výkonu větru bude platit následující [7], [8]:

$$P_t = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{s}{t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4.4)$$

- P_t teoretický výkon větru [W]
 E kinetická energie větru [J]
 t čas [s]
 ρ hustota proudícího vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 A plocha, kterou vzduch proudí [m^2]
 s vzdálenost, kterou proudící vzduch urazí [m]
 v rychlost proudícího vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Pokud bude uvažována pouze jednotková plocha a za s/t bude vyjádřena rychlost v , lze vztah pro výpočet teoretického výkonu větru formulovat [4]:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4.5)$$

- P_t teoretický výkon větru na jednotkové ploše [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
 ρ hustota proudícího vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 v rychlost proudícího vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Jak si lze dle vzorce 4.5 všimnout, rychlost větru je u výpočtu teoretického výkonu větru umocněna na třetí. Výsledná hodnota výkonu je tedy silně závislá na velikosti rychlosti, a proto je žádoucí, mít snahu dosazovat průměrné hodnoty větru za co nejkratší časový interval. Na základě těchto skutečností je doporučováno vycházet alespoň z průměrné rychlosti za interval jedné hodiny, jak již bylo několikrát řečeno. Vcelku opačná situace panuje u hustoty vzduchu, resp. u tlaku a teploty, na nichž je hustota závislá. Tyto veličiny jsou méně nestálé než rychlost větru, a jelikož hustota ve vztahu 4.5 není umocněna, dochází při její drobné změně ke skoro bezvýznamnému ovlivnění výsledného výkonu větru, a tak jsou hodnoty tlaku i teploty často považovány v daném časovém intervalu za konstantní [8].

Při zpracování dat za několik časových úseků je možno vycházet z drobně upraveného vztahu pro výpočet energie větru [4]:

$$E_v = \sum_0^i E_i = \frac{1}{2} \sum_0^i \rho_i \cdot v_i^3 \cdot \Delta t \quad (4.6)$$

či při domnělé konstantní hodnotě hustoty vzduchu:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \sum_0^i v_i^3 \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

- E_v výsledná celková energie větru [J]
 E_i energie větru za daný časový interval [J]
 ρ_i hustota proudícího vzduchu za daný časový interval [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 ρ neměnná hustota proudícího vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 v_i průměrná rychlost proudícího vzduchu za daný časový interval [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 Δt časový interval mezi jednotlivými měřeními [s]

5. Roční a denní proměnlivost rychlosti větru

Během roku i samotného dne dochází k charakteristicky opakujícím se změnám rychlostí větru. V mírném podnebném pásu jsou pro měsíce s vyšší teplotou vzduchu příznačné menší rychlosti větru než během studenějších měsíců, kdy rychlost větru roste. Tento popis je typický i pro ČR, ve které lze dále pozorovat zvyšování rychlosti proudění od jižních hranic republiky směr k severním. Tato tendence platí u teplých i chladných měsíců [6]. Existuje tvrzení, které snižující se rychlost větru na jihu Čech připisuje na vrub alpskému masivu [14]. Z těchto poznatků se nicméně dá odhadovat, že stavba VtE by měla být výnosnější v rámci severní části českého území.

Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly, rychlost větru se cyklicky mění i během dne, a to na základě vertikálního profilu teploty, který udává intenzitu vertikální turbulentní výměny. V zásadě lze podle výšky nad pevninou rozlišit dva případy denního chodu rychlosti větru. Pro nejspodnější část atmosféry tzv. přízemní vrstvu platí, že nejvyšších hodnot rychlostí větru je dosaženo během raného odpoledne a nejnižších během brzkého rána. Naproti tomu pro větší nadmořské výšky, jako jsou např. horské vrcholy, lze registrovat nejvyšší rychlosti v noci a nejnižší zhruba v půli dne [8].

6. Větrný potenciál

Větrný potenciál při návrhu VtE určuje, do jaké míry je vybraná oblast pro chystanou stavbu vyhovující. Základní hodnota, ze které potenciál při posuzování vychází, je hustota výkonu větru. A jak je známo z předchozího textu, rychlost větru se na výkonu díky umocnění na třetí podílí významnou měrou. Proto je zcela zásadní zajistit správné větrné údaje [9]. Od výkonu větru a následně kvality použité turbíny se odvíjí kvantum vyprodukované energie. Zde je to ovšem o něco složitější, neboť se sem promítá i vliv výkupní ceny za elektřinu z větrných zdrojů. Tyto okolnosti se dají obecně shrnout pod termín ekonomická vhodnost vkladu kapitálu, což je jeden ze dvou předpokladů pro uskutečnitelnost větrné turbíny. Druhým předpokladem je samotné schválení výstavby ve vybrané lokalitě, proti kterému může např. vyvstat odpor okolního obyvatelstva. Větrný potenciál zkrátka nezávisí pouze na zeměpisných či technologických okolnostech, ale je do jeho zhodnocení zapojena celá řada faktorů a nejčastěji je dělen do třech kategorií [10].

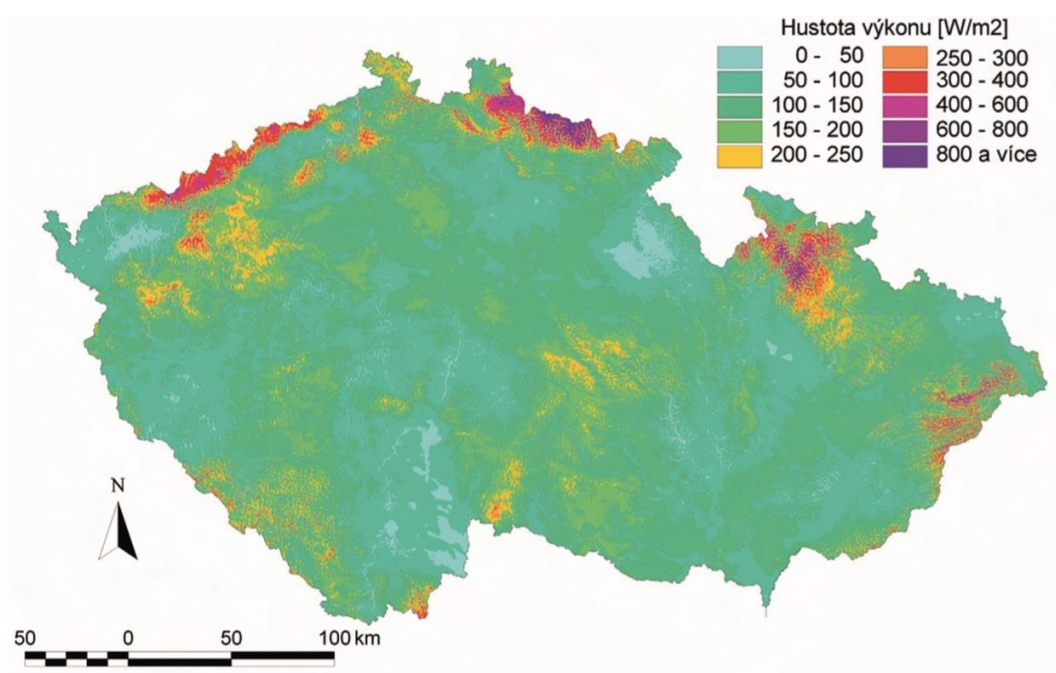
6.1. Klimatologický (teoretický) potenciál větrné energie

V prvním případě se jedná o zcela teoretické hodnocení, které je odvozeno buďto pomocí hustoty výkonu větru nebo zprůměrovaných rychlostí větru za jeden rok. V obou případech jde o spekulativní hodnoty, které jsou od těch reálných, díky vynechání skutečných technologických schopností nebo zákonných restrikcí, vzdáleny [9].

Hustota výkonu větru by se vzhledem k potřebám teoretického větrného potenciálu měla správně sdělovat aspoň pro výšku 30 až 40 m nad povrchem. Zde se pohybuje vrchní mez přízemní vrstvy a největší ovlivnění strukturou povrchu by mělo zanikat. Např. němečtí tvůrci Daniels, Kuntsch v roce 1994 určili jako limitní hodnotu hustoty výkonu $210 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [15].

Častější je ovšem použití jednoduššího parametru, a to průměrné rychlosti větru za jeden rok. Přesnost zpracování je ovšem snížena vynecháním závislosti větru na hustotě vzduchu. I zde existuje limitní hodnota a pro ČR se jedná o rychlost rovnou cca $5,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [15].

Zpracované závěry o vhodnosti území pro realizaci VtE by se měly pravidelně obohacovat o nová současná ekonomická kritéria, která se mění dle rozvoje větrných turbín nebo cen výkupu vyprodukované elektrické energie [15].



Obr. 4 - Hustota výkonu větru v ČR ve výšce 40 m [14]

6.2. Technický potenciál větrné energie

Způsob tohoto vyjádření potenciálu se odvíjí od maximálního možného využití výrobní kapacity VtE, a tedy její schopnosti nejvyšší možné produkce. Tento údaj je nicméně značně proměnný, tudíž určení správného technického potenciálu vyžaduje po čase aktualizaci, aby odpovídal moderním technickým schopnostem větrných turbín pro teoretický potenciál v době zpracování. Dále se zde bere zřetel na nesmlouvavé nároky spojené s budováním VtE a jejími dalšími provozními náklady. Konkrétně se může jednat o např. požadavky na připojení, emise hluku, omezení v podobě NP a CHKO nebo možnosti dopravního systému [14].

6.3. Realizovatelný potenciál větrné energie

Jedná se o potenciál, který se za aktuálních předpokladů prezentuje jako uskutečnitelný. Primárně vychází z teoretického potenciálu, ale jeho zpracování je obohaceno o nestálé faktory ekonomie, politiky a obecného mínění [10]. Také se zde silně promítá osobní pohled na problematiku konkrétního odborníka, který se určením reálného potenciálu zabýval [9].

6.4. Větrný potenciál České republiky

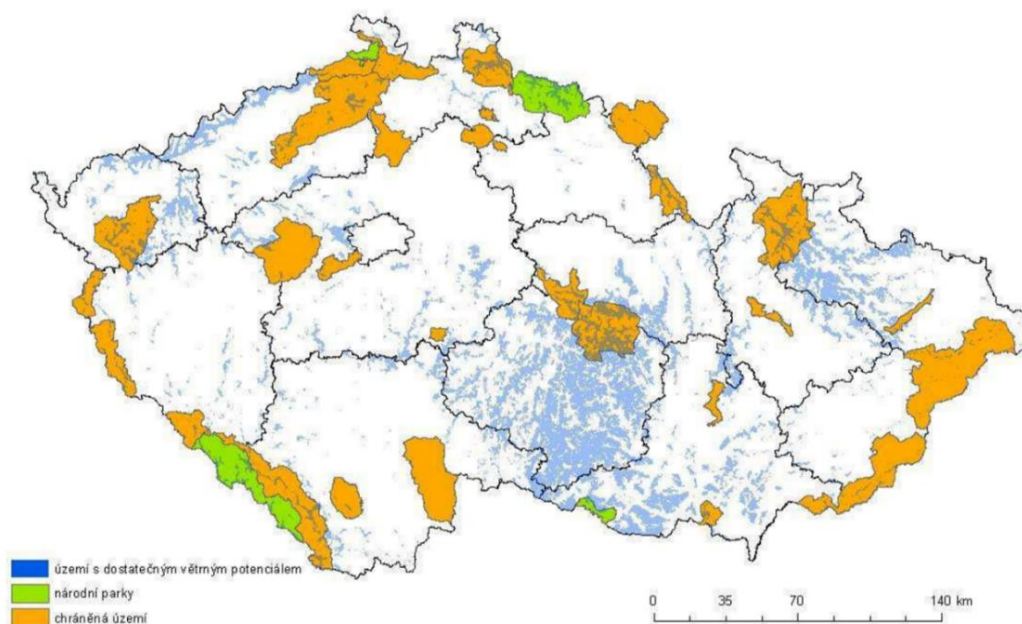
Ústav fyziky atmosféry AV ČR nechal v minulosti vypracovat zprávu o technickém a realizovatelném větrném potenciálu ČR. Jelikož se tato práce nezabývá otázkami ohledně větrné energie z pohledu politického či z pohledu životního prostředí, které jsou pro vyhodnocení realizovatelného potenciálu potřebné, bude kladen důraz na potenciál technický, který je ovlivněn pouze faktickými omezeními [16].

Výpočet technického potenciálu začal vyčleněním povrchu v rámci republiky, tak aby investice do VtE byla zhruba zisková. Výběr území byl následovný. Pro povrch, na kterém se neobjevují lesy a leží v rozmezí 450 až 600 m n. m., byla stanovena hranice průměrné rychlost větru $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ve výšce 100 m od povrchu. Toto rychlostní omezení ovšem nebylo jednotné. Podle nadmořské výšky, typu reliéfu či koncentrace překážek pro proud vzduchu se hranice rychlosti větru dále upravovala, jelikož bylo potřeba aspoň částečně zohlednit proměňující se výrobní schopnosti elektrárny v různých výškových nebo terénních podmínkách a s tím spojené i odlišné realizační náklady [10], [9].

Dalším krokem bylo vynechání území, na kterých není stavba VtE ze zákona umožňována. Jmenovitě se jedná o obydlené oblasti a jejich okolí, za které je považován prostor až do vzdálenosti 500 m od nich. Následují zvláště chráněná území jako např. NP nebo

CHKO, armádní území, okolí primárních letišť či ochranné zóny okolo elektrických přenosových soustav [10], [9].

Konečné rozmístění území s vyhovujícím větrným potenciálem pro vybudování VtE je znázorněno na obr. 5. Na něm lze vyzorovat, že nevhodnějšími větrnými podmínkami disponují kraje Jihomoravský, Ústecký, Moravskoslezský a Vysočina. Konkrétně se jedná o oblast Krušných hor, Nízkého Jeseníku či Českomoravské vrchoviny. Ačkoliv se český větrný potenciál nemůže ani zdaleka přiblížit územím sousedících s mořem nebo ojediněle obydlenými oblastmi, lze najít i výhody spojené s rázem reliéfu ČR či vyšší hustoty zalidnění ČR. Kupříkladu se jedná o šanci lépe zvládnout problém nestálého výkonu VtE, kdy ráz českého reliéfu přispívá k oboustrannému nahrazování výkonu jednotlivých elektráren z odlišných území republiky. Nebo lze zmínit redukci potřeby vytvoření drahého elektrického vedení, jelikož VtE se pohybují zpravidla v dosahu konzumentů elektrické energie, tudíž i rozvodné sítě pro připojení nejsou většinou tak vzdálené [9].



Obr. 5 - Oblasti s dostatečných větrným potenciálem a vyznačená chráněná území [10]

7. Větrné elektrárny

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3., energie nemůže být vytvořena z ničeho, ale lze ji pouze přetvořit na jiný typ. VtE tedy elektrickou energii nevyrábí, ale pouze na ní přeměňuje kinetická energie větru. Klasifikace VtE probíhá na základě několika rysů. Tím hlavním je princip aerodynamické funkce, osy otáčení, velikost výkonu a rychlostí součinitel. Dále se dělí podle typu generátoru, konstrukce, způsobu regulace či umístění [1], [17].

7.1. Aerodynamický princip

Podle aerodynamické funkce jsou turbíny děleny na odporové nebo vztakové. Odporové turbíny pracují na základě odlišných odporů lopatek turbíny vůči větru. Toho může být docíleno např. specifickým tvarem lopatek, který při rozličných směrech jejich pohybu vyvolává různorodé odpory. Tohoto provedení využívá kupříkladu miskový anemometr, jenž byl uveden v kapitole 4.1. Ten má jednu stranu vydutou a druhou vypouklou [17], [18]. Díky malé účinnosti, která se pohybuje kolem 15 až 23 %, se odporové větrné turbíny dnes již skoro nepoužívají [1].

Vztakové turbíny pro svoji funkci využívají tzv. aerodynamickou vztakovou sílu. Tato síla je při proudění vzduchu utvářena na lopatce rotoru, a to díky jejímu speciálnímu tvaru. Podobný tvar se vyskytuje např. i u křídel letadla [18]. Vztakové turbíny oproti odporovým dosahují až o desítky procent vyšší účinnosti, tudíž jsou mnohem vhodnější pro výrobu elektrické energie, a proto jsou v dnešní době nejpoužívanějším typem turbín [7].

7.2. Osa otáčení rotoru

Mezi větrnými motory jsou rozlišovány dva druhy osy otáčení: svislá a vodorovná osa. Svislá osa otáčení se vyznačuje svojí nezávislostí na směru větru [18]. Dále lze mezi její přednosti zařadit relativně snadnou údržbu, která je připisována na vrub možnosti umístění převodového ústrojí s generátorem na zem. Nicméně oproti vodorovné ose otáčení dosahuje menších hodnot účinnosti [17].

V případě vodorovné osy je nutné, aby lopatky rotoru stále směřovaly kolmo proti proudu vzduchu, je tedy nutné rotor podle aktuálního směru větru otáčet. To má u malých VtE na starosti směrová lopatka, u velkých VtE otáčení rotoru zajišťují servomotory společně se senzory větru. V současnosti jsou vodorovné osy nejvíce používané, a to hlavně z důvodu jejich vyšší účinnosti, kdy v porovnání s vertikální osou otáčení může rozdíl činit až 10 % [17].

7.3. Generátory větrných elektráren

Aby při rotaci hřídele umístěného uvnitř strojovny VtE, který je roztáčen pomocí lopatek, docházelo k té nejpodstatnější věci, kvůli které je celá VtE stavěna, tedy výrobě elektrické energie, musí být k hřídeli připevněn generátor. Ten se u větrných turbín zpravidla vyskytuje ve dvojí podobě: synchronní a asynchronní. Na základě způsobu dodávání vyrobené elektrické energie, tedy dodávání přímo spotřebitelům do jejich nezávislé lokální sítě nebo napojení na rozvodnou elektrickou síť, se vlastnosti těchto dvou typů generátoru dále mění [4]. V této práci lze nicméně z důvodu plánování VtE o vyšším výkonu možnost přímého dodávání elektrické energie pominout.

7.3.1. Synchronní generátory

Za hlavní znak při využití synchronních generátorů by se bezpochyby dalo považovat vypuštění převodovky, což vede k úbytku množství dílů, díky čemuž je celá VtE lehčí a zmenšuje se příležitost pro výskyt poruch. Dále bezpřevodkový provoz vede k redukci hluku a ztrát utvářených převodovkou. Synchronní generátor je tvořen statorem a rotorem o velkém množství pólových dvojic, které se při nárůstu rychlosti větru, tedy kroutícího momentu postupně zapínají a přidávají k již zapnutým [19]. Elektrickou energii produkuje v podobě střídavého proudu a napětí [4].

7.3.2. Asynchronní generátory

Díky snadnému zapojení do rozvodné sítě a jednoduché konstrukci, která zapříčiňuje levnější výrobu, a tedy nižší cenu, jsou tyto generátory značně oceňovány. Lze je také aplikovat jako motor při startu turbíny. Typickým rysem je využití převodovky, která zajišťuje optimální otáčky, jež musí být při využívání jako generátoru vyšší, než je uvedeno na jeho štítku. Jedná se tedy o tzv. nadsynchronní otáčky [4].

7.4. Účinnost

Rotory větrné turbíny nejsou v reálném světě schopny z větru stoprocentně získat jeho výkon. To je zapříčiněno zejména zákonem o zachování hmoty, jelikož stejný objem vzduchu, který na rotorové lopatky přistane, z nich musí také odejít [17]. Vítr za elektrárnou tedy bude mít stále určité zbytky svoji rychlosti, aby mohl pokračovat dál. Na základě matematických výpočtů lze určit teoreticky nejpříznivější situaci mezi rychlostmi větru před a za rotorem VtE. Betzův limit neboli Betzův zákon, hovoří o nejvyšším možném využití energie větru asi 59 %, přesně $16/27$, při neoptimálním zpomalení větru, které bylo propočtem stanoveno na $2/3$

rychlosti větru. To je ale stále značně zidealizované číslo, které je dále redukováno třecími a odporovými ztrátami lopatek, převodovými ztrátami, ztrátami na generátoru a měniči [7], [17]. Pro současné turbíny se za ideálních okolností uvádí hodnota účinnosti 75 až 85 % z Betzova limitu [20].

7.5. Natáčení větrných elektráren

Zcela zásadním prvkem pro maximální využití VtE je zabezpečení kolmého působení větru na rotor. Musí se tedy zajistit otáčení rotoru podle směru větru. To se u malých VtE, jež mají výkon cca do 1,5 kW realizuje pomocí kormidla, na které vítr při změně směru působí buďto z jedné nebo z druhé strany, a tím dojde k natočení turbíny proti novému směru větru [21]. U velkých VtE je natáčení značně složitější. Uskutečňuje se pomocí tzv. yaw drive. Podle velikosti elektrárny se jedná o 2,4 či 6 elektropohonů, skládajících se z elektromotoru o výkonu 2 až 2,5 kW, planetové převodovky s několika stupni chodu a pastorku. Elektropohony jsou spolu s vnitřní klecí kuličkového ložiska, na kterém je celá strojovna umístěna, připevněny k nosné kostře strojovny a jejich pastorky jsou v záběru s přímým ozubením, které je situováno na plášti vnější ložiskové klece, jež je spojena se stožárem. Po uskutečnění natočení rotoru se strojovnou je tento nově nastavený úhel elektrárny zpravidla zajištěn čelistovými brzdami. Turbína totiž nereaguje na každou změnu proměnlivého směru větru, tudíž jsou na elektrárnu vytvářena značná zatížení, která by nebyl společně s dalšími silami od gyroskopického momentu rotoru elektropohon schopen přenést [22].

