

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A JEJICH NÁVRH
WIND TURBINES AND THEIR DESIGN



Studijní program: Elektrotechnika, Energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Vedoucí práce: Ing. Vít Klein, Ph.D.

JAN MILICHOVSKÝ

PRAHA

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Milichovský** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **460658**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Větrné elektrárny a jejich návrh

Název bakalářské práce anglicky:

Wind turbines and their design

Pokyny pro vypracování:

- 1) Větrná energie jako zdroj energie
- 2) Větrné elektrárny a jejich rozdělení
- 3) Návrh větrné elektrárny
- 4) Porovnání navržené větrné elektrárny s již fungující větrnou elektrárnou

Seznam doporučené literatury:

- 1) MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- 2) CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-86167-19-4.
- 3) RYCHETNÍK, Václav. Větrné motory a elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- 4) 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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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 25. května 2018

.....

Jan Milichovský

Poděkování

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

Anotace

Práce pojednává o teoretickém návrhu větrné elektrárny s potenciálním využitím podkladů pro reálnou stavbu včetně jednotlivých postupů, které je potřeba dodržet při výstavbě samotné elektrárny. Dále se porovnává teoreticky navrhnutá větrná elektrárna s již fungující větrnou elektrárnou z hlediska ekonomických a technických parametrů. Cílem práce je podat ucelený náhled na problematiku obnovitelných zdrojů, konkrétně větrné energie, navrhnout větrnou elektrárnu a porovnat ji s větrnou elektrárnou, která je momentálně v provozu.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, větrná energie, vítr, obnovitelné zdroje, výkon, návrh, ENERCON, E70, Moldava v Krušných horách, ekonomická kritéria, zhodnocení

Abstract

The work deals with a theoretical design of a wind turbine with a potential use of this design for a real construction including individual processes which are required to be followed during the construction of the wind turbine. Further, there is a comparison of the theoretical design of the wind turbine and a real wind turbine. These two are compared in economic and technical aspects. The goal of the work is to give compact knowledge about renewable resources, especially in wind energy, to design a wind turbine and compare it with one which is already in use.

Key words

Wind turbine, wind energy, wind, renewable resources, power, design, ENERCON, E70, Moldava v Krušných horách, economic criterions, evaluation

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
Úvod	12
1. Vítr jako zdroj energie	13
1.1 Historie využití větrné energie	13
1.2 Vznik větru a jeho proudění	14
1.3 Měření rychlosti a směru větru	15
1.4 Zvlnění krajiny a jeho vliv na vítr	17
2. Větrné elektrárny a jejich rozdělení	19
2.1 Princip aerodynamické funkce	19
2.1.1 Odporová turbína	19
2.1.2 Vztlková turbína	20
2.2 Osa otáčení rotoru	21
2.2.1 Horizontální osa otáčení	21
2.2.2 Vertikální osa otáčení	22
2.3 Výkon	23
2.4 Rychlostní součinitel	24
2.5 Umístění	25
2.6 Konstrukce větrné elektrárny	26
2.7 Větrné generátory	27
2.7.1 Synchronní generátory	27
2.7.2 Asynchronní generátory	27
2.8 Regulace turbíny	28
2.8.1 Regulace VtE s malým výkonem	28
2.8.2 Regulace STALL a Active STALL	29
2.8.3 Regulace PITCH	29
3. Návrh větrné elektrárny	31
3.1 Výběr větrné turbíny	31
3.1.1 Větrná turbína ENERCON E-70	32
3.2 Výběr lokality	34
3.2.1 Lokalita VtE	35
3.2.2 Moldava v Krušných horách a NATURA 2000	35
3.2.3 Místo stavby	36

3.3	Vizuální pohled a jeho zhodnocení.....	37
3.4	Četnost větru.....	38
3.4.1	Weibullovo rozdělení četnosti větru	40
3.5	Výkon, přepočty	42
3.6	Efektivnost větrné elektrárny.....	44
3.7	Hluk.....	45
3.8	Kalkulace nákladů.....	46
3.8.1	Cena větrné elektrárny.....	46
3.8.2	Napojení na síť.....	46
3.8.3	Komunikace	46
3.8.4	Pozemek	46
3.8.5	Administrativní činnost.....	47
3.8.6	Suma nákladů	47
3.9	Zisk z prodeje elektřiny.....	48
3.9.1	Výkupní cena	48
3.9.2	Zelený bonus	48
3.10	Ekonomická kritéria.....	49
3.10.1	Financování projektu.....	49
3.10.2	Reálná doba návratnosti.....	50
3.10.3	Čistá současná hodnota.....	51
3.10.4	Vnitřní výnosové procento	52
4.	Porovnání větrných elektráren.....	53
4.1	Porovnání přeměněné energie.....	53
4.2	Vlastní spotřeba VtE	54
5.	Závěr	55
	Seznam literatury	58
	Zdroje použitých obrázků	60
	Zdroje použitých tabulek.....	62