Pro měření změn směru větru se u elektráren s yaw drive, využívají buďto klasické směrovky nebo moderní sonické anemometry. Naměřené hodnoty jsou neustále vyhodnocovány řídicím systémem. Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci. Elektrárna prostřednictvím této metody natáčení není schopna svižně reagovat na neustálé střídání směru větru, proto jsou malé úhly vychýlení od žádaného kolmého působení tolerovány, ale díky tomu vzniká tzv. yaw error, což jsou ztráty výkonu způsobené šikmým dopadem větru na rotor. Procentuální ztrátu při daném úhlu lze vypočítat pomocí [23]:

$$z = (1 - \cos^3 \varphi) \cdot 100 \quad (7.1)$$

z ztráta výkonu vlivem šikmého působení větru [%]

φ odchylka od žádaného kolmého směru větru na rotor [°]

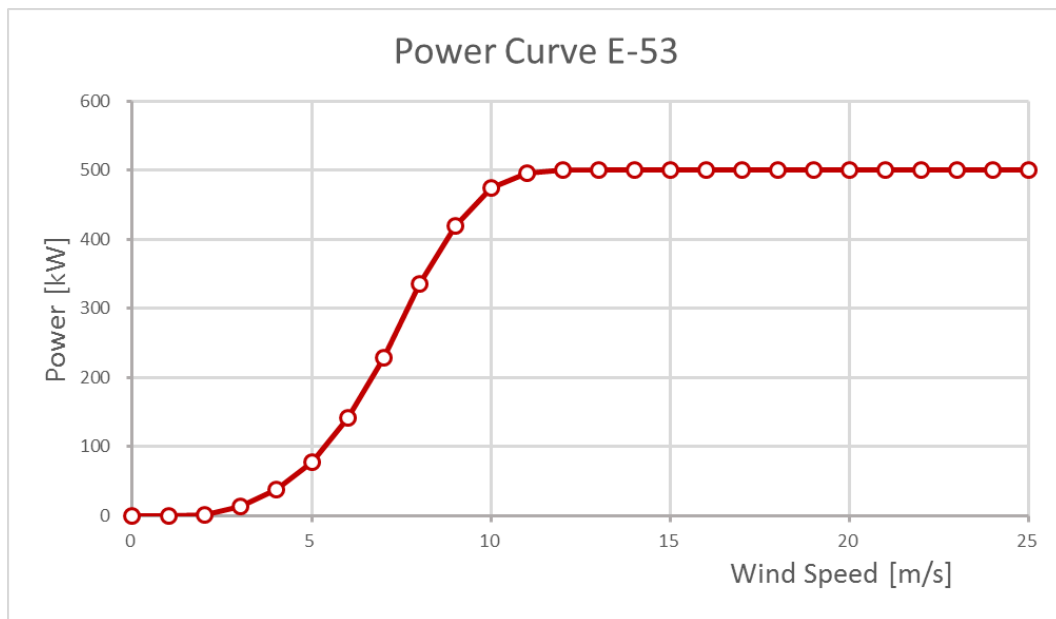
Jelikož je úhel závislý na třetí mocnině, bude ztráta s každým stupněm vychýlení svižně narůstat. Při dosažení 4,5° ztráta činí cca 1,1 %, ale při 10° se už jedná o cca 4,5 %. V závislosti na technických možnostech yaw drive a zároveň na žádaných co nejmenších ztrátách výkonu, je snaha vytvořit optimální naprogramování ovládacího systému, který spouští natáčení elektrárny. Ten např. funguje stylem, kdy při nižších rychlostech větru toleruje větší stupně vychýlení po delší časový úsek oproti vyšším kýženým rychlostem větru, kdy pro spuštění

natáčení stačí menší stupně vychýlení po kratší časový úsek. Toto nastavení je nicméně značně individuální a záleží na konkrétní lokaci VtE [23].

7.6. Výkon

V současné době jsou rozlišovány tři kategorie: malé, střední a velké VtE. Malými elektrárnami se rozumí turbíny, které hodnotou průměru rotoru nepřesahují 16 m. Jejich výkon je v rozsahu jednotek až desítek kW. Hlavní využití nalézají především v oblasti osobních potřeb. Střední a velké VtE se již zpravidla využívají v oblasti komerční výroby elektrické energie. V případě středních turbín se jedná o průměry rotorů v rozmezí 16 až 45 m. Výkon této kategorie je v řádu desítek, spíše stovek kW. Průměr rotoru u velkých turbín začíná na přibližně 45 m a dosahuje i několik desítek metrů nad hodnotu 100 m. Takové VtE se můžou chlubit výkonem stovek kW až po jednotky MW [9].

Každá VtE má svoji výkonovou křivku, viz obr. 6. Ta informuje o množství elektrické energie, kterou je turbína schopna vyprodukovat při konkrétní rychlosti větru. Z křivky je patrné, že turbíny začínají s výrobou až od dané rychlosti větru, tzv. startovací rychlosti. Od ní výkon turbíny v závislosti na zvyšující se rychlosti roste. Jakmile je ovšem dosaženo tzv. jmenovité rychlosti, začíná být výkon turbíny kvůli ochraně generátoru uměle držen na konstantní maximální hodnotě. Toho je v dnešní době dosahováno úpravou úhlu listů rotoru vůči proudu vzduchu, tudíž zmenšením vztlakové síly. Přenastavení listů rotoru na menší úhly nastavení, tedy otočení lopatek do protilehlého směru pro odtržení proudu větru, je známé jako tzv. regulace actice stall a v opačném případě, tedy seřízením listů na větší úhly nastavení, čímž klesne hodnota vztlakové síly, je řeč o tzv. regulaci pitch. Zmíněná konstantní maximální hodnota výkonu nicméně neplatí pro všechny rychlosti větru nad jmenovitou rychlostí, ale VtE bývá zpravidla okolo rychlosti $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ za pomoci přestavení listů do praporu spolu s použitím kotoučových brzd skokově odstavována. Tento jev může mít nežádoucí vliv na rozkolísání sítě, což je nutné následně kompenzovat [9].



Obr. 6 - Výkonová křivka pro větrnou elektrárnu Enercon E-53 o výkonu 500 kW [24]

Velice důležité je rovněž zmínit, že výkon elektrárny nezůstává konstantní, nýbrž s jejím zvyšujícím se věkem postupně klesá. Podle studie publikované britskou Imperial College London se v průměru ztrácí cca 1,6 % z celkového výkonu za rok [25]. Při návrhu VtE je tedy příhodné na tento trend poklesu myslet a zahrnout ho do ekonomického zhodnocení projektu.

7.7. Využití výkonu

Využití výkonu VtE definuje velikost poměru mezi průměrným výkonem turbíny oproti jmenovitému výkonu. Tato hodnota se obvykle uvádí v procentech, a to za daný časový interval, kterým často bývá jeden rok. Pro výpočet je využíván vztah [20]:

$$k_r = \frac{E_r}{P_{inst} \cdot t_r} \quad (7.3)$$

- k_r koeficient využití výkonu za časový interval [-]
- E_r množství vyrobené elektrické energie za časový interval [MWh]
- P_{inst} instalovaný výkon elektrárny [MW]
- t_r časový interval v hodinách [h]

V ČR se jako průměrný koeficient využití výkonu za jeden rok uvádí cca hodnota 20 %. Nicméně nově vystavěné moderní turbíny v českých podmínkách dosahují zpravidla 25 %. V ojedinělých případech lze mluvit dokonce i o hodnotách vyšších. Tento koeficient se kupříkladu může zvětšit instalací generátoru o menším výkonu, než jaký se obvykle u daného

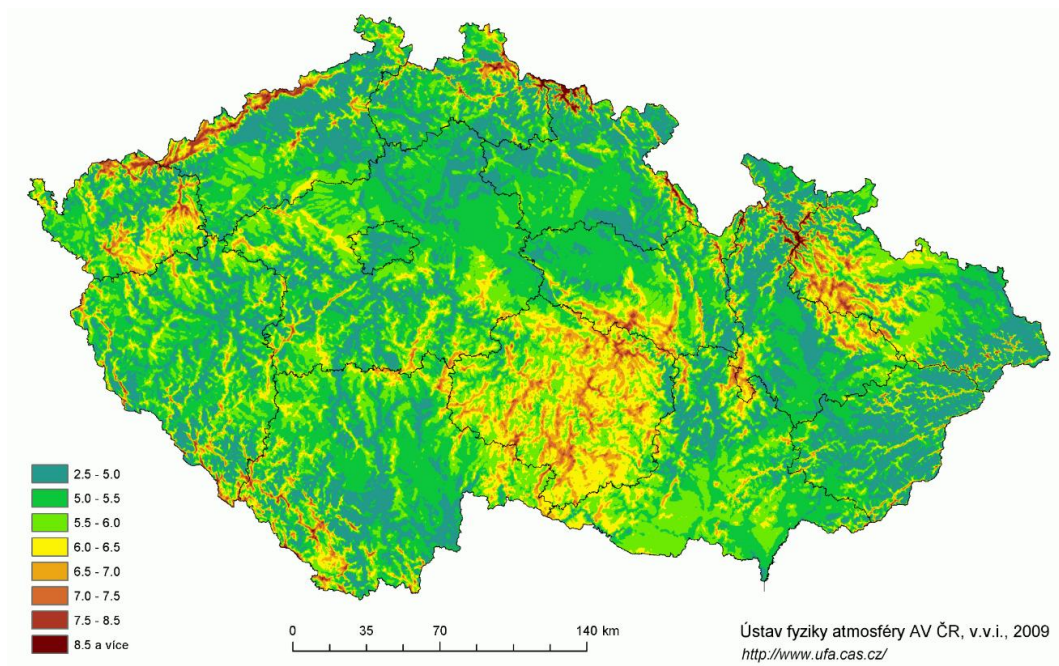
průměru rotoru objevuje, jelikož s takovým generátorem přijde docílení jmenovitého výkonu dříve, tedy za menších rychlostí proudění vzduchu, než u generátoru k rotoru úměrnému. Takové řešení má ovšem i svoji negativní stránku a sice snížení účinnosti, kdy při vyšších rychlostech větru VtE dosahuje menší výroby elektrické energie, jelikož je omezována maximálním výkonem generátoru [20].

8. Výběr lokality pro větrnou elektrárnu a povětrnostní situace zvolené lokality

V následujících kapitolách se budu věnovat procesu návrhu VtE. Základem pro takový projekt je správná volba lokality umístění. Dále budu pokračovat výběrem dvou modelů elektráren, ze kterých bude jedna z nich podle ekonomického zhodnocení vybrána, a sice pro zvolenou lokalitu označena za více vhodnou.

8.1. Volba oblasti umístění

Výběr lokality s optimálními podmínkami pro provoz VtE je v ČR značně omezen, zejména nízkými rychlostmi větru na většině území nebo oblastmi NP a CHKO. Pro základní zorientování se v českých povětrnostních poměrech jsem využil mapu z obr. 7, na které jsou zachyceny průměrné rychlosti větru v ČR ve výšce 100 m, což je v dnešní době již obvyklá výška stožárů VtE, tedy středu rotoru. Proto je toto znázornění rychlostí při prvotním zacílení na vhodnou oblast vhodnější, než mapy rychlostí větru ve výšce 10 m, kde se povětrnostní podmínky oproti výšce 100 m značně liší. Jako území s žádoucí rychlostí větru pro větrnou turbínu jsou na ní znázorněny především oblasti Vysočiny, Krušných hor, Krkonoše, Orlických hor, Jizerských hor a Jeseníku. Dále jsem využil poznatky z kapitoly 5., ve které se píše o zvyšování průměrné rychlosti větru směrem k severním hranicím republiky. Na základě těchto informací a obr. 5, na kterém jsou vyznačeny NP a CHKO, jsem jako oblast, ve které budu hledat vyhovující konkrétní lokalitu, zvolil Krušné hory.



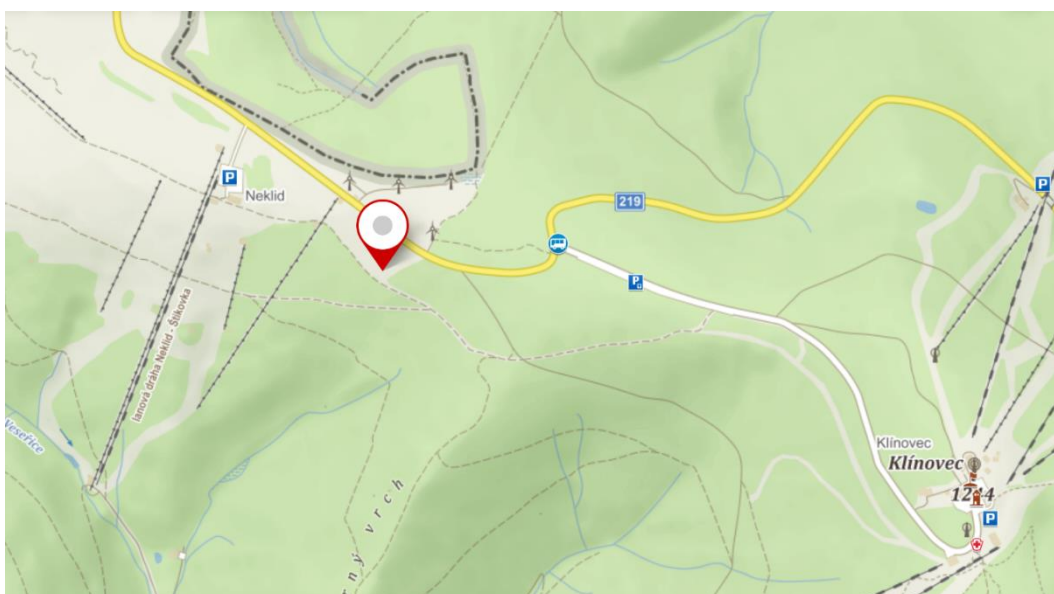
Obr. 7 - Průměrné rychlosti v ČR ve výšce 100 m nad povrchem [26]

8.2. Lokalita stavby

Krušné hory jsou pro stavbu VtE poměrně oblíbeným místem, což přisuzuji kromě příznivým povětrnostním podmínkám také faktu, že se zde dle mapy na obr. 5 nevyskytují NP či CHKO. Díky tomu jsem se zde však setkal s problémem, kdy je velká část vyhovujících míst již obsazená. Při hledání vhodné lokality je nutné kromě rychlosti větru hledět také na dobrou dostupnost distribuční sítě pro zapojení elektrárny, kvalitní příjezdovou komunikaci, po které bude výrobce schopen desítky metrů dlouhé lopatky rotoru a části stožáru na zvolené místo dopravit a v neposlední řadě také na nezalesnění lokality. Vykácení lesního porostu tzv. odlesnění by dle Lesního zákona č. 289/1995 Sb. [27] bylo značně komplikované a s velkou pravděpodobností by se mohlo setkat ze strany úřadů i s neúspěchem. Uvažovat nad takovým umístěním by proto bylo zbytečným prodloužením již tak dlouhého období potřebného k realizaci stavby, jež se v ČR v současné době pohybuje až okolo 5 let. V horším případě by při zamítnutí vykácení mohl celý projekt ztroskotat.

K podrobnějšímu vyhledávání vyhovující lokality v Krušných horách jsem již musel využít mapu všeobecných větrných podmínek pro výšce 10 m nad povrchem uvedenou na webových stránkách Ústavu fyziky atmosféry AV ČR [28]. Jelikož tuto mapu lze snadno přibližovat na velice podrobná měřítká, kdy je možno vidět města, obce, silnice, cesty a další důležité prvky při vyhledávání žádoucí lokality, což mapa rychlosti větru pro výšku 100 m nad povrchem na obr. 7 neposkytuje.

Jako umístění VtE jsem pro svoji bakalářskou práci zvolil pozemek mezi horou Klínovec a obcí Boží Dar. Klínovec je od vybrané lokality vzdálen cca 1200 m a Boží Dar cca 1700 m. Jedná se o nezalesněnou parcelu v nadmořské výšce přibližně 1140 m n.m. [29]. Podél části jejího okraje se táhne zpevněná asfaltová komunikace, po které by neměl být problém VtE dopravit. V blízkosti lokality se nacházejí čtyři již zbudované větrné turbíny (dvakrát Enercon E-33 o výkonu 330 kW, jednou Enercon E-48 o výkonu 800 kW a jednou Energovars E315 o výkonu 315 kW, která je mimo provoz) [30]. Z této výstavby předpokládám, že se v okolí musí nacházet dobře dostupná distribuční síť, do které je možné elektrárnu napojit. Dále se na základě již vystavěných VtE domnívám, že si okolní obyvatelstvo na přítomnost turbín již navyklo, a díky těmto zkušenostem s větrnou energií by výstavba další elektrárny nemusela vzbuzovat tak silné negativní emoce, se kterými se lze u VtE často setkat.



Obr. 8 - Umístění větrné elektrárny [31]

Parcelní číslo	1548/1
Obec	Jáchymov
Katastrální území	Jáchymov
Vlastnické právo	Město Jáchymov, náměstí Republiky 1, 36251 Jáchymov
Výměra [m ²]	38 636

Tab. 3 - Základní informace o pozemku z katastru nemovitostí [32]

8.3. Povětrnostní podmínky zvolené lokality

Jak bylo zmíněno v kapitole 2., pro získání nejpřesnějších hodnot k vyhodnocení povětrnostních podmínek konkrétní lokality by mělo být využito tzv. stožárového měření, a to v co největší výšce od povrchu, aby byl snížen negativní dopad blízkých překážek a nejistota při případném přepočtu rychlosti větru z výšky měření do výšky rotoru [9]. Takové měření je ovšem nejenom velmi finančně náročné, ale kvůli potřebě data sbírat minimálně po dobu jednoho roku, také značně časově zdouhavé. Proto jsem se se svým vedoucím práce a vedoucím Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze domluvil na objednání modelových dat od ČHMÚ.

Pro namodelování povětrnostních dat určité lokality ČHMÚ využívá počítačové programy WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) či WEng (WASP Engineering). WASP je předně aplikován na výpočty předpokládaných větrných údajů a dosažitelné větrné energie. Jako základní data se vždy používají naměřené rychlosti a směry větru z jedné meteorologické stanici, kde k měření dochází minimálně po dobu jednoho roku. Ta jsou dle struktury krajiny, drsnosti terénu, či působení překážek extrapolována do nedalekého okolí. Chyba výpočtu se s rostoucí vzdáleností zvětšuje a zpravidla se jedná o chybu nadhodnocení dat [33].

Program WEng je samostatný doplněk elementárního programu WASP. Slouží především k predikci extrémních hodnot průměrné rychlosti větru, vertikálních profilů větru, stříhů větru a turbulencí. Obdobně jako u WASP se i zde vychází z hodnot větru naměřených na jedné stanici, ovšem s tím rozdílem, že k extrapolaci může docházet už i s jednou hodnotou vektoru rychlosti [33].

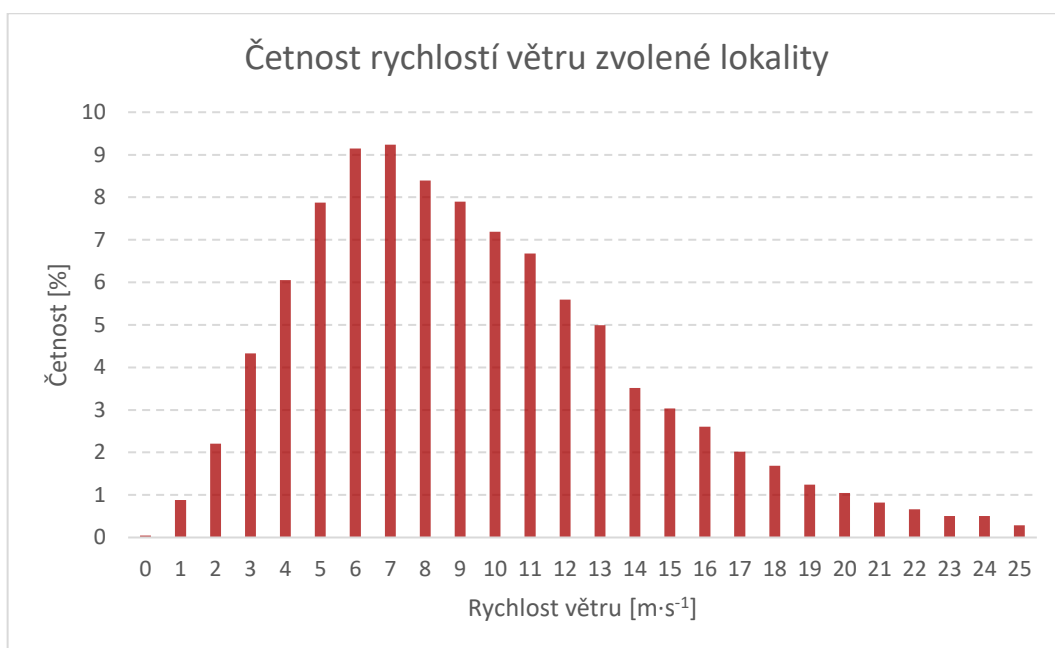
Modelová data rychlosti a směru větru pro mnou zvolenou lokalitu mi byla zaměstnanci ČHMÚ zaslána ve formě jednoho souboru programu Excel, ve kterém byla rozdělena do dvou sloupců a v nich chronologicky zarovnána podle dne a konkrétní hodiny. Jelikož je při stanovení větrných podmínek vybraného umístění nutné vycházet z minimálně rok trvajících měření s hodnotami odečítanými alespoň po jedné hodině, jednalo se celkem o 8760 údajů neboli 8760 hodinových hodnot, a to jak pro rychlost, tak směr. Namodelované rychlosti byly dodány s přesností na jedno desetinné místo a směry s přesností na jednotky.

Zcela zásadním popisem povětrnostních podmínek zvolené lokality pro budoucí výpočet předpokládané vyrobené energie je určení četnosti rychlostí a úhlů větru. Jelikož je ovšem většina VtE schopna pracovat do rychlosti maximálně $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ budu v grafech i tabulkách pro další výpočetní kapitoly, pracovat pouze s hodnotami do této limitní rychlosti.

Pro účely sloupcového grafu četnosti rychlostí větru, který je v grafu 1, byla data rychlostí větru zaokrouhlena na celá čísla a následně bylo zjištěno, jaký počet těchto

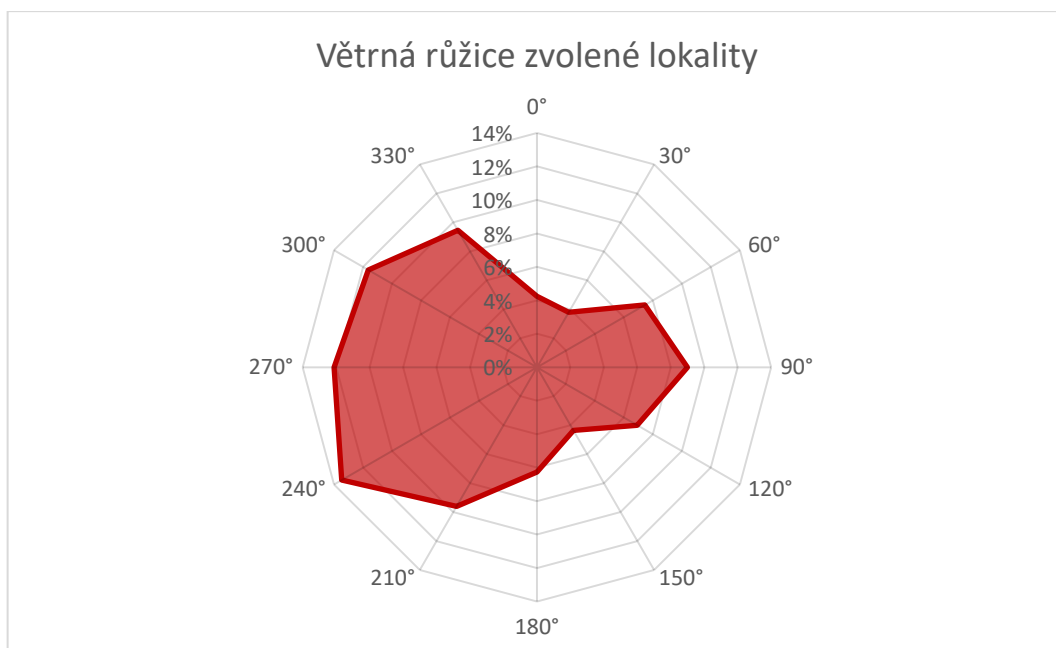
zaokrouhlených hodnot připadá každé rychlosti od 0 do 25 m·s⁻¹. Vzniklé sumy byly poté vztaheny k celkovému množství rychlostí, tedy kvantu 8760 hodnot. Z výsledného grafu je patrné, že nejvyšší četnosti dosahují rychlosti 6 a 7 m·s⁻¹.

Četnost stanovená tímto způsobem nemá ovšem pro další výpočty příliš vypovídající charakter, jelikož díky rychlostnímu zaokrouhlení, které pro její zjištění bylo použito, není dostatečně přesné a docházelo by tedy ke zbytečnému zvyšování chyby výsledků. Proto jsem četnost určil také bez zaokrouhlení rychlostí, tedy s krokem 0,1 m·s⁻¹, a to opět v rozmezí 0 až 25 m·s⁻¹. Jedná se tedy o 251 hodnot, pro které bylo třeba určit jejich množství v celkovém vzorku rychlostí. Četnost těchto 251 rychlostí byla stanovená také v závislosti na úhlu větru. Její výsledky jsou uvedeny v příloze 1. Pro větší přehlednost byly hodnoty rychlostí kromě 0 m·s⁻¹ zapsány po 10 hodnotách do tvaru intervalu, např. (5;6). Stejně bylo postupováno v případě úhlů, avšak ty byly zapsány do intervalů po 30°. Četnosti byly v každém intervalu rychlosti v závislosti na intervalu úhlu sečteny.



Graf 1 - Četnost rychlostí větru zvolené lokality

Četnost úhlů větru je znázorněna na grafu 2 pomocí tzv. větrné růžice. Stejně jako při zjišťování četnosti rychlostí větru jsem pro každý úhel od 0° do 359° našel množství jeho výskytu v celkovém vzorku dat. Vynechal jsem ovšem úhly naměřené při rychlostech vyšších než 25 m·s⁻¹. Následně jsem pro lepší přehlednost v grafu úhly zahrnul opět do intervalů a to po 30° a v každém z nich sečetl počet výskytů jednotlivých úhlů, které interval zahrnoval. Suma každého intervalu byla dále vztahena k celkovému množství úhlů. Dle výsledků je zřejmé, že vítr během roku převážně proudí mezi úhly 210° až 330° a poté v menší míře mezi úhly 60° až 120°.



Graf 2 - Větrná růžice zvolené lokality

8.4. Energie větru

Díky zjištěné četnosti nyní mohu určit energii větru protékající jednotkovou plochou ve vybrané lokalitě. K jejímu výpočtu jsem využil vzorec z kapitoly 4.:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \sum_0^i v_i^3 \cdot \Delta t \quad (8.1)$$

- E_v výsledná celková energie větru [J]
- ρ_i hustota proudícího vzduchu za daný časový interval [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
- v_i průměrná rychlost proudícího vzduchu za daný časový interval [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
- Δt časový interval mezi jednotlivými měřeními [s]

Pro vztah 8.1 jsem hodnotu hustoty vzduchu uvažoval jako konstantní. Ve skutečnosti by ale v průběhu roku docházelo k jejím změnám v závislosti na aktuálním tlaku. Zanedbání měnící se hustoty vzduchu by ovšem pro výslednou energii větru mělo znamenat pouze nepatrnou chybu, jelikož hlavní důraz ohledně přesnosti je kladen na rychlost větru, která je ve vzorci 8.1 umocněna na třetí. Hustoty vzduchu jsem vypočítal dle vztahu z kapitoly 4.:

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot T} \quad (8.2)$$

ρ	.....	hustota vzduchu [kg·m ⁻³]
p_b	.....	barometrický tlak v dané nadmořské výšce [Pa]
r	.....	plynová konstanta [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹], pro vzduch cca 287 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
T	.....	termodynamická teplota vzduchu [K]

Jak již bylo zmíněno, hustota vzduchu závisí na aktuálním tlaku, který s rostoucí nadmořskou výškou klesá a je také ovlivňován probíhajícím ročním obdobím. Jeho měnící se hodnoty v průběhu roku bohužel nemám k dispozici. Byl jsem schopen dopočítat pouze jednu hodnotu hustoty vzduchu, a to podle nadmořské výšky zvolené lokality. Proto také musela být uvažována jako konstantní. Dle [4] je možné stanovit tlak vzduchu v požadované nadmořské výšce vzorcem:

$$p_b(h) = p_b(0) \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} \cdot h + 0,5291 \cdot 10^{-8} \cdot h^2) \quad (8.3)$$

$p_b(h)$	.....	barometrický tlak v dané nadmořské výšce [Pa]
$p_b(0)$	.....	barometrický tlak na úrovni moře [Pa], cca 1013,25 hPa
h	.....	daná nadmořská výška [m]

Vybrané umístění VtE se nachází v nadmořské výšce přibližně 1140 m n.m.. Po dosažení této hodnoty do vzorce 8.3 jsem spočítal barometrický tlak pro zvolené umístění, který je roven 873,85 hPa. Stanovený tlak jsem dále dosadil do vztahu 8.2 spolu s plynovou konstantou a průměrnou teplotou za jeden rok, pro kterou jsem použil hodnotu 2,7 °C (275,85 K), což je průměrná roční teplota Klínovce, který se se svojí nadmořskou výškou 1244 m n.m. od nadmořské výšky vybrané lokality příliš neliší, tudíž předpokládám, že by i průměrné roční teploty těchto dvou míst měly být téměř totožné [34]. Po dosažení všech vyjmenovaných hodnot do vztahu 8.2 jsem došel k výsledné hustotě vzduchu 1,103781 kg·m⁻³.

Spočtenou hustotu vzduchu jsem následně použil ve vzorci 8.1, do kterého jsem také postupně dosazoval rychlosti větru s krokem 0,1 m·s⁻¹ a jejich sekundové četnosti v závislosti na úhlu větru. Tabulka s vypsány energiemi protékajícími jednotkovou plochou je k uvedena v příloze 2. Rychlosti i úhly větru jsem v tabulce pro přehlednost opět uvedl v intervalech. V těch jsem dle jejich rozsahu spočtené protékající energie pro sekundové četnosti jednotlivých rychlostí v závislosti na jednotlivých úhlech sečetl. Celkově za dobu jednoho roku jednotkovou plochou ve vybrané lokalitě projde energie ve výši 25 882,6 MJ·m⁻².

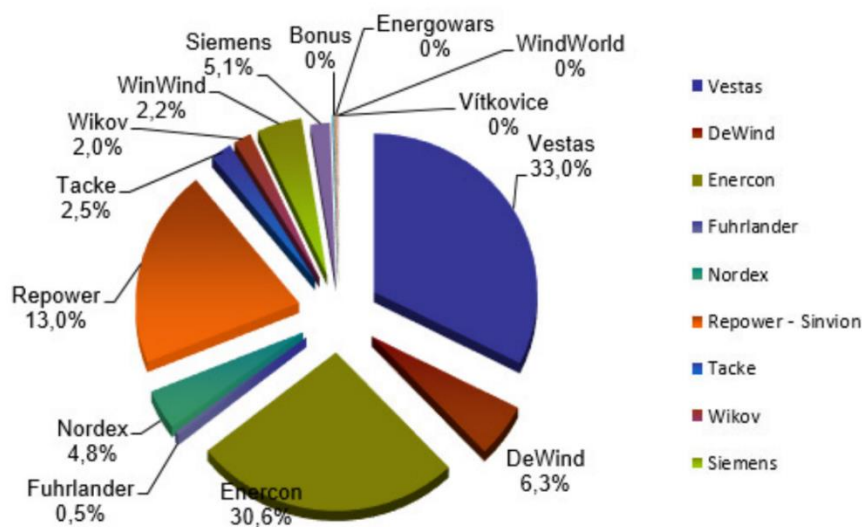
Při pozdějších výpočtech vyrobené elektrické energie prostřednictvím VtE budu ovšem pracovat především s energiemi v jednotkách kWh. Proto jsem celou tabulku v příloze 2 převedl z MJ·m⁻² na kWh·m⁻². Převod jsem uskutečnil dle závislosti – 3,6 MJ = 1 kWh. Takto

převedená tabulku je v příloze 3 a celkově po převedení za dobu jednoho roku ve vybrané lokalitě projde energie ve výši 7189,6 kWh·m⁻².

Výsledné tabulky energií v příloze 2 a příloze 3 jsou ovšem spíše informativní. Dle Betzova limitu, zmíněného v kapitole 7.3., je možné ve skutečnosti přenést maximálně 16/27 z hodnot energií. Tabulku s energiemi uvedenými v kWh v příloze 3 jsem tedy tímto limitem vynásobil a vypočítal maximální hodnotu využitelné energie větru protékající jednotkovou plochou, která je za dobu jednoho roku pro zvolenou lokalitu rovna 4260,5108 kWh·m⁻². Vypracovaná tabulka se všemi hodnotami je předložena v příloze 4.

9. Volba větrných elektráren

Při výběru VtE jsem si nejprve zjistil, jaké firmy vyrábějící větrné turbíny se v ČR vyskytují nejčastěji. Nejrozšířenější na českém území jsou firmy Vestas, kterému patří 33 % z celkového výkonu všech instalací, a Enercon, kterému připadá 30,6 % z celkového výkonu všech instalací. Domnívám se, že tyto firmy musí vyrábět elektrárny vysoké kvality, pokud se jim podařilo v ČR dosáhnout tak značného rozšíření. Dále si myslím, že díky jejich vysokému procentu instalací s nimi bude již značné množství zkušeností, které by se mohly dát využít např. při výskytu případných závad a jejich řešení. Také by neměl být problém zajistit pravidelný servis, který je pro provozování nezbytný. Z těchto důvodů jsem tedy vybíral elektrárny u těchto dvou firem.



Obr. 9 - Poměr VtE v ČR podle instalovaného výkonu na výrobce [35]

Vestas svoji výrobu zaměřuje na elektrárny s asynchronními generátory, jejich součástí jsou tedy převodovky, zatímco Enercon jde opačnou cestou, a sice produkcí elektráren se synchronními generátory, které převodovky nemají. Ve své práci jsem se rozhodl porovnávat jednu elektrárnu od firmy Vestas a druhou od konkurenční Enercon. Ve snaze co nejmenšího navýšení hluku, produkovaného elektrárnami, které jsou již v blízkosti vybrané lokality vystavěné, jsem se rozhodl, že elektrárnu Vestas, která obsahuje převodovku, tudíž produkuje více hluku, zvolím s menším výkonem, zatímco elektrárnu Enercon, jejíž součástí převodovka není, a měly by tedy být tišší, mohu zvolit s výkonem vyšším.

9.1. Vestas V90

První zvolenou variantou je elektrárna Vestas V90. Jedná se o turbínu disponující maximálním výkonem 2 000 kW, a to v rozmezí rychlostí větru 13 až 25 m·s⁻¹. Startující rychlost je rovna 4 m·s⁻¹. Rotor, jehož průměr činí 90 m, je tvořen třemi lopatkami a nabízí plochu o velikosti 6 362 m². Výška tubusu není pevně daná, ale lze si dle potřeby vybrat z několika variant, viz tab. 4. Jelikož jsou data povětrnostních podmínek namodelována pro 100 m nad povrchem, vybírám výšku tubusu jim co nejbližší, tedy 95 m [36].

Nejvyšší výkon [kW]	2 000
Průměr rotoru [m]	90
Plocha rotoru [m ²]	6 362
Výška tubusu [m]	80/95/105
Třída větru dle IEC	IEC IIA
Koncept VtE	Planetární převodovka, řízení jednotlivých lopatek

Tab. 4 - Základní technické informace o elektrárně Vestas V90 [37]

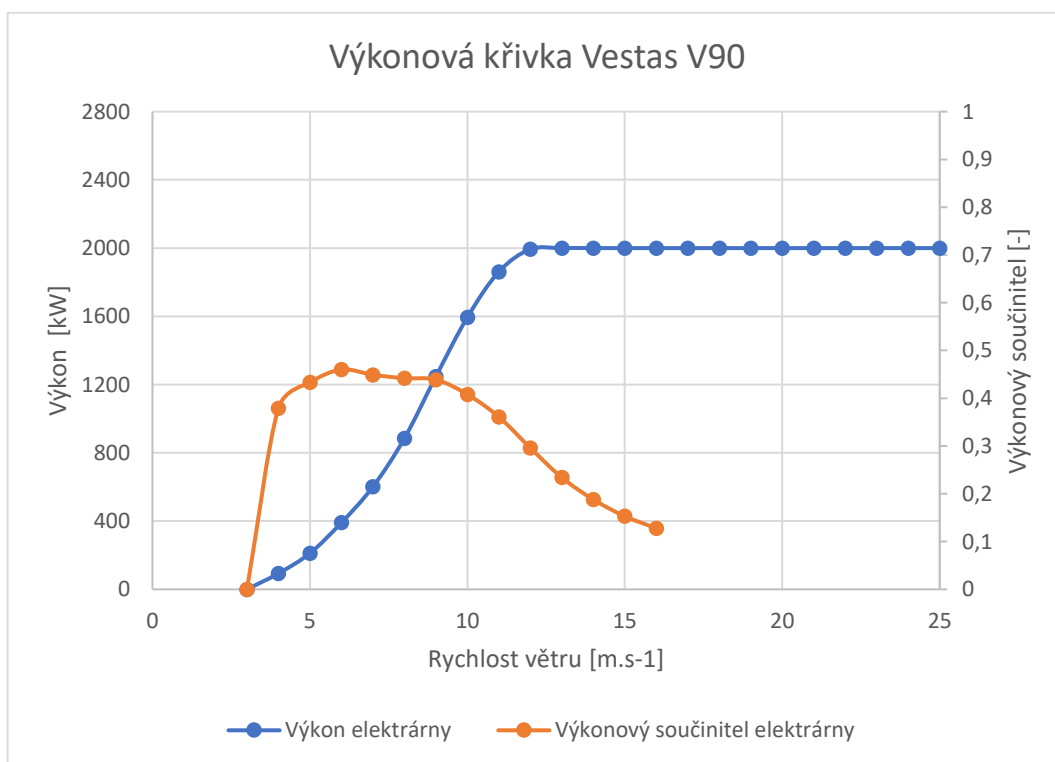
Dále se u elektrárny V90 objevuje zařazení v rámci třídy větru IEC (mezinárodní norma) do IEC IIA. Tato norma přiděluje větrným turbínám různá označení dle síly větru, pro kterou jsou vhodné. Jedná se ovšem spíše o přibližné zařazení, vždy bude rozhodující konkrétní místo, na kterém by měla turbína stát. Podle znázorněné tab. 5 je patrné, že průměrná roční rychlost větru mé zvolené lokality, jež činí 9,66 m·s⁻¹, je na pomezí mezi IEC IIA a IEC I s tím, že se spíše blíží IEC I. Nicméně je nutné nezapomenout na chybu, která se u modelových rychlostí větru objevuje a z pravidla zapřičiňuje nadhodnocení rychlostí, tudíž reálná průměrná rychlost by měla být o trochu menší. Třída IEC IIA by tedy měla být dostatečná.

Třídy větru dle IEC	Průměrná roční rychlost větru [m·s ⁻¹]
IEC I – silný vítr	10
IEC II – středně silný vítr	8,5
IEC III – slabý vítr	7,5
IEC IV – velmi slabý vítr	6

Tab. 5 - Třídy větru dle IEC [38]

O regulaci elektrárny se stará systém typu pitch, který zajišťuje neustálé měření výkonu turbíny a dle zjištěných hodnot jsou následně upravovány úhly nastavení jednotlivých lopatek. Natáčení probíhá buďto do proudu větru při menších výkonech, tedy nižších rychlostech, nebo z proudu větru, kdy vítr začíná být příliš silný. Tento systém u elektrárny zajišťuje maximalizaci využití jejího výkonu, a to v celém spektru rychlostí větru, ve kterých je turbína funkční [39].

Vzhledem k výpočtu výroby energie je však nejzásadnější informací ohledně parametrů elektrárny její výkonová křivka, viz graf 3. Výrobce ale na svých stránkách hodnoty výkonu v závislosti na rychlosti větru pro vytvoření výkonové křivky neuvádí, proto jsem musel čerpat ze stránek Wind Turbine Model.



Graf 3 - Výkonová křivka pro větrnou elektrárnu Vestas V90 [40]

Graf 3 také znázorňuje výkonový součinitel, který představuje poměr mezi výkonem rotoru a výkonem větru protékajícím skrz celou plochu rotoru [4]. Pro elektrárnu Vestas V90 byl však uveden pouze do rychlosti větru $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

9.2. Enercon E-101

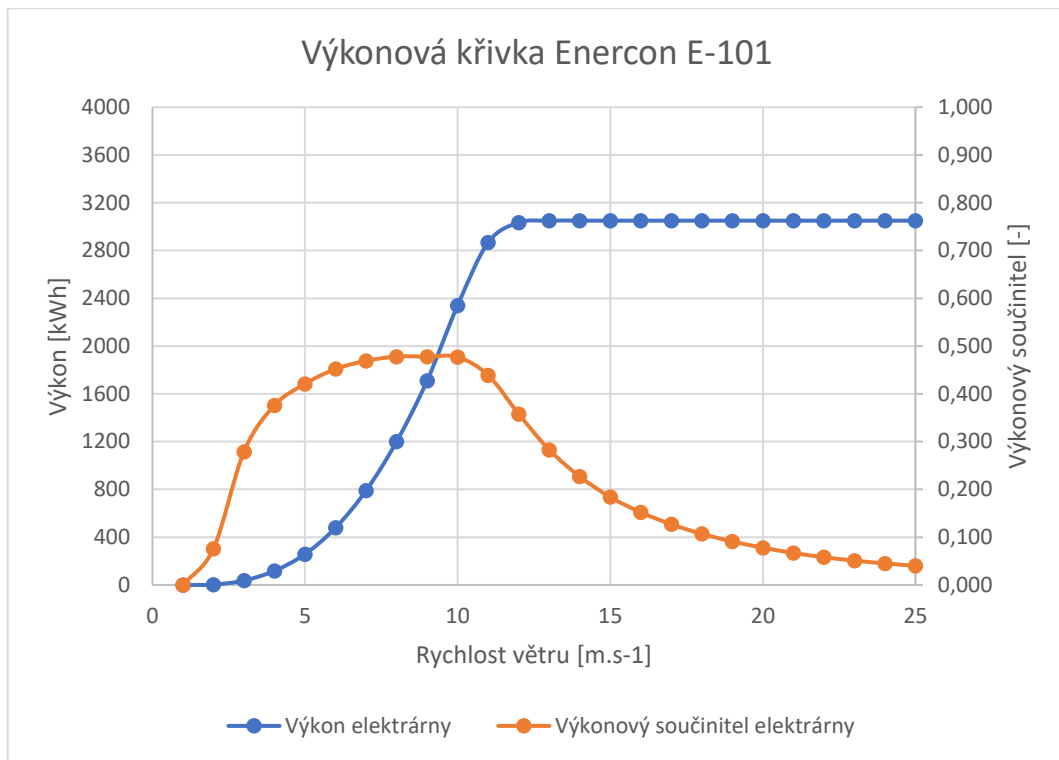
Jako druhou VtE jsem vybral Enercon E-101. Její maximální výkon činí 3 050 kW a stejně jako u Vestas V90 je dostupný pro rozmezí rychlostí větru 13 až $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ovšem oproti Vestav V90 je u této elektrárny startovací rychlost už při rychlosti větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průměr rotoru dosahuje 101 m, tvoří ho tři lopatky a jeho plocha je rovna $8\,012 \text{ m}^2$. Obdobně jako u první elektrárny, i zde má zákazník výběr z několika výšek tubusů, viz tab. 6. Já jsem opět zvolil hodnotu nejbližší 100 m, a sice tubus výšky 99 m.

Nejvyšší výkon [kW]	3 050
Průměr rotoru [m]	101
Plocha rotoru [m^2]	8 012
Výška tubusu [m]	99/124/135/149
Třída větru dle IEC	IEC IIA
Koncept VtE	Bezpřevodková, proměnlivá rychlost, řízení jednotlivých lopatek

Tab. 6 - Základní technické informace o elektrárně Enercon E-101 [40]

Údaje o zařazení v rámci tříd větru dle normy IEC, jsou stejné jako u Vestas V90. A totožný je i systém natáčení jednotlivých lopatek pitch.

Výkonová křivka sestavená z hodnot, jež Enercon na rozdíl od Vestas na svých stránkách zveřejňuje, je spolu s výkonovým součinitel uvedena v grafu 4.



Graf 4 - Výkonová křivka pro větrnou elektrárnu Enercon E-101 [40]

10. Vyrobená energie za dobu jednoho roku

Nejpodstatnější otázkou při samotném návrhu VtE je pro případného investora míra zisku či ztráty. Aby bylo možné tyto ekonomické aspekty určit, je nejprve zapotřebí zjistit množství elektrické energie, které elektrárna zvládne přibližně vyrobit. K tomu lze dojít při znalosti výkonu elektrárny během každé rychlosti větru ze spektra rychlostí, ve kterých elektrárna pracuje, a četností rychlostí větru z tohoto spektra, jež se v plánované lokalitě výstavby vyskytují. V zásadě se jedná o drobně upravený vzorec z kapitoly 4. [4]:

$$E = \sum E_{v_i} = \sum_{v_{min}}^{v_{max}} P_{v_i} \cdot t_{v_i} \quad (10.1)$$

- E celková vyrobená energie [Wh]
- E_{v_i} vyrobená elektrická energie pro danou rychlost větru [Wh]
- P_{v_i} výkon větrné elektrárny pro danou rychlost větru [W]
- t_{v_i} četnost dané rychlosti větru [h]

Četnosti rychlostí větru a stejně tak výkonové křivky pro zvolené elektrárny jsem již určil v předchozích kapitolách. Nicméně jsem zde narazil na rozdíl přesností určení těchto dvou údajů. Zatímco četnosti jsem stanovil po desetínách rychlosti větru, viz kapitola 8.3., údaje o

výkonu elektrárny mám k dispozici pouze po jednotkách rychlosti větru. Při pohledu na výkonové křivky, viz graf 3 či graf 4, si lze všimnout prudkého nárůstu výkonu mezi některými rychlostmi, např. během přechodu z 9 na 10 m·s⁻¹. Kdybych kupříkladu hodnotou výkonu pro rychlost větru 10 m·s⁻¹ násobil všechny četnosti rychlostí větru z intervalu rychlostí (9;10) m·s⁻¹ byla by většina hodnot vyrobené energie značně nadhodnocená. Proto jsem využil SW GetData Graph Digitizer, jenž z grafu umožňuje odečítat neznámé hodnoty [41]. Prostřednictvím tohoto nástroje jsem tedy z grafu 3 a grafu 4 odečetl pro jednotlivé elektrárny jejich výkony v závislosti na rychlosti větru po 0,1 m·s⁻¹, které jsem následně vynásobil spolu s četnostmi rychlostí, jež byly zjišťovány se stejným krokem.