Seznam použitých zkratek

AV – akademie věd

cca – cirka, přibližně

ČR – Česká republika

ČSVE – Česká společnost pro větrnou energii

dB – decibel, jednotka měření intenzity hluku (zde)

EPD – Ekonomika podniku, předmět vyučovaný na ČVUT FEL

ERÚ – Energetický regulační úřad

EU – Evropská unie

FVE – fotovoltaická elektrárna

IRR – vnitřní výnosové procento

JV – jihovýchod

Kč – koruna česká, měna

kg.m⁻³ – kilogram na metr krychlový, jednotka hustoty

km – kilometr, jednotka délky

kPa – kiloPascal, jednotka tlaku

kW – kilowatt, jednotka výkonu

m² – metr čtverečný, jednotka plocha

m.s⁻¹ – metr za sekundu, jednotka rychlosti

m.n.m. – metrů nad mořem, označení výškového rozdílu od moře jednotkami

MW – megawatt, jednotka výkonu

NPV – čistá současná hodnota

OZE – obnovitelné zdroje energie

Pozn. – poznámka

SV – severovýchod

SW – software

USA – Spojené státy americké, stát

ÚFA – Ústav fyziky atmosféry

ÚP – územní plán

VtE – větrná elektrárna

VN – vysoké napětí

WC – wind class, třída větru

WZ – wind zone, zóna větru

€ – euro, měna EU

Úvod

Téma této bakalářské práce jsem si vybral pro rozšíření obzoru o větrných elektrárnách. Vídáme je často, v některých zemích jsou významným producentem elektrické energie. V rozvojových zemích pomáhají usnadnit namáhavou manuální práci. Zkrátka jejich využití je širokospektrální. Navíc větrné elektrárny můžeme zařadit mezi zdroje energie, které spadají pod obnovitelné zdroje energie, tudíž nevyčerpatelné. Za předpokladu, že nebudeme brát v úvahu energetické náklady na stavbu a dopravu větrných elektráren na příslušné místo, považujeme je za „ekologicky čisté“.

1. Vítr jako zdroj energie

Energie větru se obecně řadí mezi nevyčerpatelné zdroje energie. Vítr je způsoben díky energii pocházející ze Slunce. Pomineme-li skutečnost, že Slunce má vymezený čas, kdy může fungovat, jak ho známe, tak se opravdu jedná o obnovitelný zdroj energie. Využití obnovitelných zdrojů, které jsou dobře technologicky zvládnutelné (případ energie větru), se jeví jako klíčový faktor z hlediska nezávislosti na „dovozu“ energie ze zahraničí. Celosvětově zvyšující se spotřeba energie, která roste každým rokem nutí energetickou koncepci států vybudovat nové zdroje energie, které uspokojí poptávku trhu. V poslední době se navíc setkáváme s otázkou nahrazení konvenčních spalovacích elektráren novými – obnovitelnými zdroji elektřiny, které budou mít za úkol snížení uhlíkové stopy uhelných elektráren.