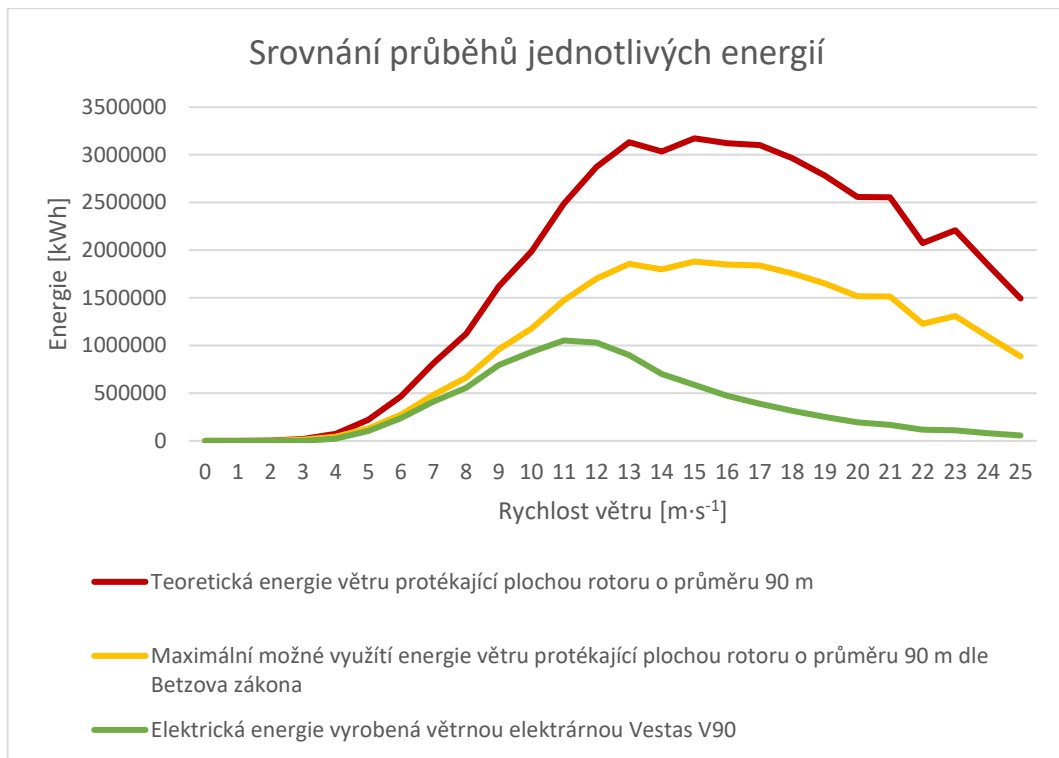
Ačkoliv byl v kapitole 7.6. zmíněn pokles výkonu VtE v průběhu let její životnosti, výsledné hodnoty výroby v následujících kapitolách 10.1. a 10.2. jsem uvažoval pouze za plného výkonu turbíny. Se snižující se výrobou budu počítat až v ekonomické části práce.

10.1. Vestas V90

Před samotným výpočtem vyrobené elektrické energie elektrárnou Vestas V90 jsem nejprve stanovil energii větru, která během roku proteče rotorem turbíny. Při znalosti plochy rotoru turbíny Vestas V90, která činí 6 362 m², stačí její hodnotou pouze vynásobit tabulku s energiemi v kWh protékajícími jednotkovou plochou v příloze 3. Výsledná tabulka je k nahlédnutí v příloze 5. Celková teoretická energie protékající plochou rotoru za jeden rok činí cca 45 740 311 kWh.

Následně jsem plochou rotoru vynásobil také tabulku s hodnotami maximálně využitelné energie větru protékající jednotkovou plochou dle Betzova zákona v příloze 4. Tabulka s výsledky je uvedena v příloze 6. Celkové maximálně možné využití energie větru protékající plochou rotoru za jeden rok se rovná cca 27 105 369 kWh.

Vyrobenu elektrickou energii jsem spočítal za pomoci výše popsaného postupu. Zde opět demonstruji pouze hodnotu celkové vyrobené energie za jeden rok, jenž představuje cifra 9 493 523 kWh. Tabulka vyrobené energie v závislosti na rychlosti a úhlu je zahrnuta v příloze 7.

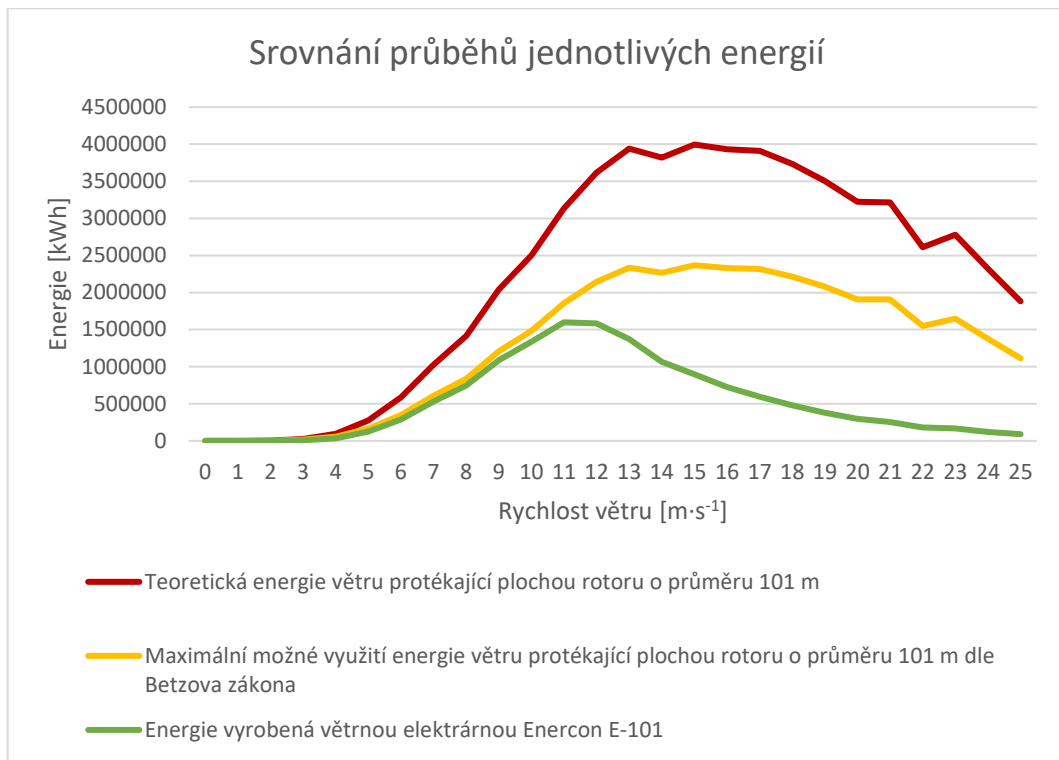


Graf 5 - Srovnání teoretické, maximálně využitelné a vyrobené energie pro větrnou elektrárnu Vestas V90

Na grafu 5 si od rychlosti větru přibližně $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze povšimnout odchýlení průběhu křivky vyrobené elektrické energie od podoby zbylých dvou křivek. Tento jev je způsoben zpomalujícím tempem růstu výkonu elektrárny v závislosti na růstu rychlosti větru, až se cca od rychlosti $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ stane výkon konstantním, což má za následek pokles křivky.

10.2. Enercon E-101

Plocha rotoru u elektrárny Enercon E-101 dosahuje oproti první elektrárně značně větší hodnoty. Konkrétně se jedná o $8\,012 \text{ m}^2$. Postup výpočtu jednotlivých energií zůstává stejný. Tabulky pro výslednou teoretickou energii a pro energii, jež lze maximálně využít, jsou uvedeny v příloze 8 a příloze 9. Celková energie protékající plochou rotoru za jeden rok činí $57\,603\,171 \text{ kWh}$ a po za započtení Betzova zákona jsem se dostal k hodnotě $34\,135\,212 \text{ kWh}$, což představuje celkové maximálně možné využití energie protékající plochou rotoru za jeden rok.



Graf 6 - Srovnání teoretické, maximálně využitelné a vyrobené energie pro větrnou elektrárnu Enercon E-101

Na grafu 6 lze vidět srovnání dílčích energií pro danou VtE. O rozdílném průběhu křivek zde platí to stejné jako v předchozí kapitole 10.1. Avšak oproti grafu 5 křivky zasahují do vyšších hodnot energií. U energie větru a energie, kterou je možno maximálně využít, je zvětšení hodnot záležitostí pouze větší plochy rotoru. U energie vyrobené za zvýšením ovšem stojí i další veličina, a tou je vyšší výkon elektrárny. Celková vyrobená energie za jeden rok činí 13 969 560 kWh. Výpis jednotlivých vyrobených energií v závislosti na rychlosti a úhlu je publikován v příloze 10.

10.3. Využití výkonu větrné elektrárny

Využití výkonu VtE bylo teoreticky popsáno v kapitole 7.7. Z této kapitoly jsem čerpal také vzorec, pomocí kterého jsem hodnotu efektivnosti stanovil:

$$k_r = \frac{E_r}{P_{inst} \cdot t_r} \quad (11.1)$$

- k_r koeficient využití výkonu za roční časový interval [-]
- E_r množství vyrobené elektrické energie za roční časový interval [kWh]
- P_{inst} instalovaný výkon elektrárny [kW]
- t_r časový interval jednoho roku v hodinách [h]

Jedná se o jednoduchý vztah, do kterého stačí dosadit pouze hodnoty vyrobené elektrické energie za jeden rok, maximální výkon elektrárny a časový interval jednoho roku převedený na hodiny.

Pro samotný výpočet u obou elektráren jsem zvolil rok o délce 365 dnů, což po vynásobení 24 hodinami znamená časový interval 8 760 hodin. Poté jsem dosadil zbylé příslušné hodnoty jednotlivých turbín. Dle výsledků uvedených v tab. 7 a tab. 8 koeficienty obou elektrárny výrazně převyšují průměrné hodnoty využití výkonu v ČR, které jsou u nových instalací cca 25 %. Tyto vynikající hodnoty využití výkonu by mohly znamenat výjimečně kvalitní výběr lokality, co se povětrnostních podmínek týče, nebo by mohly být způsobeny značným nadhodnocením modelových dat zpracovaných ČHMÚ, což se po konzultaci s vedoucím práce jeví jako nejpravděpodobnější.

Vestas V90	
Vyrobena elektrická energie	9 493,523 MWh
Výkon elektrárny	2 000 kW
Koeficient využití výkonu	54,19 %

Tab. 7 - Využití výkonu Vestas V90

Enercon E-101	
Vyrobena elektrická energie	13 969,560 MWh
Výkon elektrárny	3 050 kW
Koeficient využití výkonu	52,29 %

Tab. 8 - Využití výkonu Enercon E-101

11. Náklady na realizaci větrné elektrárny

V této kapitole rozeberu náklady na realizaci navržených VtE. Bude se ovšem jednat pouze o přibližný odhad, jelikož celková cena uskutečnění takového projektu závisí na značném množství okolností, jež v této práci nejsem schopen řádně zpracovat, např. náklady na výstavbu, administrativu, připojení do distribuční sítě atd. Všechny vyjmenované položky je velice komplikované finančně vyčíslit a zpravidla se pro ně vytvářejí samostatné studie. Stanovil jsem si tedy tři zjednodušené oblasti, pro které se budu snažit vytyčit jejich finanční nároky a sečtením těchto oblastí získám přibližné celkové náklady na realizaci. První oblast bude představovat cena samotné turbíny, druhou suma přidružených nákladů na stavbu elektrárny (vybudování základů, vztyčení elektrárny atd.), připojení do sítě, kabeláž, vytvoření komunikace až k elektrárně, administrativní činnost atd., a třetí bude cena pozemku.

Jelikož ani jeden z výrobců, Vestas, či Enercon, ceny svých elektráren neuvádějí, musel jsem cenu vypočítat z přibližných nákladů na 1 MW výkonu, jenž dle [42] v roce 2017 průměrně činily 990 000 \$. Což se při aktuálním kurzu, který 1 \$ obchoduje za 23,069 Kč, rovná částce 22 838 210 Kč [43]. V této ceně je zahrnuta samotná elektrárna a její doprava do zvolené lokality.

VtE	Cena VtE [Kč]
Vestas V90	45 676 620
Enercon E-101	69 656 845,5

Tab. 9 - Cena jednotlivých navržených větrných elektráren

Podle [44] tvoří cena turbíny cca 69 % celkových výdajů na realizaci projektu. Zbytek, tedy 31 %, patří do mnou stanovené druhé oblasti. Jak bylo zmíněno výše, jedná se o sumu přidružených nákladů představující cenu stavebních činností, vztyčení elektrárny, připojení do distribuční sítě, kabeláže, vytvoření komunikace, administrativní činnosti atd.

VtE	Přidružené náklady [Kč]
Vestas V90	20 521 380
Enercon E-101	31 295 104,5

Tab. 10 - Přidružené náklady na realizaci jednotlivých navržených větrných elektráren

Poslední nákladovou oblastí, kterou jsem posuzoval, je cena pozemku. V tab. 3 nacházející se v kapitole 8.2. jsou uvedeny základní informace o vybrané lokalitě. A sice, že vlastníkem pozemku je město Jáchymov a jeho výměra činí 38 636 m². Jáchymov prodává 1 m² pozemkové parcely (louky, zahrada, orná půda, ostatní plochy) za cenu 100 Kč. Ta je dále násobena cenovým koeficientem podle svažitosti příslušného pozemku, podmáčení, věcného břemene nebo scelení do 200 m² [45]. Pro mnou zvolenou parcelu je udávána svažitost mezi 3 až 7°, tudíž spadá do kategorie s koeficientem 1, který platí i pro podmáčení, jelikož se zde trvale zamokřená půda nevyskytuje [46]. Pozemek je však zatížen věcným břemenem zřizování a provozování vedení, což znamená přítomnost energetických sítí jako vedení elektřiny, plynu apod. [32]. Díky tomuto věcnému břemeni bude cena vynásobena koeficientem 0,8. Jelikož se jedná o velký pozemek, nebude pro stavbu VtE potřeba celá jeho plocha a v rámci co nejnižších nákladů bych se proto snažil o odkup pouze plochy nezbytné k realizaci projektu. Uvažoval jsem proto zakoupení pouze 50 % rozlohy pozemku.

Plocha pozemku [m ²]	Cena 100 % pozemku [Kč]	Cena 50 % pozemku [Kč]
38 636	3 090 880	1 545 440

Tab. 11 - Cena pozemku

Následně jsem všechny vypočítané náklady sečetl a stanovil celkové potřebné sumy k realizaci jednotlivých projektů. Ty jsem dále zaokrouhlil na statisíce nahoru a přičetl k nim částky pro nečekané výdaje. V případě Vestas V90 jsem uvažoval nečekané výdaje ve výši 2,5 mil. Kč a pro větší elektrárnu Enercon E-101 to bylo 4,5 mil. Kč.

Vte	Celková suma (cena VtE, přidružené náklady, cena pozemku) [Kč]	Nečekané výdaje [Kč]	Finální celková suma [Kč]
Vestas V90	67 743 440	2 500 000	70 300 000
Enercon E-101	102 497 390	4 500 000	107 000 000

Tab. 12 - Celkové výdaje potřebné k realizaci jednotlivých navržených větrných elektráren

12. Financování

Podstatným bodem, který bude na zvážení investora, je stanovení financování celého projektu. Jelikož žádného investora nemám, stanovil jsem si sám modelový případ, kdy případný investor hradí celou částku potřebnou k realizaci projektu pouze vlastním kapitálem. Financování by se rovněž dalo řešit kombinací vlastního kapitálu a úvěru. Poté je ovšem nutné k měsíčním nákladům na provoz a údržbu připočítat také splátky a v ekonomickém zhodnocení řešit otázky jako např. daňový štít atd.

13. Provoz a údržba

Stanovit správně výdaje na provoz a údržbu VtE je značně složité, jelikož tyto náklady jsou spojeny s mnoha faktory, za které lze kupříkladu označit lokalitu elektrárny, stáří elektrárny, spotřebu elektřiny na nezbytné úkony spojené s výrobou (natáčení rotoru a listů rotoru dle aktuálního větru), administrativu atd. V případě lokality s kvalitními povětrnostními podmínkami, tedy vysokými rychlostmi větru, je sice turbína schopna vyrábět velké množství energie, ale o to rychleji je opotřebovávána, tudíž její servis bude stát více peněz. Podobná rovnost platí i u stáří elektrárny. Čím více let bude v provozu, tím vyšší částky budou muset být na její údržbu vynakládány. Průměrná cena ročních celkových nákladů na provoz a údržbu VtE

je přibližně 48 000 \$/MW za rok. Při přepočtu dle kurzu uvedeného v kapitole 11. se jedná o sumu cca 1 107 312 Kč/MW za rok [47]. Pro získání celkových průměrných nákladů na provoz a údržbu navržených elektráren, jsem částku za MW výkonu vynásobil s výkon jednotlivých turbín. Výsledky jsou uvedeny v tab. 13.

VtE	Náklady na provoz a údržbu za rok [Kč]
Vestas V90	2 214 624
Enercon E-101	3 377 301,6

Tab. 13 - Roční náklady na provoz a údržbu jednotlivých navržených větrných elektráren

14. Roční výnosy

Výkup vyrobené elektrické energie z VtE je v ČR uskutečňován buďto ve formě výkupní ceny nebo prostřednictvím zelených bonusů, a to v ročním nebo hodinovém režimu. Vzájemná kombinace těchto forem podpor není možná, je zapotřebí z nich jednu zvolit. Tento výběr lze však jednou za rok změnit. Právo na tyto podpory trvá po dobu životnosti elektrárny [48]. Ta je typicky předpovídána na cca 20 let [49].

14.1. Výkupní cena

Forma podpory prostřednictvím výkupní ceny zaručuje vykoupení veškerého množství elektrické energie vyrobené pomocí VtE, jež bylo naměřeno měřidlem provozovatele v místě předání, či distribuční nebo přenosové soustavy a následně přidáno do elektrizační soustavy. ERÚ pro každý rok stanovuje novou částku, za kterou se bude elektrina vykupovat. Výše výkupní ceny stanovená pro rok, ve kterém by byla elektrárna uvedena do provozu, se však stává po dobu životnosti minimální a každý rok se navyšuje o 2 % [48]. Pro rok 2019 odpovídá výkupní cena obnosu 1930 Kč/MWh včetně DPH, které činí 21 % z částky bez DPH [50], [51]. Při splnění daných technických a ekonomických podmínek je také garantována patnáctiletá prostá návratnost.

Pro získání ročního výnosu elektráren stačí hodnotu jejich celkové roční výroby vynásobit výkupní cenou za MWh. Takový výsledek bude však platný pouze pro první rok provozu. V dalších letech bude docházet ke změnám výše výkupní ceny, povětrnostních podmínek a výkonu elektrárny. Výkupní cena by měla každý rok stoupnout o 2 % a výkon, jak bylo uvedeno v kapitole 7.6., za každý rok provozu klesne asi o 1,6 %. Jako o neměnných jsem uvažoval o povětrnostních podmínkách, jelikož jsem mohl vycházet z dat rychlosti a směru větru pouze za jeden rok. Pro každý rok životnosti elektrárny jsem tedy spočítal roční výnos v závislosti na měnícím se výkonu a výkupní ceně. Kompletní výsledky jsou uvedeny v příloze

11. Zde jsou v tab. 14 demonstrativně ukázány pouze roční výnosy za první rok a průměrné roční výnosy.

VtE	Roční výnos za první rok provozu včetně DPH [Kč]	Roční výnos za první rok provozu bez DPH [Kč]	Průměrný roční výnos za 20 let životnosti bez DPH [Kč]
Vestas V90	18 322 499,78	15 142 561,80	15 683 819,54
Enercon E-101	26 961 250,80	22 282 025,45	23 078 477,14

Tab. 14 - Roční výnos za první rok provozu a průměrný roční výnos jednotlivých větrných elektráren při výkupní ceně jako formy podpory

14.2. Zelený bonus

Při volbě zeleného bonusu provozovatel VtE kromě přijímání vyplácení zeleného bonusu od OTE za veškeré množství vyrobené a naměřené elektrické energie energii také prodává, tudíž odběratel, se kterým má provozovatel smlouvu, za ní dle dodaného množství platí domluvenou částku. Jelikož provozovatel za vyrobenou elektřinu pobírá dvě částky, jedná se o výnosnější formu podpory, než je forma výkupní ceny. S tím se ovšem pojí i vyšší úroveň rizika, protože výrobce si musí odběratele sám dohledat a sám se s ním také domluvit na ceně. A není jisté, jestli nějaký odběratel bude mít o vyrobenou elektřinu vůbec zájem, popřípadě jaké množství by vykupoval. Po nalezení odběratele a podepsání smlouvy nejistota nicméně nekončí, může přijít vypovězení smlouvy či její neobnovení po vypršení platnosti, a tedy začátek nových peripetií při hledání odběratele jiného. Stejně jako u formy výkupní ceny se zelený bonus na každý rok mění a je stanovován ERÚ [48]. Pro rok 2019 dosahuje částky 1080 Kč/MWh a oproti výkupní ceně není včetně DPH [50].

Jako cenu včetně DPH, za kterou bych vyrobenou elektrickou energii případnému odběrateli prodával, jsem uvažoval průměrnou cenu elektřiny na burze za poslední tři měsíce (1.2.2019 až 30.4.2019), a sice cca 1281,3 Kč/MWh [52]. Také jsem předpokládal, že potenciální odběratel bude mít zájem o veškeré množství vyrobené elektřiny. K výpočtu celkového výnosu elektráren při volbě podpory formou zelených bonusů stačí obě zmíněné částky opět vynásobit s celkovou roční výrobou a tyto dvě hodnoty pro každou elektrárnu následně sečíst. Ovšem jako v předešlé kapitole je v i tomto výpočtu uvažovaný neměnný zelený bonus, cena prodávané elektřiny, povětrnostní podmínky a plný výkon elektrárny. Celkový roční výnos tedy bude platný pouze přibližně na první rok provozu. Vývoj zeleného bonusu, ceny prodávané elektřiny, množství prodané elektřiny a povětrnostních podmínek jsem však nebyl schopen do budoucna odhadnout, proto jsem je uvažoval jako stálé a průměrný roční výnos za 20 let životnosti elektrárny, jsem určil pouze v závislosti na poklesu

výkonu turbíny. Úplné výsledky jsou zaznamenány v příloze 12 a příloze 13. Zde jsou v tab. 15 opět v rámci demonstrativního charakteru představeny pouze roční výnosy za první rok a průměrné roční výnosy.

VtE	Roční výnos za první rok provozu bez DPH [Kč]	Průměrný roční výnos za 20 let životnosti bez DPH [Kč]
Vestas V90	20 305 939,99	17 496 584,34
Enercon E-101	29 879 849,78	25 745 930,10

Tab. 15 - Roční výnos za první rok provozu a průměrný roční výnos jednotlivých elektráren při volbě zeleného bonusu jako formy podpory

14.3. Zvolená forma podpory

Díky značné nepředvídatelnosti podpory ve formě zeleného bonusu, kterou zapříčiňují neznáme budoucí úpravy ceny zeleného bonusu podle rozhodnutí ERÚ, vývoj ceny elektřiny na burze, jež bude přibližně určovat částku, ze kterou bude odběratel ochoten elektřinu vykupovat, dále množství odebírané elektřiny odběratelem atd., jsem se rozhodl pro podporu ve formě výkupní ceny. Jak již bylo popsáno výše, u té se vykupuje veškeré množství vyrobené elektřiny a výkupní cena stanovená pro rok, ve kterém by byla elektrárna uvedena do provozu, se stává po dobu životnosti minimální a každý rok se navyšuje o 2 %. Na první pohled podle tab. 14 a tab. 15 vypadá výkupní cena oproti zelenému bonusu jako nevýhodná, ale její hlavní pozitiva tkví v prakticky stále výkupní ceně a vykupování veškeré elektřiny. Z těchto důvodů by i ekonomická zhodnocení mohla mít vyšší výpovědní hodnotu než výpočty provedené na základě formy podpory prostřednictvím zeleného bonusu.

14.4. Čistý roční zisk

Z ročních výnosů bez DPH je rovněž nutné zaplatit daň z příjmu. Při výpočtu jsem předpokládal, že by elektrárnu nevlastnila fyzická osoba, ale právnická, pro kterou v ČR platí daň z příjmu ve výši 19 %. Daň se vypočítává z tzv. daňového základu, který představuje rozdíl mezi ročními příjmy po zaplacení DPH a náklady. Jako náklady se uvažují např. částky vynaložené na provoz a údržbu, odpisy, či úroky z úvěru [52].

Při určování daňových základů pro navržené varianty VtE jsem tedy od jejich ročních výnosů bez DPH odečetl náklady na provoz a údržbu, které byly stanoveny v kapitole 13., a odpisy. Stavba elektrárny patří do 4. odpisové skupiny, pro kterou je minimální doba

odpisování 20 let. Jelikož průměrná životnost VtE je také 20 let, uvažoval jsem právě toto minimum. Odpisy ovšem nejsou po celou dobu stejné. V prvním roce se při odpisování na 20 let odpisuje 2,15 % z částky vydané na stavbu VtE a v dalších letech 5,15 % [53]. Ze zjištěného daňového základu jsem následně vypočítal daň z příjmu ve výši 19 %. Dále ke stanovení čistého ročního příjmu stačilo již pouze částku za daň odečíst od daňového základu a poté zpět přičíst odpisy, které byly při určování částky ke zdanění pouze fiktivně odečteny, ale reálně se neztratily.

Kompletní vypočtené tabulky pro každý rok provozu elektráren obsahuje buďto příloha 14 pro elektrárnu Vestas V90 nebo příloha 15 pro Enercon E-101. V této kapitole, viz tab. 16, je pro ukázkou předveden pouze čistý roční zisk za první rok provozu a průměrný čistý roční příjem za dobu životnosti.

VtE	Čistý roční zisk za první rok provozu [Kč]	Průměrný čistý roční zisk za 20 let životnosti [Kč]
Vestas V90	10 758 805,12	11 577 898,39
Enercon E-101	15 749 921,32	16 974 452,19

Tab. 16 - Čistý roční zisk za první rok provozu a průměrný čistý roční zisk

15. Ekonomické zhodnocení

15.1. Doba návratnosti

Doba návratnosti je pro investora jeden z klíčových ukazatelů, podle kterého se bude rozhodovat, jestli do projektu má či nemá vkládat svoje finanční prostředky. Zpravidla je dělena na dvě varianty – prostá doba návratnosti a reálná doba návratnosti.

15.1.1. Prostá doba návratnosti

Tato varianta slouží jako rychlé přibližné ohodnocení určitého projektu či investiční příležitosti. Do svého výpočtu nezahrnuje rozdílné příjmy v jednotlivých letech a nebere ohled na diskontní sazbu [54]. Prostou dobu návratnosti lze vyjádřit jako [55]:

$$T_s = \frac{IN}{CF} \quad (15.1)$$

T_s doba návratnosti [rok]
 IN investiční náklady [Kč]
 CF roční příjem [Kč]

Jelikož se jedná pouze o orientační dobu návratnosti, počítal jsem s průměrným čistým ročním ziskem jednotlivých elektráren. Po dosazení spolu s celkovými náklady na realizaci, které činí 70,3 a 107 mil. Kč, jsem došel k následujícím výsledkům:

VtE	Prostá doba návratnosti [rok]
Vestas V90	6,07
Enercon E-101	6,30

Tab. 17 - Prostá doba návratnosti projektů na výstavbu větrných elektráren

15.1.2. Reálná doba návratnosti

Mnohem častěji se ovšem k posouzení investice z pohledu návratnosti využívá výpočet reálné doby návratnosti, viz vztah 15.2 [55]. Ta totiž bere zřetel na diskontní míru, a sice ušlé výnosy při investici do jiného projektu, inflaci, riziko investice atd. Stanovit investiční diskontní sazbu je nicméně značně složité a vyžaduje pokročilejší ekonomické znalosti a zkušenosti. V českých firmách se běžně využívá sazba 5 % [54], [56]. Tu jsem pro svůj výpočet využil i já, ale vzhledem k zvýšenému riziku projektu jsem se s mým vedoucím práce domluvit na přičtení ještě další 2 %. Investiční náklady jsem opět uvažoval 70,3 a 107 mil. Kč a čistý roční příjem jsem dosazoval podle probíhajícího roku provozu. Počet let návratnosti je uveden v tab. 18.

$$\left(\sum_{t=1}^{T_{sd}} CF_t \cdot (1+r)^{-t} \right) - IN = 0 \quad (15.2)$$

T_{sd} doba návratnosti [rok]
 IN investiční náklady [Kč]
 CF_t roční výnos v roce t [Kč]
 r diskontní sazba [-]

VtE	Reálná doba návratnosti – půjčka + vlastní kapitál [rok]
Vestas V90	8,51
Enercon E-101	8,94

Tab. 18 - Reálná doba návratnosti projektů na výstavbu větrných elektráren

Výsledné hodnoty reálné návratnosti jsou oproti hodnotám prosté návratnosti o cca polovinu větší. To je způsobeno zejména diskontní sazbou. V obou případech se však jedná o velice příznivé návratnosti, které budou opět zapříčiněny pravděpodobným nadhodnocením modelových dat.

15.2. Čistá současná hodnota

Dalším zásadním ekonomickým kritériem vyhodnocení vhodnosti či nevhodnosti investice do projektu je čistá současná hodnota. Tento ukazatel je jedním nejoptimálnějších a nejvíce využívaných. Slouží k vypočítání sumy, kterou by realizace projektu za dobu své životnosti mohla investorovi vydělat. Stejně jako při výpočtu reálné doby návratnosti je i zde zohledněna promarněná šance investování do jiného projektu, či postupné snižování hodnoty peněz, tedy inflace. Při porovnání více investičních projektů se zpravidla dává přednost tomu s nejvyšším výsledkem čisté současné hodnoty. Záporné hodnoty jsou zde nepřípustné [56], [57]. K výsledku se lze dopracovat pomocí vzorce [55]:

$$NPV = \left(\sum_{t=1}^{T\check{z}} CF_t \cdot (1+r)^{-t} \right) - IN \quad (15.3)$$

NPV	.....	čistá současná hodnota (Net Present Value) [Kč]
$T\check{z}$	.....	doba životnosti [rok]
IN	.....	investiční náklady [Kč]
CF_t	.....	roční příjem [Kč]
r	.....	diskontní sazba [-]

Stejně jako v předchozích kapitolách jsem i zde budu počítal s investičními náklady 70,3 a 107 mil. Kč a čistý ročním příjem jsem uvažoval po jednotlivých letech provozu. Rovněž zůstala zachována i diskontní sazba 7 %.

VtE	Čistá současná hodnota [Kč]
Vestas V90	51 116 484,81
Enercon E-101	70 994 840,12

Tab. 19 - Čistá současná hodnota pro jednotlivé navržené větrné elektrárny

15.3. Vnitřní výnosové procento

Posledním často využívaným ekonomickým zhodnocením je vnitřní výnosové procento. V této metodě se hledá diskontní sazba, zde vnitřní výnosové procento, při jejímž dosažení do vzorce čisté současné hodnoty vyjde nula. Tento způsob výpočtu je ovšem oproti čisté současné hodnotě méně realistický, protože má sklon zvýhodňovat projekty s vysokou výtěžností investice, zatímco čistá současná hodnota bere zřetel na absolutní výši investice či příjmu. Vnitřní výnosové procento je vyjádřeno jako [57], [55]:

$$\left(\sum_{t=1}^{T_z} CF_t \cdot (1 + IRR)^{-t} \right) - IN = 0 \quad (15.4)$$

- IRR* vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return) [-]
T_z doba životnosti [rok]
IN investiční náklady [Kč]
CF_t roční příjem [Kč]

Při tomto výpočtu jsem uvažoval stále stejné investiční náklady, tedy 70,3 a 107 mil. Kč, rovněž čisté roční zisky po jednotlivých letech provozu a životnost po dobu 20 let.

VtE	Vnitřní výnosové procento [-]	Vnitřní výnosové procento [%]
Vestas V90	0,1519	15,19
Enercon E-101	0,1452	14,52

Tab. 20 - Vnitřní výnosové procento jednotlivých navržených větrných elektráren

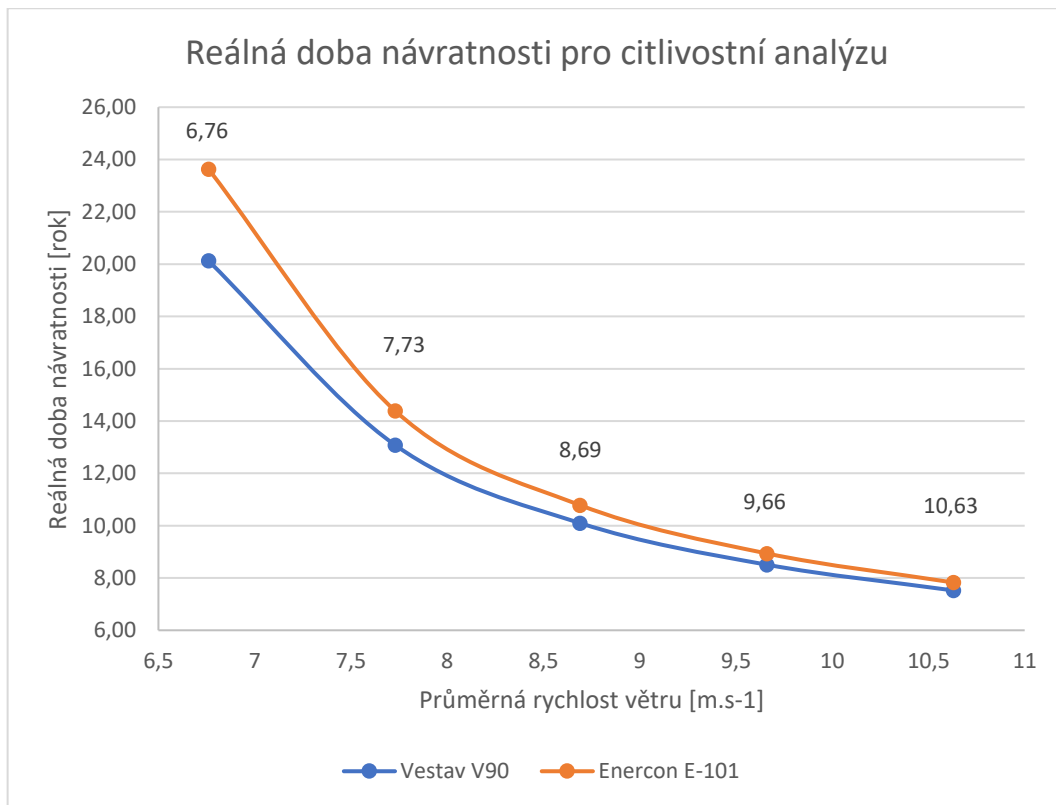
16. Citlivostní analýza

Jelikož jsou modelová data, ze kterých celá práce vychází, zatížena chybou, která po konzultaci s vedoucím práce má pravděpodobně na svědomí jejich nadhodnocení, je vhodné se zabývat otázkou „Co by kdyby?“, kterou se snaží řešit citlivostní analýza. V zásadě se jedná o zjišťování změn na výstupu v závislosti na změnách na vstupu [58].

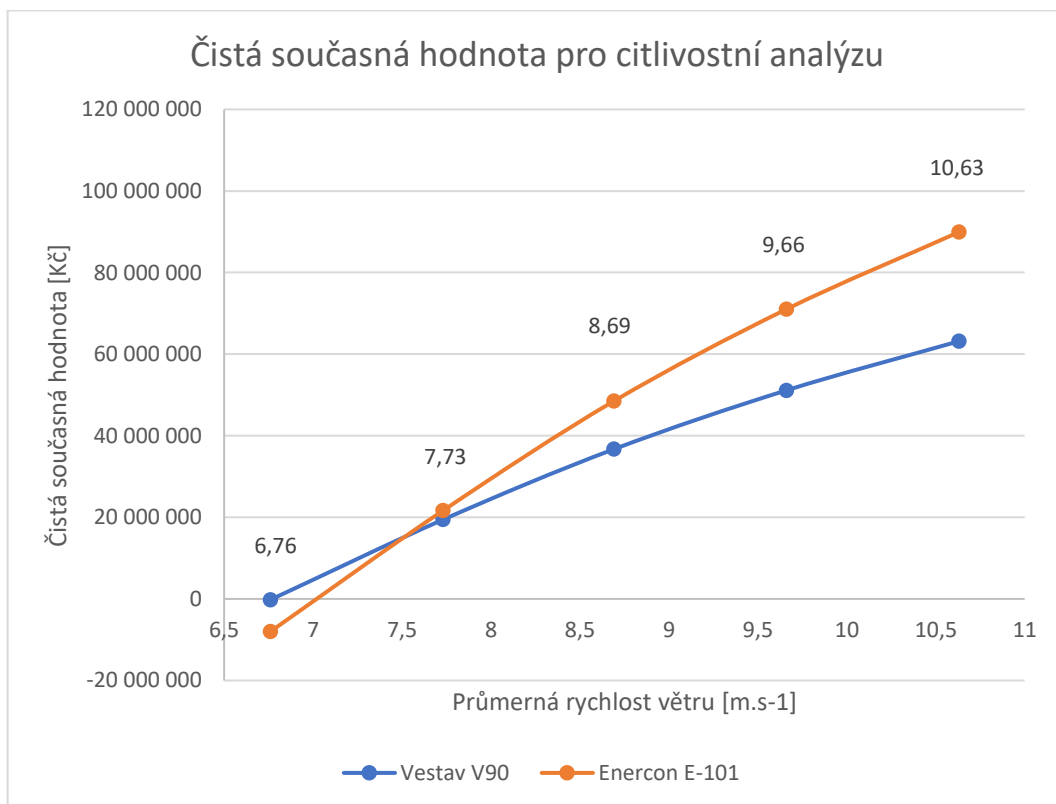
K výpočtu jsem využil jednu z nejběžněji využívaných metod, a to prosté zvýšení a snížení vstupních hodnot, a sice rychlostí větru. Ty jsem pro výpočet citlivostní analýzy zvýšil o 10 % a snížil o 10, 20 a 30 %. Jak byl napsáno výše, jelikož jsou data s největší pravděpodobností nadhodnocena, zabýval jsem se především jejich snížením, a proto jsem u zvýšení hodnot uvažoval pouze jednu variantu. Pro každou z úprav rychlostí větru jsem vypočítal množství vyrobené energie navržených elektráren, čisté roční příjmy během 20 let životnosti a všechna ekonomická zhodnocení, které jsem v práci během předchozích kapitolách provedl. Výsledky jsou uvedeny v příloze 16 a příloze 17. Z těch je patrná jejich velká citlivost na vstupní data, tedy rychlost větru. Již během snížení rychlosti větru o 30 %, se oba navržené projekty při zhodnocení čisté současné hodnoty ocitají v záporných číslech. To však notně nemusí při reálném provozu nakonec znamenat ztrátovost, ale investor by se měl mít na pozoru a pamatovat na to, že projekt se zápornou čistou současnou hodnotou se nedoporučuje. Také obě návratnosti jsou vyšší než přibližná průměrná životnost elektráren. Při ostatních úpravách rychlosti větru už však obě elektrárny dosahují kladných čísel čisté současné hodnoty a také jejich prosté i reálné návratnosti jsou pod hranicí 20 let životnosti.

Pro vypočítané hodnoty nejpoužívanějších ekonomických kritérií, tedy reálné doby návratnosti a čisté současné hodnoty, jsem vytvořil také grafické zpracování, viz graf 7 a graf 8.

Podle grafu 8 je zřejmé, že výkonnější z obou elektráren Enercon E-101 by se až do cca průměrné rychlosti větru $7,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ měla investorovi vyplatit více než Vestas V90. Od této rychlosti však nastává změna a výhodnějším projektem se stává méně výkonná Vestas V90.



Graf 7 - Reálná doba návratnosti pro různé průměrné rychlosti větru stanovené pomocí citlivostní analýzy



Graf 8 - Čistá současná hodnota pro různé průměrné rychlosti větru stanovené pomocí citlivostní analýzy

17. Závěr

Během návrhu VtE je v první řadě potřeba dbát na výběr lokality s kvalitními povětrnostními podmínkami. Takový výběr však není vůbec jednoduchý. Rychlost větru mohou ovlivňovat mnohé faktory. Mezi ty nejzákladnější se řadí struktura krajiny, kdy třecí síly při zvyšující se drsnosti povrchu rychlost větru postupně zpomalují, či přítomnost překážek v proudu větru, které zapříčiňují vznik turbulentních oblastí spolu s poklesem rychlosti větru. Dále je vítr značně ovlivněn také nadmořskou výškou. V závislosti na jejím nárůstu dochází i k postupnému zvyšování rychlosti větru.

Větrná kritéria spojená se stavbou VtE zpravidla nejlépe splňují tzv. přímořské státy. V ČR potřebným větrným předpokladům odpovídá pouze cca 1,12 % plochy celkového českého území a v převážné většině se jedná o horské oblasti.

V práci jsem pro umístění VtE zvolil Krušné hory. Konkrétně se jedná o pozemek mezi obcí Boží Dar a horou Klínovec. Data povětrnostních podmínek zvolené lokality mi byla dodána ČHMÚ, jež k jejich získání využívá SW WAsP či WEng. Tyto metody však zpravidla rychlosti větru nadhodnocují.

Z poskytnutých dat jsem stanovil charakteristiku větrné situace. Z té vyplývá, že nejvyšší četnosti za dobu jednoho roku dosahují rychlosti 6 a 7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a průměrná rychlost je dokonce 9,66 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Co se týče směru větru, tak ten převážně proudí mezi úhly 210° a 330° a v menší míře mezi úhly 60° a 120°.

Na základě zjištěných četností rychlostí větru jsem vypočítal energie větru, která ve zvolené lokalitě proudí jednotkou plochou. Během jednoho roku se jedná o energii ve výši 7 189,6 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ a o energii, jež lze maximálně dle Betzova zákona využít, 4 260,5 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.

Dále jsem pro vybranou lokalitu navrhl dvě VtE. Jedná se o Vestas V90 s výkonem 2 000 kW a Enercon E-101 disponujícím výkonem 3050 kW. Tyto dvě firmy byly vybrány záměrně, jelikož obě mají v ČR z všech značek větrných elektráren nejvyšší procenta výkonů z celkového instalovaného výkonu. Tyto turbíny by tedy měly být již dostatečně vyzkoušené a mělo by s nimi být mnoho zkušeností.

Aby bylo možné elektrárny na základě ekonomického zhodnocení porovnat, spočítal jsem množství elektrické energie, které by podle modelových dat měly být za jeden rok schopny vyrobit. V případě turbíny Vestas V90 se jedná o 9 493 523 kWh, tzn. 9 493,5 MWh, zatímco u více výkonné Enercon E-101 jde o 13 969 560 kWh, tedy 13 969,6 MWh. V obou případech je využití výkonu elektrárny nad 50 %, konkrétně 54,19 % a 52,29 %. Tyto hodnoty vysoce převyšují průměr nových instalací, který v ČR dosahuje hodnoty cca 25 %. To by buďto

mohlo být zapříčiněno kvalitním umístěním nebo nadhodnocenými daty rychlostí větru, což se po konzultaci s vedoucím práce zdá jako pravděpodobnější.

Jako formu podpory při prodeji vyrobené elektrické energie jsem zvolil výkupní cenu. Při této formě se vykupuje veškeré množství energie a výkupní cena platná pro rok, kdy byla elektrárna uvedena do provozu, se stává po dobu životnosti turbíny minimální výkupní cenou, a to s 2 % indexací každý rok. Pro rok 2019 se jedná o částku 1930 Kč/MWh včetně DPH.

Celkové náklady jsem rozdělil do třech kategorií, a sice cena elektrárny, dále přidružené náklady na stavbu (vybudování základny, vztyčení elektrárny, atd.), připojení do sítě, kabeláž, vytvoření komunikace až k elektrárně, administrativní činnost atd., a nakonec cena pozemku. Dále jsem u obou elektráren přičetl částky na nečekané náklady. V případě turbíny Vestas V90 jsem došel k celkovým realizačním nákladům ve výši 70,3 mil. Kč a u Enercon E-101 k 107 mil. Kč. Financování těchto projektů by proběhlo pomocí vlastního kapitálu investora.

Životnost VtE se v průměru pohybuje okolo 20 let. Pro tuto dobu jsem tedy spočítal čisté roční zisky. Nejprve bylo zapotřebí určit roční výnosy. Ty jsem stanovil v závislosti na snižujícím se výkonu elektrárny a navyšování výkupní ceny. Z těchto částek jsem odečetl DPH. Dále jsem stanovil daňový základ, a to odečtením nákladů a fiktivním odečtením odpisů. Po stržení daně z příjmu a znovu přičtení odpisů jsem dostal čisté roční příjmy během 20 let životnosti pro obě elektrárny.

Pro ekonomické zhodnocení jsem využil čtyři ekonomická kritéria: prostá doba návratnosti, reálná doba návratnosti, čistá současná hodnota a vnitřní výnosové procento. Kvůli zmíněnému nadhodnocení modelových dat jsem všechna tato kritéria spočítal také pro upravené rychlosti větru, tedy pro citlivostní analýzu. Z té je patrná velká citlivost projektu na vstupní hodnoty, a sice rychlosti větru. Při jejich snížení o 30 %, tzn. průměrné rychlosti $6,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, se již reálná doba návratnosti dostává u obou elektráren nad 20 let a čistá současná hodnota je v mínusu. To však notně ani u jedné elektrárny nemusí znamenat ztrátu, ale investorovi bych takový projekt popsal jako nevhodný. Při snížení rychlosti větru o 10 i 20 %, tedy při průměrných rychlostech $8,69$ a $7,73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, jsou oba projekty v kladných číslech čisté současné hodnoty a také jejich návratnosti jsou pod hranicí 20 let. Proto bych i při takovém poklesu rychlosti větru obě elektrárny mohl stále doporučit. Jako vhodnější se až do snížení rychlostí o cca 22 % jeví elektrárna Enercon E-101, jelikož do tohoto snížení má vyšší čistou současnou hodnotu. Pokud by ovšem rychlost větru klesla více, stala by se vhodnějším projektem dle čisté současné hodnoty elektrárna Vestas V90.

V první řadě bych ovšem investorovi doporučit několikaleté měření realizované přímo na vybraném pozemku, které by zaručilo zjištění rychlosti větru s co nejmenší chybou. Až na základě tohoto měření by teprve bylo možné provést zodpovědné rozhodnutí o výstavbě VtE.

Použité zdroje

- [1] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. *Obnovitelné zdroje energie*. 1999. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1998. ISBN 80-707-8445-8.
- [2] SMOLKA, Václav. Měření a zaznamenávání tlaku vzduchu. *In-počasi* [online]. b.r. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/tlak-vzduchu-4.8.2015/>
- [3] ŽÁK, Michal. Proč fouká a jak vzniká vítr?. *In-počasi* [online]. b.r. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-jak-vznika/>
- [4] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1997. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1563-7.
- [5] SMOLKA, Václav. Všeobecná cirkulace atmosféry. *In-počasi* [online]. b.r. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vseobecna-cirkulace-atmosfery/>
- [6] *Větrná energie*. Praha, 1997, 4(1). ISSN 1211-0531.
- [7] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení*. 2002. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-861-6719-4.
- [8] ŠEFTER, Jakov. *Využití energie větru*. 1991. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-030-0616-3.
- [9] CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL a Josef ŠTEKL. *Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí*. Brno: Ústav geoniky Akademie věd ČR, 2010. Studia geographica. ISBN 978-80-86407-84-5.
- [10] HANSLIAN, David a Jiří HOŠEK. *Aktualizovaný odhad realizovatelného potenciálu větrné energie z perspektivy roku 2012* [online]. Praha, 2012 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: http://csve.cz/pdf/cz/VtE_potencial2012.pdf
- [11] HANSLIAN, David. Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem II. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9800-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-ii>
- [12] HLAVÁČEK, Jan. *Primární zdroje energie* [online]. Praha: AMO, 2014 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.amo.cz/wp-content/uploads/2016/01/PSS-Primární-zdroje-energie-UNEP.pdf>
- [13] JARASS, L., L. HOFFMANN, A. JARASS a G. OBERMAIR. *Wind energy: an assessment of the technical and economic potential : a case study for the Federal Republic of Germany, commissioned by the International Energy Agency*. 1981. Berlin: Springer-Verlag, 1981. ISBN 3-540-10362-7.
- [14] KOLEKTIV AUTORŮ, . *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online]. Praha: CRUX, 2007 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf

- [15] ŠTEKL, Josef a Jiří HOŠEK. Vítr, obnovitelná energie. *Vesmír* [online]. b.r., **84**(6), 332-339 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/downloadfile.html?d=15324&f=22359&hash=6d1721aa6530d810811e312e68ddf29fc79fa0b3947249480539d0038f2cc598b60d19cc6ee8791cecb64ce1e1ca910737b8b9bde86ecd0d9292154218561a83>
- [16] CHALUPA, Štěpán a David HANSLIAN. *Analýza větrné energetiky v ČR* [online]. 2015 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: http://csve.cz/pdf/cz/KomoraOZE_analyza-potencial-OZE_dilci-VTE_log.pdf
- [17] VOBOŘIL, David. Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *OEnergetice* [online]. b.r. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [18] NELSON, Vaughn. *Wind energy: renewable energy and the environment*. 2009. Boca Raton: CRC Press, 2009. Energy and the environment (Boca Raton, Fla.). ISBN 978-1-4200-7568-7.
- [19] Strojovna větrné elektrárny bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem (výrobce ENERCON). *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. b.r. [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-\(vyrobce-enercon\)/333](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-(vyrobce-enercon)/333)
- [20] BECHNÍK, Bronislav. Roční využití výkonu větrných elektráren v České republice. *TZB-info* [online]. b.r. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/11077-rocni-vyuziti-vykonu-vetrnych-elektraren-v-ceske-republice>
- [21] JANALÍK, Radim. *Zdroje energie* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/17/IUT/098_Zdroje_energie_-_Janalik_-_P3.pdf. Individuální projekt ostatní. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky.
- [22] Systém natáčení strojovny. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. b.r. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/system-nataceni-strojovny/330>
- [23] MITTELMEIER, Niko a Martin KÜHN. Determination of optimal wind turbine alignment into the wind and detection of alignment changes with SCADA data. *Wind Energy Science* [online]. b.r., (3), 395-408 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.wind-energ-sci.net/3/395/2018/wes-3-395-2018.pdf>
- [24] Enercon E53 500 kW Power Curve. *Renewables First* [online]. b.r. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/wind-turbines/enercon-e53-800-kw-wind-turbine/attachment/e53-power-curve/>
- [25] STAFFELL, Iain a Richard GREEN. How does wind farm performance decline with age?. *Renewable Energy* [online]. 2014, **66**, 775-786 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113005727>
- [26] Větrná mapa. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. 2013 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/vetrna-mapa/601>

- [27] *Zákon č. 289/1995 Sb.: Zákon o lesích a o změně některých zákonů (lesní zákon)* [online]. b.r. [cit. 2019-04-19].
- [28] Mapa všeobecných větrných podmínek či výroby energie malou větrnou elektrárnou ve výšce 10 m nad povrchem. *ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY: AV ČR, v.v.i.* [online]. b.r. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>
- [29] Podnebí Klínovec. *Meteoblue: weather close to you* [online]. b.r. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.meteoblue.com/cs/počasí/předpověď/modelclimate/klínovec_Česko_3073595
- [30] Aktuální instalace: Mapa. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energetiku* [online]. b.r. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/aktualni-instalace>
- [31] *MAPY.CZ* [online]. Seznam.cz, b.r. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://mapy.cz/turisticka?x=12.9444444&y=50.4017077&z=17&source=coor&id=12.9444444444444444%2C50.4016666666666664>
- [32] Informace o pozemku. *ČÚZK: Nahlížení do katastru nemovitostí* [online]. b.r. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://nahlizenidokn.cuzk.cz/ZobrazObjekt.aspx?encrypted=6Jol4d_01qcO7EsplxDoFPCG9ZM22T3F4Z2sb-uz7CWmX48ec8INusxgWYU_3oTrrdBpfXH7BXVfF7ohSDbuBXUU-t-1dO_SKKqfVGTZMaVIS2btGRJV6Tvn5qYZbFA0
- [33] HRADIL, M. POUŽITÍ MODELŮ WASP A WENG PŘI ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY VĚTRNÉ EROZE. STŘEDOVIÁ, Hana, Jaroslav ROŽNOVSKÝ a Tomáš LITSCHMANN. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí: sborník abstraktů z mezinárodní konference : Skalní mlýn 2.-4.2.2011* [online]. Praha: Česká bioklimatická společnost v nakl. Český hydrometeorologický ústav, 2011 [cit. 2019-04-20]. ISBN 978-80-86690-87-2.
- [34] Nejvyšší hora Klínovec (1244m). *Turistický portál Karlovarského kraje* [online]. b.r. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://cestovani.kr-karlovarsky.cz/cz/pronavstevniky/Priroda/hory/Krusnehory/Stranky/Klinovec.aspx>
- [35] Instalace větrných elektráren v ČR podle výrobce v MW. *ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/grafy/280>
- [36] V90-2.0 MW™ at a glance. *Vestas* [online]. 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2_0_mw#!at-a-glance
- [37] Vestas V90. *Wind Turbine Models* [online]. 2017 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/16-vestas-v90#powercurve>
- [38] What is a wind class?. *LM Wind Power: A GE Renewable Energy business* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/learn-about-wind/what-is-a-wind-class>
- [39] Větrná energie: Systémy regulace. *WEB Větrná energie s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: https://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27

- [40] ENERCON product overview: The most suitable wind energy converter for every location. *Enercon* [online]. b.r. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON_Produkt_en_06_2015.pdf
- [41] *GetData Graph Digitizer: Digitizing software. Digitize scanned graphs and get original (x,y) data.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://getdata-graph-digitizer.com/index.php>
- [42] 2H 2017 Wind Turbine Price Index. *BloombergNEF* [online]. 2018 [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/>
- [43] Dolar, Americký dolar USD, kurzy měn. *Kurzy.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/nejlepsi-kurzy/USD-americky-dolar/>
- [44] How much does a wind turbine cost?. *Renewables First* [online]. 2015 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.renewablesfirst.co.uk/windpower/windpower-learning-centre/how-much-does-a-farm-wind-turbine-small-wind-farm-turbine-cost/>
- [45] Ceník pozemků. In: *Oficiální web města Jáchymov* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://www.mestojachymov.cz/assets/File.ashx?id_org=5643&id_dokumenty=4672
- [46] EKatalog BPEJ. *Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://bpej.vumop.cz/93624>
- [47] US wind O&M costs estimated at \$48,000/MW; Falling costs create new industrial uses: IEA. *New Energy Update* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://newenergyupdate.com/wind-energy-update/us-wind-om-costs-estimated-48000mw-falling-costs-create-new-industrial-uses-iea>
- [48] Často kladené dotazy. *Energetický regulační úřad* [online]. b.r. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy#16>
- [49] Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. b.r., **82**, 1261-1271 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117313503>
- [50] Energetický regulační věstník. *Energetický regulační úřad* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/4697359/ERV_6_2018.pdf/b19eac97-d73e-472d-8105-d4e119a69cb8
- [51] BOHDALOVÁ, Marie. Vše, co je potřeba vědět o DPH. *IÚčto* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.iucto.cz/vse-co-je-potreba-vedet-o-dph/>
- [52] Elektřina - aktuální a historické ceny elektřiny, graf vývoje ceny elektřiny - od 01.02.2018 - měna CZK. *Kurzy.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/index.asp?A=5&idk=142&od=01.02.2018&do=30.04.2019&curr=CZK>

- [53] JINDROVÁ, Blanka. Daňové odpisy hmotného majetku. *Daně, účetnictví, právo, práce a mzdy pro profesionály* [online]. b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.du.cz/33/danove-odpisy-hmotneho-majetku-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Es4XQMkyMVpZz2H1GXiiY0/>
- [54] CHADIM, Tomáš. Výpočtová pomůcka EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST INVESTIC (II) Příklad použití. *TZBinfo* [online]. b.r. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/2786-vypoctova-pomucka-ekonomicka-efektivnost-investic-ii>
- [55] Slovník ekonomických pojmů. *INKAPO: Inženýrská kancelář a poradenství* [online]. c2011-2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.inkapo.cz/odborna-sekce/slovník-pojmu/ekonomika>
- [56] ZIKMUND, Martin. Hodnocení investic: Čistá současná hodnota (NPV) stručně a jasně. *Business vize* [online]. b.r. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.businessvize.cz/rizeni-a-optimalizace/hodnoceni-investic-cista-soucasna-hodnota-npv-strucne-a-jasne>
- [57] Čistá současná hodnota (ČSH/NPV). *Febmat* [online]. b.r. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.febmat.com/clanek-cista-soucasna-hodnota-csh-npv/>
- [58] KENTON, Will. Sensitivity Analysis. *Investopedia* [online]. b.r. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/s/sensitivityanalysis.asp>

Seznam obrázků

Obr. 1 - Vliv změn drsnosti povrchu na rychlostní profil: a) změna povrchu z jemné struktury na hrubou b) změna povrchu z hrubé struktury na jemnou [4].....	14
Obr. 2 - Větrná růžice [9].....	17
Obr. 3 - Četnost rychlostí větru [9].....	18
Obr. 4 - Hustota výkonu větru v ČR ve výšce 40 m [14].....	23
Obr. 5 - Oblasti s dostatečným větrným potenciálem a vyznačená chráněná území [10].....	25
Obr. 6 - Výkonová křivka pro větrnou elektrárnu Enercon E-53 o výkonu 500 kW [24].....	30
Obr. 7 - Průměrné rychlosti v ČR ve výšce 100 m nad povrchem [26].....	32
Obr. 8 - Umístění větrné elektrárny [31].....	33
Obr. 9 - Poměr VtE v ČR podle instalovaného výkonu na výrobce [35].....	38

Seznam tabulek

Tab. 1 - Závislost exponentu drsnosti n na třídě povrchu [4]	14
Tab. 2 - Ztráta výkonu v závislosti na rostoucí nadmořské výšce [6]	20
Tab. 3 - Základní informace o pozemku z katastru nemovitostí [32]	33
Tab. 4 - Základní technické informace o elektrárně Vestas V90 [37].....	39
Tab. 5 - Třídy větru dle IEC [38]	40
Tab. 6 - Základní technické informace o elektrárně Enercon E-101 [40]	41
Tab. 7 - Využití výkonu Vestas V90.....	46
Tab. 8 - Využití výkonu Enercon E-101	46
Tab. 9 - Cena jednotlivých navržených větrných elektráren	47
Tab. 10 - Přidružené náklady na realizaci jednotlivých navržených větrných elektráren	47
Tab. 11 - Cena pozemku	48
Tab. 12 - Celkové výdaje potřebné k realizaci jednotlivých navržených větrných elektráren	48
Tab. 13 - Roční náklady na provoz a údržbu jednotlivých navržených větrných elektráren.....	49
Tab. 14 - Roční výnos za první rok provozu a průměrný roční výnos jednotlivých větrných elektráren při výkupní ceně jako formy podpory	50
Tab. 15 - Roční výnos za první rok provozu a průměrný roční výnos jednotlivých elektráren při volbě zeleného bonusu jako formy podpory	51
Tab. 16 - Čistý roční zisk za první rok provozu a průměrný čistý roční zisk.....	52
Tab. 17 - Prostá doba návratnosti projektů na výstavbu větrných elektráren	53
Tab. 18 - Reálná doba návratnosti projektů na výstavbu větrných elektráren.....	54
Tab. 19 - Čistá současná hodnota pro jednotlivé navržené větrné elektrárny	55
Tab. 20 - Vnitřní výnosové procento jednotlivých navržených větrných elektráren	55

Seznam grafů

Graf 1 - Četnost rychlostí větru zvolené lokality	35
Graf 2 - Větrná růžice zvolené lokality	36
Graf 3 - Výkonová křivka pro větrnou elektrárnu Vestas V90 [40]	40
Graf 4 - Výkonová křivka pro větrnou elektrárnu Enercon E-101 [40].....	42
Graf 5 - Srovnání teoretické, maximálně využitelné a vyrobené energie pro větrnou elektrárnu Vestas V90	44
Graf 6 - Srovnání teoretické, maximálně využitelné a vyrobené energie pro větrnou elektrárnu Enercon E-101	45
Graf 7 - Reálná doba návratnosti pro různé průměrné rychlosti větru stanovené pomocí citlivostní analýzy.....	57
Graf 8 - Čistá současná hodnota pro různé průměrné rychlosti větru stanovené pomocí citlivostní analýzy.....	57

Seznam příloh

Příloha 1 - Četnost rychlostí větru v závislosti na úhlu větru za jeden rok v hodinách	69
Příloha 2 - Energie větru protékající jednotkovou plochou během jednoho roku v MJ·m ⁻²	70
Příloha 3 - Energie větru protékající jednotkovou plochou během jednoho roku v kWh·m ⁻²	71
Příloha 4 - Maximálně možné využití energie větru protékající jednotkovou plochou během jednoho roku v kWh·m ⁻²	72
Příloha 5 - Energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Vestas V90 během jednoho roku v kWh	73
Příloha 6 - Maximálně možné využití energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Vestas V90 dle Betzova zákona za jeden rok v kWh	74
Příloha 7 - Elektrická energie vyrobená větrnou elektrárnou Vestas V90 během jednoho roku v kWh	75
Příloha 8 - Energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Enercon E-101 během jednoho roku v kWh	76
Příloha 9 - Maximálně možné využití energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Enercon E-101 dle Betzova zákona za jeden rok v kWh.....	77
Příloha 10 - Elektrická energie vyrobená větrnou elektrárnou Enercon E-101 během jednoho roku v kWh.....	78
Příloha 11 - Roční výnosy jednotlivých větrných elektráren při volbě výkupní ceny jako formy podpory	79
Příloha 12 - Roční výnosy větrné elektrárny Vestas V90 při volbě zeleného bonusu jako formy podpory	80
Příloha 13 - Roční výnosy větrné elektrárny Enercon E-101 při volbě zeleného bonusu jako formy podpory	81
Příloha 14 - Čistý roční zisk větrné elektrárny Vestas V90 při volbě výkupní ceny jako formy podpory	82
Příloha 15 - Čistý roční zisk větrné elektrárny Enercon E-101 při volbě výkupní ceny jako formy podpory	83
Příloha 16 - Citlivostní analýza pro větrnou elektrárnu Vestas V90.....	84
Příloha 17 - Citlivostní analýza pro větrnou elektrárnu Enercon E-101	84

Příloha 1 - Četnost rychlostí větru v závislosti na úhlu větru za jeden rok v hodinách

		Úhel větru [°]											Celkem		
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)		(330;360)	
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	1	1	6	5	0	3	1	4	4	5	3	0	33	
	(1;2)	4	3	8	19	9	5	6	6	23	37	13	1	134	
	(2;3)	9	14	19	39	32	21	5	13	45	67	40	15	319	
	(3;4)	10	17	46	44	35	33	16	27	69	84	50	23	454	
	(4;5)	6	16	57	77	47	60	15	26	91	139	76	36	646	
	(5;6)	20	34	65	91	61	58	21	36	91	170	87	33	767	
	(6;7)	22	24	77	78	39	73	36	60	93	181	97	40	820	
	(7;8)	23	32	82	65	52	60	39	48	93	103	100	47	744	
	(8;9)	38	49	86	57	35	61	52	62	88	84	89	37	738	
	(9;10)	48	59	65	24	19	40	67	71	85	54	84	32	648	
	(10;11)	42	56	56	23	20	44	92	74	68	46	52	30	603	
	(11;12)	37	42	59	30	16	37	80	59	67	32	49	23	531	
	(12;13)	27	61	43	22	12	20	74	68	71	8	33	11	450	
	(13;14)	20	38	29	14	5	15	71	76	40	5	20	17	350	
	(14;15)	7	60	28	8	0	5	61	68	43	0	8	6	294	
	(15;16)	11	45	18	7	0	3	53	56	25	3	12	4	237	
	(16;17)	4	32	12	2	0	4	45	62	22	1	5	6	195	
	(17;18)	2	24	10	1	0	4	38	62	12	0	4	0	157	
	(18;19)	1	20	6	0	0	0	23	61	10	0	2	2	125	
	(19;20)	0	11	5	0	0	2	16	53	6	0	2	3	98	
	(20;21)	0	4	5	0	0	0	11	50	10	0	1	3	84	
	(21;22)	0	4	2	0	0	0	7	41	3	0	1	1	59	
	(22;23)	0	2	2	0	0	0	6	43	1	0	0	1	55	
	(23;24)	0	3	1	0	0	0	4	31	1	0	0	0	40	
(24;25)	0	1	1	0	0	0	2	24	1	0	0	0	29		
Celkem		332	652	788	606	382	548	841	1181	1062	1019	828	371	8610	

Příloha 2 - Energie větru protékající jednotkovou plochou během jednoho roku v MJ·m⁻²

		Úhel větru [°]											Celkem	
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)		(330;360)
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0,0001	0,0020	0,0061	0,0038	0	0,0050	0,0014	0,0029	0,0046	0,0029	0,0033	0	0,0321
	(1;2)	0,0360	0,0329	0,0826	0,1604	0,0710	0,0451	0,0341	0,0743	0,2163	0,3494	0,0871	0,0026	1,1918
	(2;3)	0,3422	0,5029	0,7217	1,4161	1,1936	0,7137	0,1616	0,4656	1,6366	2,2301	1,3339	0,5456	11,2636
	(3;4)	0,9271	1,4844	4,2456	3,8957	3,3171	2,9906	1,4653	2,5253	6,0844	8,3768	4,3967	1,9287	41,6377
	(4;5)	1,1955	3,0098	11,1446	14,3544	8,8740	11,7561	2,7803	5,0735	17,6280	26,6470	14,8951	7,1014	124,4597
	(5;6)	7,0638	11,3777	22,8489	30,9434	20,1327	20,7251	7,1769	12,2646	31,7155	58,2549	30,4744	11,0807	264,0586
	(6;7)	12,0819	13,7778	43,6048	43,7516	21,5468	40,5923	20,2021	33,7854	51,4382	101,6310	55,8183	22,5529	460,7829
	(7;8)	20,1242	28,0874	71,4349	55,1262	44,3571	50,4923	32,2594	41,4303	78,9603	87,4476	85,2632	40,7388	635,7216
	(8;9)	48,4243	61,3540	104,8193	70,6822	42,4752	76,8502	66,0999	77,5528	110,0436	103,4436	108,5306	47,1729	917,4487
	(9;10)	83,7801	102,8620	111,9466	41,3397	33,4523	70,3380	116,4727	124,4839	150,1449	91,0022	144,4661	54,8942	1125,1825
	(10;11)	96,8235	132,0502	129,4955	53,3165	47,0404	103,6324	215,5549	174,8655	158,1178	107,6634	121,6325	67,1509	1407,3435
	(11;12)	113,2232	130,0688	183,7492	92,5688	48,7340	110,9783	242,6209	183,4598	204,7451	96,7159	149,6930	69,5564	1626,1136
	(12;13)	105,9240	239,9521	169,4201	88,7262	47,8403	78,5966	290,1725	268,9036	278,6566	31,9128	129,7136	41,9191	1771,7376
	(13;14)	97,3379	183,7962	142,1964	68,8497	25,3477	72,6468	345,4641	375,1563	195,3338	24,3641	100,2982	86,2757	1717,0669
	(14;15)	42,7139	365,4484	170,1036	48,9196	0	28,6928	373,4828	417,6283	263,3001	0,0000	49,3897	36,1245	1795,8037
	(15;16)	81,1908	336,6116	133,8645	50,9569	0	22,9499	392,0606	422,7069	185,4795	21,6359	89,4324	29,7830	1766,6719
	(16;17)	36,2312	282,1311	111,4298	18,0172	0	35,4049	411,5180	553,3451	200,7800	8,2915	45,6478	53,5914	1756,3878
	(17;18)	21,2961	251,2046	104,7071	10,2871	0	42,0913	407,1964	670,9053	128,9762	0	41,5156	0	1678,1796
	(18;19)	11,9776	248,2592	73,8792	0	0	0	289,7237	775,5727	125,5213	0	25,1947	25,8036	1575,9320
	(19;20)	0	163,7320	75,0894	0	0	30,6169	241,5388	773,7566	88,2241	0	29,0129	46,0581	1448,0289
	(20;21)	0	67,7502	85,8958	0	0	0	184,1153	867,1602	172,0384	0	17,6225	51,1347	1445,7170
	(21;22)	0	79,2977	40,8907	0	0	0	137,7402	816,0298	59,5445	0	18,9305	20,8683	1173,3018
	(22;23)	0	45,8923	44,6638	0	0	0	135,5445	977,5628	21,7377	0	0	23,8595	1249,2606
	(23;24)	0	75,4287	27,4656	0	0	0	107,1642	808,9211	25,4567	0	0	0	1044,4364
(24;25)	0	28,5085	27,8103	0	0	0	58,4831	699,3678	30,6728	0	0	0	844,8426	
Celkem	780,6932	2852,6225	1891,5161	693,3153	344,3819	800,1185	4079,0335	9083,0006	2586,4572	769,9691	1263,3519	738,1431	25882,6031	

Příloha 3 - Energie větru protékající jednotkovou plochou během jednoho roku v kWh·m⁻²

		Úhel větru [°]												Celkem
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)	(330;360)	
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	0,0006	0,0017	0,0011	0	0,0014	0,0004	0,0008	0,0013	0,0008	0,0009	0	0,0089
	(1;2)	0,0100	0,0091	0,0229	0,0446	0,0197	0,0125	0,0095	0,0206	0,0601	0,0970	0,0242	0,0007	0,3311
	(2;3)	0,0950	0,1397	0,2005	0,3934	0,3316	0,1983	0,0449	0,1293	0,4546	0,6195	0,3705	0,1515	3,1288
	(3;4)	0,2575	0,4123	1,1793	1,0821	0,9214	0,8307	0,4070	0,7015	1,6901	2,3269	1,2213	0,5357	11,5660
	(4;5)	0,3321	0,8361	3,0957	3,9873	2,4650	3,2656	0,7723	1,4093	4,8967	7,4019	4,1375	1,9726	34,5721
	(5;6)	1,9622	3,1605	6,3469	8,5954	5,5924	5,7570	1,9936	3,4068	8,8099	16,1819	8,4651	3,0780	73,3496
	(6;7)	3,3561	3,8272	12,1124	12,1532	5,9852	11,2756	5,6117	9,3848	14,2884	28,2308	15,5051	6,2647	127,9953
	(7;8)	5,5901	7,8020	19,8430	15,3128	12,3214	14,0256	8,9609	11,5084	21,9334	24,2910	23,6842	11,3163	176,5893
	(8;9)	13,4512	17,0428	29,1165	19,6339	11,7987	21,3473	18,3611	21,5425	30,5677	28,7343	30,1474	13,1036	254,8469
	(9;10)	23,2722	28,5728	31,0963	11,4832	9,2923	19,5383	32,3535	34,5789	41,7069	25,2784	40,1295	15,2484	312,5507
	(10;11)	26,8954	36,6806	35,9710	14,8101	13,0668	28,7868	59,8763	48,5737	43,9216	29,9065	33,7868	18,6530	390,9287
	(11;12)	31,4509	36,1302	51,0415	25,7136	13,5372	30,8273	67,3947	50,9611	56,8736	26,8655	41,5814	19,3212	451,6982
	(12;13)	29,4233	66,6534	47,0611	24,6462	13,2890	21,8324	80,6035	74,6955	77,4046	8,8647	36,0315	11,6442	492,1493
	(13;14)	27,0383	51,0545	39,4990	19,1249	7,0410	20,1797	95,9623	104,2101	54,2594	6,7678	27,8606	23,9655	476,9630
	(14;15)	11,8650	101,5134	47,2510	13,5888	0	7,9702	103,7452	116,0079	73,1389	0	13,7194	10,0346	498,8344
	(15;16)	22,5530	93,5032	37,1846	14,1547	0	6,3750	108,9057	117,4186	51,5221	6,0100	24,8423	8,2731	490,7422
	(16;17)	10,0642	78,3698	30,9527	5,0048	0	9,8347	114,3105	153,7070	55,7722	2,3032	12,6799	14,8865	487,8855
	(17;18)	5,9156	69,7791	29,0853	2,8575	0	11,6920	113,1101	186,3626	35,8267	0	11,5321	0	466,1610
	(18;19)	3,3271	68,9609	20,5220	0	0	0	80,4788	215,4369	34,8670	0	6,9985	7,1677	437,7589
	(19;20)	0	45,4811	20,8582	0	0	8,5047	67,0941	214,9324	24,5067	0	8,0591	12,7939	402,2302
	(20;21)	0	18,8195	23,8600	0	0	0	51,1431	240,8778	47,7884	0	4,8951	14,2041	401,5881
	(21;22)	0	22,0272	11,3585	0	0	0	38,2612	226,6749	16,5401	0	5,2585	5,7968	325,9172
	(22;23)	0	12,7479	12,4066	0	0	0	37,6512	271,5452	6,0383	0	0	6,6276	347,0168
	(23;24)	0	20,9524	7,6293	0	0	0	29,7678	224,7003	7,0713	0	0	0	290,1212
	(24;25)	0	7,9190	7,7251	0	0	0	16,2453	194,2688	8,5202	0	0	0	234,6785
Celkem	216,8592	792,3951	525,4211	192,5876	95,6616	222,2551	1133,0649	2523,0557	718,4603	213,8803	350,9311	205,0398	7189,6120	

Příloha 4 - Maximálně možné využití energie větru protékající jednotkovou plochou během jednoho roku v kWh·m⁻²

		Úhel [°]												
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)	(330;360)	Celkem
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	0,0003	0,0010	0,0006	0	0,0008	0,0002	0,0005	0,0008	0,0005	0,0005	0	0,0053
	(1;2)	0,0059	0,0054	0,0136	0,0264	0,0117	0,0074	0,0056	0,0122	0,0356	0,0575	0,0143	0,0004	0,1962
	(2;3)	0,0563	0,0828	0,1188	0,2331	0,1965	0,1175	0,0266	0,0766	0,2694	0,3671	0,2196	0,0898	1,8541
	(3;4)	0,1526	0,2443	0,6989	0,6413	0,5460	0,4923	0,2412	0,4157	1,0016	1,3789	0,7237	0,3175	6,8539
	(4;5)	0,1968	0,4954	1,8345	2,3629	1,4607	1,9352	0,4577	0,8351	2,9017	4,3863	2,4519	1,1690	20,4872
	(5;6)	1,1628	1,8729	3,7611	5,0936	3,3140	3,4115	1,1814	2,0189	5,2207	9,5893	5,0164	1,8240	43,4664
	(6;7)	1,9888	2,2680	7,1777	7,2019	3,5468	6,6819	3,3254	5,5614	8,4672	16,7294	9,1882	3,7124	75,8490
	(7;8)	3,3126	4,6234	11,7588	9,0743	7,3016	8,3115	5,3102	6,8198	12,9976	14,3947	14,0351	6,7060	104,6455
	(8;9)	7,9711	10,0994	17,2542	11,6349	6,9918	12,6502	10,8806	12,7659	18,1142	17,0278	17,8651	7,7651	151,0204
	(9;10)	13,7910	16,9320	18,4274	6,8049	5,5065	11,5783	19,1725	20,4912	24,7152	14,9798	23,7804	9,0361	185,2152
	(10;11)	15,9380	21,7367	21,3161	8,7764	7,7433	17,0588	35,4823	28,7844	26,0276	17,7224	20,0218	11,0536	231,6615
	(11;12)	18,6376	21,4105	30,2468	15,2377	8,0221	18,2680	39,9376	30,1992	33,7029	15,9203	24,6408	11,4496	267,6730
	(12;13)	17,4361	39,4983	27,8881	14,6051	7,8749	12,9377	47,7650	44,2640	45,8694	5,2531	21,3520	6,9003	291,6440
	(13;14)	16,0227	30,2545	23,4068	11,3333	4,1725	11,9583	56,8665	61,7541	32,1537	4,0106	16,5100	14,2018	282,6448
	(14;15)	7,0311	60,1561	28,0006	8,0526	0	4,7231	61,4786	68,7454	43,3416	0	8,1300	5,9464	295,6056
	(15;16)	13,3647	55,4093	22,0353	8,3880	0	3,7778	64,5367	69,5814	30,5316	3,5615	14,7214	4,9026	290,8102
	(16;17)	5,9640	46,4413	18,3423	2,9658	0	5,8280	67,7396	91,0856	33,0502	1,3649	7,5140	8,8216	289,1173
	(17;18)	3,5055	41,3506	17,2357	1,6934	0	6,9286	67,0282	110,4371	21,2307	0	6,8338	0	276,2436
	(18;19)	1,9716	40,8657	12,1612	0	0	0	47,6911	127,6663	20,6619	0	4,1473	4,2475	259,4127
	(19;20)	0	26,9518	12,3604	0	0	5,0398	39,7595	127,3673	14,5225	0	4,7758	7,5816	238,3587
	(20;21)	0	11,1523	14,1392	0	0	0	30,3070	142,7424	28,3191	0	2,9008	8,4172	237,9781
	(21;22)	0	13,0531	6,7310	0	0	0	22,6733	134,3259	9,8016	0	3,1161	3,4351	193,1361
	(22;23)	0	7,5543	7,3521	0	0	0	22,3118	160,9157	3,5782	0	0	3,9275	205,6396
	(23;24)	0	12,4163	4,5211	0	0	0	17,6402	133,1557	4,1904	0	0	0	171,9237
(24;25)	0	4,6928	4,5778	0	0	0	9,6269	115,1223	5,0490	0	0	0	139,0687	
Celkem	128,5092	469,5675	311,3607	114,1260	56,6884	131,7068	671,4458	1495,1441	425,7543	126,7439	207,9592	121,5050	4260,5108	

Příloha 5 - Energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Vestas V90 během jednoho roku v kWh

		Úhel [°]												Celkem
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)	(330;360)	
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	4	11	7	0	9	3	5	8	5	6	0	57
	(1;2)	64	58	146	284	125	80	60	131	382	617	154	5	2106
	(2;3)	605	889	1275	2503	2109	1261	286	823	2892	3941	2357	964	19905
	(3;4)	1638	2623	7503	6884	5862	5285	2589	4463	10753	14804	7770	3408	73583
	(4;5)	2113	5319	19695	25367	15682	20776	4913	8966	31153	47091	26323	12550	219948
	(5;6)	12483	20107	40379	54684	35579	36626	12683	21674	56048	102949	53855	19582	466650
	(6;7)	21351	24348	77059	77319	38078	71736	35702	59706	90903	179605	98643	39856	814306
	(7;8)	35564	49637	126241	97420	78389	89231	57009	73217	139540	154539	150679	71994	1123461
	(8;9)	85577	108426	185239	124911	75063	135811	116813	137053	194472	182808	191798	83365	1621336
	(9;10)	148058	181780	197834	73056	59118	124303	205833	219991	265339	160821	255304	97010	1988448
	(10;11)	171109	233362	228847	94222	83131	183141	380933	309026	279429	190265	214952	118671	2487089
	(11;12)	200091	229861	324726	163590	86124	196123	428765	324214	361830	170919	264541	122922	2873704
	(12;13)	187191	424049	299403	156799	84544	138898	512799	475212	492448	56397	229233	74080	3131054
	(13;14)	172018	324809	251293	121673	44795	128383	610512	662985	345198	43057	177249	152468	3034439
	(14;15)	75485	645829	300611	86452	0	50707	660027	738042	465310	0	87283	63840	3173584
	(15;16)	143482	594867	236568	90052	0	40558	692858	747017	327784	38235	158047	52633	3122102
	(16;17)	64029	498588	196921	31840	0	62568	727244	977884	354823	14653	80670	94708	3103928
	(17;18)	37635	443934	185041	18180	0	74385	719606	1185639	227930	0	73367	0	2965716
	(18;19)	21167	438729	130561	0	0	0	512006	1370609	221824	0	44525	45601	2785022
	(19;20)	0	289351	132700	0	0	54107	426853	1367400	155912	0	51272	81395	2558989
	(20;21)	0	119730	151797	0	0	0	325373	1532465	304030	0	31143	90366	2554903
	(21;22)	0	140137	72263	0	0	0	243418	1442106	105228	0	33454	36879	2073485
	(22;23)	0	81102	78931	0	0	0	239537	1727571	38415	0	0	42165	2207721
	(23;24)	0	133299	48538	0	0	0	189383	1429543	44988	0	0	0	1845751
	(24;25)	0	50381	49147	0	0	0	103353	1235938	54206	0	0	0	1493025
Celkem	1379658	5041218	3342729	1225242	608599	1413987	7208559	16051680	4570845	1360706	2232624	1304463	45740311	

Příloha 6 - Maximálně možné využití energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Vestas V90 dle Betzova zákona za jeden rok v kWh

		Úhel [°]												Celkem
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)	(330;360)	
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	2	6	4	0	5	2	3	5	3	3	0	34
	(1;2)	38	34	87	168	74	47	36	78	226	366	91	3	1248
	(2;3)	358	527	756	1483	1250	747	169	488	1714	2335	1397	571	11796
	(3;4)	971	1555	4446	4080	3474	3132	1534	2645	6372	8773	4604	2020	43605
	(4;5)	1252	3152	11671	15033	9293	12312	2912	5313	18461	27906	15599	7437	130339
	(5;6)	7397	11915	23928	32405	21084	21704	7516	12844	33214	61007	31914	11604	276533
	(6;7)	12653	14429	45665	45818	22565	42510	21156	35382	53868	106432	58455	23618	482552
	(7;8)	21075	29414	74810	57731	46453	52878	33783	43388	82691	91579	89291	42663	665755
	(8;9)	50712	64253	109771	74021	44482	80481	69223	81217	115242	108331	113658	49401	960792
	(9;10)	87738	107721	117235	43293	35033	73661	121975	130365	157238	95301	151291	57488	1178339
	(10;11)	101398	138289	135613	55835	49263	108528	225738	183127	165588	112750	127379	70323	1473830
	(11;12)	118572	136214	192430	96942	51036	116221	254083	192127	214418	101285	156765	72842	1702936
	(12;13)	110928	251288	177424	92918	50100	82310	303881	281607	291821	33420	135842	43900	1855439
	(13;14)	101936	192479	148914	72102	26545	76079	361785	392880	204562	25515	105037	90352	1798186
	(14;15)	44732	382713	178140	51231	0	30048	391127	437358	275739	0	51723	37831	1880643
	(15;16)	85026	352514	140189	53364	0	24034	410583	442677	194242	22658	93657	31190	1850134
	(16;17)	37943	295460	116694	18868	0	37078	430959	579487	210265	8683	47804	56123	1839365
	(17;18)	22302	263072	109654	10773	0	44080	426433	702601	135069	0	43477	0	1757462
	(18;19)	12543	259988	77369	0	0	0	303411	812213	131451	0	26385	27023	1650383
	(19;20)	0	171467	78637	0	0	32063	252950	810311	92392	0	30384	48234	1516438
	(20;21)	0	70951	89954	0	0	0	192813	908127	180166	0	18455	53550	1514017
	(21;22)	0	83044	42823	0	0	0	144247	854581	62358	0	19825	21854	1228732
	(22;23)	0	48060	46774	0	0	0	141948	1023746	22765	0	0	24987	1308279
	(23;24)	0	78992	28763	0	0	0	112227	847137	26659	0	0	0	1093778
(24;25)	0	29855	29124	0	0	0	61246	732408	32122	0	0	0	884755	
Celkem	817575	2987388	1980877	726070	360651	837918	4271738	9512107	2708649	806345	1323036	773015	27105370	

Příloha 7 - Elektrická energie vyrobená větrnou elektrárnou Vestas V90 během jednoho roku v kWh

		Úhel [°]												Celkem
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)	(330;360)	
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1;2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(2;3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(3;4)	565,0	832,0	2510,9	2194,3	2018,5	1734,9	836,2	1512,6	3413,1	5309,9	2452,6	1020,3	24400,3
	(4;5)	996,0	2497,6	9273,9	11854,4	7362,9	9823,8	2304,3	4220,5	14662,2	22142,9	12390,2	5924,1	103452,8
	(5;6)	6384,7	10215,6	20634,3	27831,1	18065,6	18734,4	6472,0	11040,6	28608,9	52458,8	27503,7	9946,6	237896,3
	(6;7)	10840,4	12328,3	39029,1	39210,1	19324,4	36399,7	18095,4	30254,5	46134,6	91054,7	49917,0	20193,4	412781,6
	(7;8)	17616,5	24539,5	62440,0	48274,5	38792,5	44216,0	28250,0	36205,5	69123,5	76574,5	74626,5	35636,5	556295,5
	(8;9)	41906,6	53142,5	90808,3	61238,5	36790,1	66579,7	57230,0	67155,5	95261,2	89603,3	93992,7	40827,6	794536,0
	(9;10)	69379,1	85176,0	92978,8	34331,9	27641,9	58198,9	96640,9	103121,1	124032,8	75975,2	120172,1	45715,6	933364,3
	(10;11)	72869,8	98272,6	97311,4	40079,2	35064,8	77272,8	161037,4	130192,8	118565,2	80492,2	90929,4	51283,0	1053370,6
	(11;12)	71844,2	81861,2	115143,0	58409,3	31068,6	71499,3	154996,4	114975,0	129988,7	61962,6	95147,9	44529,6	1031425,8
	(12;13)	54000,0	122000,0	86000,0	44000,0	24000,0	40000,0	148000,0	136000,0	142000,0	16000,0	66000,0	22000,0	900000,0
	(13;14)	40000,0	76000,0	58000,0	28000,0	10000,0	30000,0	142000,0	152000,0	80000,0	10000,0	40000,0	34000,0	700000,0
	(14;15)	14000,0	120000,0	56000,0	16000,0	0	10000,0	122000,0	136000,0	86000,0	0	16000,0	12000,0	588000,0
	(15;16)	22000,0	90000,0	36000,0	14000,0	0	6000,0	106000,0	112000,0	50000,0	6000,0	24000,0	8000,0	474000,0
	(16;17)	8000,0	64000,0	24000,0	4000,0	0	8000,0	90000,0	124000,0	44000,0	2000,0	10000,0	12000,0	390000,0
	(17;18)	4000,0	48000,0	20000,0	2000,0	0	8000,0	76000,0	124000,0	24000,0	0	8000,0	0	314000,0
	(18;19)	2000,0	40000,0	12000,0	0	0	0	46000,0	122000,0	20000,0	0	4000,0	4000,0	250000,0
	(19;20)	0	22000,0	10000,0	0	0	4000,0	32000,0	106000,0	12000,0	0	4000,0	6000,0	196000,0
	(20;21)	0	8000,0	10000,0	0	0	0	22000,0	100000,0	20000,0	0	2000,0	6000,0	168000,0
	(21;22)	0	8000,0	4000,0	0	0	0	14000,0	82000,0	6000,0	0	2000,0	2000,0	118000,0
	(22;23)	0	4000,0	4000,0	0	0	0	12000,0	86000,0	2000,0	0	0	2000,0	110000,0
	(23;24)	0	6000,0	2000,0	0	0	0	8000,0	62000,0	2000,0	0	0	0	80000,0
	(24;25)	0	2000,0	2000,0	0	0	0	4000,0	48000,0	2000,0	0	0	0	58000,0
Celkem	436402,3	978865,3	854129,7	431423,3	250129,3	490459,5	1347862,6	1888678,1	1119790,2	589574,1	743132,1	363076,7	9493523,2	

Příloha 8 - Energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Enercon E-101 během jednoho roku v kWh

		Úhel [°]											Celkem	
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)		(330;360)
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	4	13	9	0	11	3	7	10	6	7	0	71
	(1;2)	80	73	184	357	158	100	76	165	481	778	194	6	2652
	(2;3)	762	1119	1606	3152	2656	1588	360	1036	3642	4963	2969	1214	25068
	(3;4)	2063	3304	9449	8670	7382	6656	3261	5620	13541	18643	9785	4292	92667
	(4;5)	2661	6699	24803	31947	19750	26164	6188	11291	39232	59304	33150	15805	276992
	(5;6)	15721	25322	50852	68866	44806	46125	15973	27296	70585	129650	67822	24661	587677
	(6;7)	26889	30663	97045	97372	47953	90340	44961	75191	114479	226185	124227	50193	1025498
	(7;8)	44788	62510	158982	122686	98719	112373	71795	92205	175730	194620	189758	90666	1414834
	(8;9)	107771	136547	233281	157307	94531	171034	147109	172598	244908	230220	241541	104986	2041833
	(9;10)	186457	228925	249143	92004	74450	156541	259216	277046	334156	202530	321517	122170	2504156
	(10;11)	215486	293885	288199	118659	104691	230640	479729	389173	351900	239611	270700	149448	3132121
	(11;12)	251985	289475	408944	206017	108460	246988	539966	408300	455672	215247	333150	154802	3619006
	(12;13)	235740	534027	377054	197465	106471	174921	645795	598460	620166	71024	288685	93293	3943100
	(13;14)	216631	409049	316466	153229	56413	161680	768850	834931	434726	54224	223219	192011	3821428
	(14;15)	95062	813326	378575	108873	0	63858	831207	929455	585989	0	109919	80397	3996661
	(15;16)	180695	749148	297923	113407	0	51076	872553	940758	412795	48152	199037	66284	3931827
	(16;17)	80634	627898	247993	40098	0	78796	915856	1231500	446847	18453	101592	119271	3908939
	(17;18)	47396	559070	233031	22895	0	93676	906238	1493137	287044	0	92395	0	3734882
	(18;19)	26657	552515	164422	0	0	0	644796	1726080	279355	0	56072	57427	3507324
	(19;20)	0	364395	167116	0	0	68140	537558	1722038	196348	0	64570	102505	3222669
	(20;21)	0	150782	191166	0	0	0	409759	1929913	382881	0	39220	113803	3217523
	(21;22)	0	176482	91005	0	0	0	306549	1816120	132520	0	42131	46444	2611248
	(22;23)	0	102136	99402	0	0	0	301662	2175620	48379	0	0	53101	2780299
	(23;24)	0	167871	61126	0	0	0	238500	1800299	56655	0	0	0	2324451
(24;25)	0	63447	61893	0	0	0	130157	1556482	68264	0	0	0	1880244	
Celkem	1737476	6348670	4209674	1543012	766441	1780708	9078116	20214722	5756304	1713609	2811660	1642779	57603171	

Příloha 9 - Maximálně možné využití energie větru protékající plochou rotoru větrné elektrárny Enercon E-101 dle Betzova zákona za jeden rok v kWh

		Úhel [°]											Celkem	
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)		(330;360)
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	3	8	5	0	7	2	4	6	4	4	0	42
	(1;2)	47	43	109	212	94	59	45	98	285	461	115	3	1572
	(2;3)	451	663	952	1868	1574	941	213	614	2158	2941	1759	719	14855
	(3;4)	1223	1958	5599	5138	4375	3944	1932	3330	8024	11048	5799	2544	54914
	(4;5)	1577	3970	14698	18931	11703	15505	3667	6691	23249	35143	19644	9366	164143
	(5;6)	9316	15005	30134	40810	26552	27333	9465	16175	41828	76829	40191	14614	348253
	(6;7)	15934	18171	57508	57702	28417	53535	26643	44558	67839	134036	73616	29744	607703
	(7;8)	26541	37043	94212	72703	58500	66592	42545	54640	104137	115330	112449	53728	838420
	(8;9)	63864	80917	138241	93219	56018	101354	87176	102280	145131	136426	143135	62214	1209975
	(9;10)	110493	135659	147640	54521	44118	92765	153610	164175	198018	120018	190529	72397	1483944
	(10;11)	127695	174154	170785	70316	62039	136675	284284	230621	208533	141992	160415	88562	1856072
	(11;12)	149324	171541	242337	122084	64273	146364	319980	241956	270028	127554	197422	91734	2144596
	(12;13)	139698	316460	223439	117016	63094	103657	382693	354643	367506	42088	171072	55285	2336652
	(13;14)	128374	242399	187535	90802	33430	95810	455615	494774	257616	32133	132278	113785	2264550
	(14;15)	56333	481971	224341	64518	0	37841	492567	550788	347253	0	65137	47643	2368392
	(15;16)	107078	443939	176547	67204	0	30267	517068	557486	244619	28534	117948	39279	2329971
	(16;17)	47783	372088	146959	23762	0	46694	542730	729778	264798	10935	60202	70679	2316408
	(17;18)	28086	331301	138093	13567	0	55512	537030	884822	170100	0	54753	0	2213263
	(18;19)	15797	327416	97435	0	0	0	382101	1022862	165544	0	33228	34031	2078414
	(19;20)	0	215938	99031	0	0	40379	318553	1020467	116354	0	38264	60744	1909730
	(20;21)	0	89352	113284	0	0	0	242820	1143652	226892	0	23241	67439	1906681
	(21;22)	0	104582	53929	0	0	0	181658	1076219	78530	0	24966	27522	1547406
	(22;23)	0	60525	58905	0	0	0	178763	1289256	28669	0	0	31467	1647585
	(23;24)	0	99479	36223	0	0	0	141333	1066844	33574	0	0	0	1377453
(24;25)	0	37598	36678	0	0	0	77130	922360	40453	0	0	0	1114219	
Celkem	1029615	3762175	2494622	914377	454187	1055235	5379624	11979095	3411143	1015472	1666169	973498	34135212	

Příloha 10 - Elektrická energie vyrobená větrnou elektrárnou Enercon E-101 během jednoho roku v kWh

		Úhel [°]											Celkem	
		(0;30)	(30;60)	(60;90)	(90;120)	(120;150)	(150;180)	(180;210)	(210;240)	(240;270)	(270;300)	(300;330)		(330;360)
Rychlost větru [m·s ⁻¹]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(0;1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(1;2)	3	0	6	3	3	0	0	6	6	18	0	0	45
	(2;3)	205	300	428	838	712	405	88	275	964	1265	739	315	6534
	(3;4)	805	1273	3687	3354	2887	2584	1264	2186	5223	7445	3798	1629	36135
	(4;5)	1220	3047	11297	14477	8975	11918	2781	5152	17881	27002	15119	7202	126071
	(5;6)	7763	12457	25137	33930	22002	22843	7865	13467	34844	63913	33489	12114	289824
	(6;7)	13857	15846	50094	50254	24732	46580	23185	38839	58988	116739	64198	25896	529208
	(7;8)	23687	33036	84052	64845	52185	59356	37882	48787	92913	102930	100348	47931	747952
	(8;9)	57342	72705	124259	83793	50329	91069	78311	91895	130372	122553	128569	55868	1087065
	(9;10)	99496	122112	133037	49101	39744	83615	138525	148014	178296	108125	171761	65268	1337094
	(10;11)	110346	149341	147486	60767	53255	117539	244607	198155	179818	122253	138173	77260	1599000
	(11;12)	110257	125511	176528	89583	47708	109914	238049	176278	199532	95173	146042	68407	1582982
	(12;13)	82350	186050	131150	67100	36600	61000	225700	207400	216550	24400	100650	33550	1372500
	(13;14)	61000	115900	88450	42700	15250	45750	216550	231800	122000	15250	61000	51850	1067500
	(14;15)	21350	183000	85400	24400	0	15250	186050	207400	131150	0	24400	18300	896700
	(15;16)	33550	137250	54900	21350	0	9150	161650	170800	76250	9150	36600	12200	722850
	(16;17)	12200	97600	36600	6100	0	12200	137250	189100	67100	3050	15250	18300	594750
	(17;18)	6100	73200	30500	3050	0	12200	115900	189100	36600	0	12200	0	478850
	(18;19)	3050	61000	18300	0	0	0	70150	186050	30500	0	6100	6100	381250
	(19;20)	0	33550	15250	0	0	6100	48800	161650	18300	0	6100	9150	298900
	(20;21)	0	12200	15250	0	0	0	33550	152500	30500	0	3050	9150	256200
	(21;22)	0	12200	6100	0	0	0	21350	125050	9150	0	3050	3050	179950
	(22;23)	0	6100	6100	0	0	0	18300	131150	3050	0	0	3050	167750
	(23;24)	0	9150	3050	0	0	0	12200	94550	3050	0	0	0	122000
(24;25)	0	3050	3050	0	0	0	6100	73200	3050	0	0	0	88450	
Celkem	644581	1465878	1250111	615645	354382	707473	2026107	2842804	1646087	819266	1070636	526590	13969560	

Příloha 11 - Roční výnosy jednotlivých větrných elektráren při volbě výkupní ceny jako formy podpory

Rok provozu	Vestas V90			Enercon E-101		
	Vyrobená energie [MWh]	Roční výnos vč. DPH [Kč]	Roční výnos bez DPH [Kč]	Vyrobená energie [MWh]	Roční výnos vč. DPH [Kč]	Roční výnos bez DPH [Kč]
1	9 493,5232	18 322 499,78	15 142 561,80	13 969,5600	26 961 250,80	22 282 006,98
2	9 341,6268	18 389 926,58	15 198 286,43	13 746,0470	27 060 468,20	22 363 993,77
3	9 192,1608	18 457 601,50	15 254 216,12	13 526,1103	27 160 050,73	22 446 309,50
4	9 045,0862	18 525 525,48	15 310 351,64	13 309,6925	27 259 999,71	22 528 917,24
5	8 900,3648	18 593 699,41	15 366 693,73	13 096,7374	27 360 316,51	22 611 779,13
6	8 757,9590	18 662 124,23	15 423 243,16	12 887,1896	27 461 002,48	22 694 985,32
7	8 617,8317	18 730 800,84	15 480 000,70	12 680,9946	27 562 058,97	22 778 617,00
8	8 479,9464	18 799 730,19	15 536 967,10	12 478,0987	27 663 487,34	22 862 372,43
9	8 344,2672	18 868 913,20	15 594 143,14	12 278,4491	27 765 288,98	22 946 579,63
10	8 210,7589	18 938 350,80	15 651 529,59	12 081,9939	27 867 465,24	23 030 938,47
11	8 079,3868	19 008 043,93	15 709 127,21	11 888,6820	27 970 017,51	23 115 758,90
12	7 950,1166	19 077 993,53	15 766 936,80	11 698,4631	28 072 947,18	23 200 743,00
13	7 822,9147	19 148 200,55	15 824 959,13	11 511,2877	28 176 255,62	23 286 183,90
14	7 697,7481	19 218 665,92	15 883 194,98	11 327,1071	28 279 944,24	23 371 899,71
15	7 574,5841	19 289 390,62	15 941 645,14	11 145,8734	28 384 014,44	23 457 828,05
16	7 453,3908	19 360 375,57	16 000 310,39	10 967,5394	28 488 467,61	23 544 236,21
17	7 334,1365	19 431 621,76	16 059 191,53	10 792,0588	28 593 305,17	23 630 831,52
18	7 216,7904	19 503 130,12	16 118 289,36	10 619,3858	28 698 528,53	23 717 761,12
19	7 101,3217	19 574 901,64	16 177 604,66	10 449,4757	28 804 139,12	23 805 055,02
20	6 987,7006	19 646 937,28	16 237 138,25	10 282,2841	28 910 138,35	23 892 635,00

Příloha 12 - Roční výnosy větrné elektrárny Vestas V90 při volbě zeleného bonusu jako formy podpory

Rok provozu	Vyrobená energie [MWh]	Roční výnos ze zeleného bonusu bez DPH [Kč]	Roční výnos z prodeje elektřiny včetně DPH [Kč]	Roční výnos z prodeje elektřiny bez DPH [Kč]	Celkový roční výnos bez DPH [Kč]
1	9 493,5232	10 253 005,06	12 164 051,28	10 052 934,94	20 305 939,99
2	9 341,6268	10 088 956,98	11 969 426,46	9 892 087,98	19 981 044,96
3	9 192,1608	9 927 533,66	11 777 915,63	9 733 814,57	19 661 348,24
4	9 045,0862	9 768 693,12	11 589 468,98	9 578 073,54	19 346 766,66
5	8 900,3648	9 612 394,03	11 404 037,48	9 424 824,36	19 037 218,40
6	8 757,9590	9 458 595,73	11 221 572,88	9 274 027,17	18 732 622,90
7	8 617,8317	9 307 258,20	11 042 027,71	9 125 642,74	18 432 900,94
8	8 479,9464	9 158 342,07	10 865 355,27	8 979 632,45	18 137 974,52
9	8 344,2672	9 011 808,59	10 691 509,59	8 835 958,33	17 847 766,93
10	8 210,7589	8 867 619,66	10 520 445,43	8 694 583,00	17 562 202,66
11	8 079,3868	8 725 737,74	10 352 118,30	8 555 469,67	17 281 207,42
12	7 950,1166	8 586 125,94	10 186 484,41	8 418 582,16	17 004 708,10
13	7 822,9147	8 448 747,92	10 023 500,66	8 283 884,84	16 732 632,77
14	7 697,7481	8 313 567,96	9 863 124,65	8 151 342,69	16 464 910,64
15	7 574,5841	8 180 550,87	9 705 314,66	8 020 921,20	16 201 472,07
16	7 453,3908	8 049 662,06	9 550 029,62	7 892 586,46	15 942 248,52
17	7 334,1365	7 920 867,46	9 397 229,15	7 766 305,08	15 687 172,54
18	7 216,7904	7 794 133,58	9 246 873,48	7 642 044,20	15 436 177,78
19	7 101,3217	7 669 427,45	9 098 923,51	7 519 771,49	15 189 198,94
20	6 987,7006	7 546 716,61	8 953 340,73	7 399 455,15	14 946 171,76

Příloha 13 - Roční výnosy větrné elektrárny Enercon E-101 při volbě zeleného bonusu jako formy podpory

Rok provozu	Vyrobená energie [MWh]	Roční výnos ze zeleného bonusu bez DPH [Kč]	Roční výnos z prodeje elektřiny včetně DPH [Kč]	Roční výnos z prodeje elektřiny bez DPH [Kč]	Celkový roční výnos bez DPH [Kč]
1	13 969,5600	15 087 124,80	17 899 197,23	14 792 724,98	29 879 849,78
2	13 746,0470	14 845 730,80	17 612 810,07	14 556 041,38	29 401 772,19
3	13 526,1103	14 608 199,11	17 331 005,11	14 323 144,72	28 931 343,83
4	13 309,6925	14 374 467,92	17 053 709,03	14 093 974,40	28 468 442,33
5	13 096,7374	14 144 476,44	16 780 849,68	13 868 470,81	28 012 947,25
6	12 887,1896	13 918 164,81	16 512 356,09	13 646 575,28	27 564 740,10
7	12 680,9946	13 695 474,18	16 248 158,39	13 428 230,08	27 123 704,25
8	12 478,0987	13 476 346,59	15 988 187,86	13 213 378,40	26 689 724,99
9	12 278,4491	13 260 725,05	15 732 376,85	13 001 964,34	26 262 689,39
10	12 081,9939	13 048 553,44	15 480 658,82	12 793 932,91	25 842 486,36
11	11 888,6820	12 839 776,59	15 232 968,28	12 589 229,98	25 429 006,57
12	11 698,4631	12 634 340,16	14 989 240,79	12 387 802,31	25 022 142,47
13	11 511,2877	12 432 190,72	14 749 412,94	12 189 597,47	24 621 788,19
14	11 327,1071	12 233 275,67	14 513 422,33	11 994 563,91	24 227 839,58
15	11 145,8734	12 037 543,26	14 281 207,57	11 802 650,89	23 840 194,15
16	10 967,5394	11 844 942,57	14 052 708,25	11 613 808,47	23 458 751,04
17	10 792,0588	11 655 423,49	13 827 864,92	11 427 987,54	23 083 411,02
18	10 619,3858	11 468 936,71	13 606 619,08	11 245 139,74	22 714 076,45
19	10 449,4757	11 285 433,72	13 388 913,18	11 065 217,50	22 350 651,22
20	10 282,2841	11 104 866,78	13 174 690,56	10 888 174,02	21 993 040,80

Příloha 14 - Čistý roční zisk větrné elektrárny Vestas V90 při volbě výkupní ceny jako formy podpory

Rok provozu	Roční výnos vč. DPH [Kč]	Roční výnos bez DPH [Kč]	Náklady (provoz a údržba) [Kč]	Odpisy [Kč]	Daňový základ [Kč]	Daň z příjmu [Kč]	Čistý roční příjem [Kč]
1	18 322 499,78	15 142 561,80	2 214 624	1 511 450	11 416 487,80	2 169 132,68	10 758 805,12
2	18 389 926,58	15 198 286,43	2 214 624	3 620 450	9 363 212,43	1 779 010,36	11 204 652,06
3	18 457 601,50	15 254 216,12	2 214 624	3 620 450	9 419 142,12	1 789 637,00	11 249 955,12
4	18 525 525,48	15 310 351,64	2 214 624	3 620 450	9 475 277,64	1 800 302,75	11 295 424,88
5	18 593 699,41	15 366 693,73	2 214 624	3 620 450	9 531 619,73	1 811 007,75	11 341 061,98
6	18 662 124,23	15 423 243,16	2 214 624	3 620 450	9 588 169,16	1 821 752,14	11 386 867,02
7	18 730 800,84	15 480 000,70	2 214 624	3 620 450	9 644 926,70	1 832 536,07	11 432 840,62
8	18 799 730,19	15 536 967,10	2 214 624	3 620 450	9 701 893,10	1 843 359,69	11 478 983,41
9	18 868 913,20	15 594 143,14	2 214 624	3 620 450	9 759 069,14	1 854 223,14	11 525 296,00
10	18 938 350,80	15 651 529,59	2 214 624	3 620 450	9 816 455,59	1 865 126,56	11 571 779,02
11	19 008 043,93	15 709 127,21	2 214 624	3 620 450	9 874 053,21	1 876 070,11	11 618 433,10
12	19 077 993,53	15 766 936,80	2 214 624	3 620 450	9 931 862,80	1 887 053,93	11 665 258,87
13	19 148 200,55	15 824 959,13	2 214 624	3 620 450	9 989 885,13	1 898 078,17	11 712 256,95
14	19 218 665,92	15 883 194,98	2 214 624	3 620 450	10 048 120,98	1 909 142,99	11 759 427,99
15	19 289 390,62	15 941 645,14	2 214 624	3 620 450	10 106 571,14	1 920 248,52	11 806 772,62
16	19 360 375,57	16 000 310,39	2 214 624	3 620 450	10 165 236,39	1 931 394,91	11 854 291,48
17	19 431 621,76	16 059 191,53	2 214 624	3 620 450	10 224 117,53	1 942 582,33	11 901 985,20
18	19 503 130,12	16 118 289,36	2 214 624	3 620 450	10 283 215,36	1 953 810,92	11 949 854,44
19	19 574 901,64	16 177 604,66	2 214 624	3 620 450	10 342 530,66	1 965 080,83	11 997 899,84
20	19 646 937,28	16 237 138,25	2 214 624	3 620 450	10 402 064,25	1 976 392,21	12 046 122,04

Příloha 15 - Čistý roční zisk větrné elektrárny Enercon E-101 při volbě výkupní ceny jako formy podpory

Rok provozu	Roční výnos vč. DPH [Kč]	Roční výnos bez DPH [Kč]	Náklady (provoz a údržba) [Kč]	Odpisy [Kč]	Daňový základ [Kč]	Daň z příjmu [Kč]	Čistý roční příjem [Kč]
1	26 961 250,80	22 282 006,98	3 377 301,6	2 300 500	16 604 205,38	3 154 799,02	15 749 906,36
2	27 060 468,20	22 363 993,77	3 377 301,6	5 510 500	13 476 192,17	2 560 476,51	16 426 215,66
3	27 160 050,73	22 446 309,50	3 377 301,6	5 510 500	13 558 507,90	2 576 116,50	16 492 891,40
4	27 259 999,71	22 528 917,24	3 377 301,6	5 510 500	13 641 115,64	2 591 811,97	16 559 803,67
5	27 360 316,51	22 611 779,13	3 377 301,6	5 510 500	13 723 977,53	2 607 555,73	16 626 921,80
6	27 461 002,48	22 694 985,32	3 377 301,6	5 510 500	13 807 183,72	2 623 364,91	16 694 318,81
7	27 562 058,97	22 778 617,00	3 377 301,6	5 510 500	13 890 815,40	2 639 254,93	16 762 060,47
8	27 663 487,34	22 862 372,43	3 377 301,6	5 510 500	13 974 570,83	2 655 168,46	16 829 902,37
9	27 765 288,98	22 946 579,63	3 377 301,6	5 510 500	14 058 778,03	2 671 167,83	16 898 110,20
10	27 867 465,24	23 030 938,47	3 377 301,6	5 510 500	14 143 136,87	2 687 196,01	16 966 440,86
11	27 970 017,51	23 115 758,90	3 377 301,6	5 510 500	14 227 957,30	2 703 311,89	17 035 145,41
12	28 072 947,18	23 200 743,00	3 377 301,6	5 510 500	14 312 941,40	2 719 458,87	17 103 982,54
13	28 176 255,62	23 286 183,90	3 377 301,6	5 510 500	14 398 382,30	2 735 692,64	17 173 189,66
14	28 279 944,24	23 371 899,71	3 377 301,6	5 510 500	14 484 098,11	2 751 978,64	17 242 619,47
15	28 384 014,44	23 457 828,05	3 377 301,6	5 510 500	14 570 026,45	2 768 305,03	17 312 221,42
16	28 488 467,61	23 544 236,21	3 377 301,6	5 510 500	14 656 434,61	2 784 722,58	17 382 212,03
17	28 593 305,17	23 630 831,52	3 377 301,6	5 510 500	14 743 029,92	2 801 175,68	17 452 354,23
18	28 698 528,53	23 717 761,12	3 377 301,6	5 510 500	14 829 959,52	2 817 692,31	17 522 767,21
19	28 804 139,12	23 805 055,02	3 377 301,6	5 510 500	14 917 253,42	2 834 278,15	17 593 475,27
20	28 910 138,35	23 892 635,00	3 377 301,6	5 510 500	15 004 833,40	2 850 918,35	17 664 415,05

Příloha 16 - Citlivostní analýza pro větrnou elektrárnu Vestas V90

Úprava rychlosti větru	Průměrná rychlost větru [m·s ⁻¹]	Prostá doba návratnosti [rok]	Reálná doba návratnosti [rok]	Čistá současná hodnota [Kč]	Vnitřní výnosové procento [%]
+10 %	10,63	5,53	7,52	63 158 054,58	16,94
+0 %	9,66	6,07	8,51	51 116 484,81	15,19
-10 %	8,69	6,89	10,10	36 681 229,98	13,02
-20 %	7,73	8,21	13,08	19 421 770,68	10,30
-30 %	6,76	10,50	20,13	- 218 971,51	6,96

Příloha 17 - Citlivostní analýza pro větrnou elektrárnu Enercon E-101

Úprava rychlosti větru	Průměrná rychlost větru [m·s ⁻¹]	Prostá doba návratnosti [rok]	Reálná doba návratnosti [rok]	Čistá současná hodnota [Kč]	Vnitřní výnosové procento [%]
+10 %	10,63	5,70	7,83	89 906 835,59	16,35
+0 %	9,66	6,30	8,94	70 994 840,12	14,52
-10 %	8,69	7,21	10,79	48 468 622,30	12,28
-20 %	7,73	8,72	14,39	21 630 122,34	9,45
-30 %	6,76	11,32	23,64	-8 016 733,10	6,04