1.1 Historie využití větrné energie

První zmínky o využití energie získané z větru se datují až více než 5000 lety, kde staré kresby znázorňují lodě, které využívají plachet a plují po Nilu [19]. Další prameny pocházející z Číny či Blízkého východu se týkají využívání prvních větrných elektráren pro zavlažování. Samozřejmě se setkáváme s užitím větrného mlýnu pro usnadnění manuální práce v podobě mlýnů pro drcení hospodářských plodin (převážně obilí), ale také pro pohon řemenu – různorodé nástroje, které vyžadují otáčení, např. pily. Jak již bylo řečeno, Evropa nebyla prvním kontinentem, kde se začalo využívat větrné energie. Rozvoj Evropy však zapůsobil pozitivně pro využití větrných mlýnů. Podle [19] se větrné mlýny prosadily v Evropě od 13. století. V našem podvědomí se určitě objeví zmínka o Holandsku, které využívalo větrných elektráren pro vysušování a odvodňování mokřadů pro navýšení svého území. Pro bližší pochopení rozdílu mezi větrnými mlýny a elektrárnami bude dobré si vysvětlit jejich rozdíl. Ten spočívá v tom, že větrné mlýny využívají princip tlaku na lopatky, zatímco větrné elektrárny využívají aerodynamických vlastností působících na lopatky rotoru. První větrné mlýny se zprvu natáčely proti větru celé, poté došlo díky vývoji k natáčení pouze střešní části s lopatkami [14]. Další navýšení počtu větrných elektráren nastalo v polovině 19. století při osidlování západní části USA [19]. Zde se opět setkáme hlavně s využitím větrných motorů jako čerpadel. První elektrárna sloužící k výrobě elektřiny se objevuje v roce 1888 v Clevelandu (USA). Postavil ji Američan Charles F. Brush. Výkon elektrárny dosahoval 12 kW. Primát první evropské větrné elektrárny pro výrobu elektřiny patří Poulu la Courovi. Tato elektrárna byla postavena v roce 1891 v obci Askov (Dánsko) [14]. Během 20. století se postupně navyšuje výkon větrných elektráren. Největším milníkem pro větrnou energii byla ropná krize v polovině 70. let. Od této doby se začíná Evropa silně zajímat o soběstačnost na dovozu energií; obnovitelné zdroje energie dostávají příležitost se plně uchytit. Od ropné krize po přelom století se několikanásobně zvedl výkon (od desítek kW k jednotkám MW) VtE a s tím související rozměry VtE.



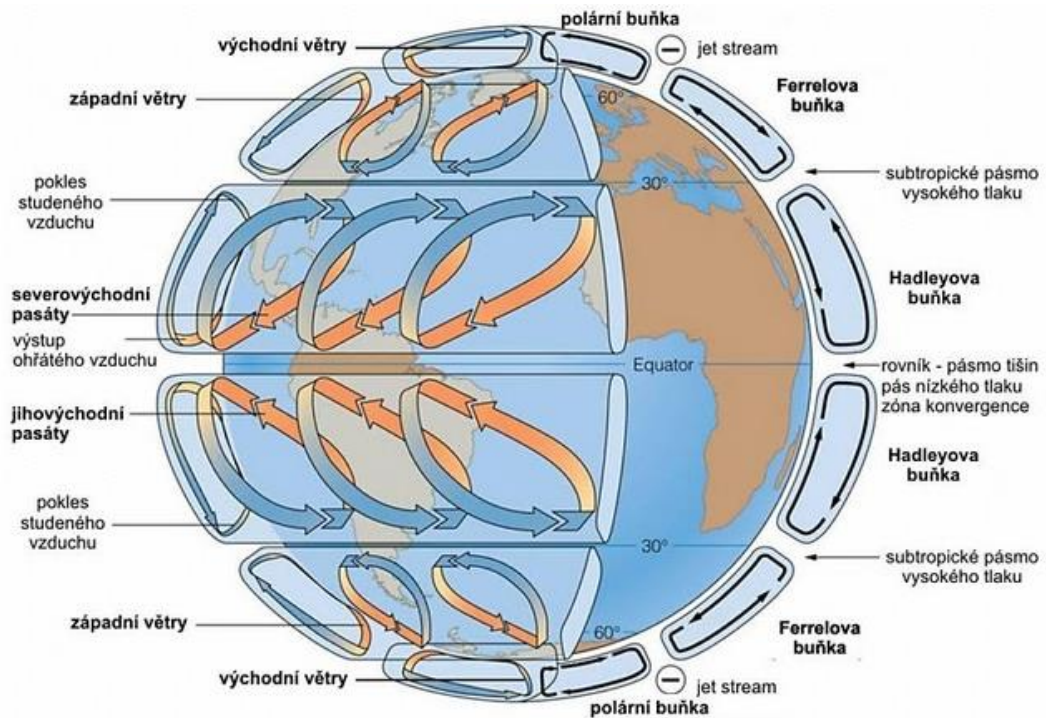
Obr. 1 – Větrný mlýn holandského typu

1.2 Vznik větru a jeho proudění

Vítr vzniká nerovnoměrným ohříváním povrchu Země. To způsobí, že se jednotlivé části, které jsou chladnější, snaží ohřát na vyšší – „okolní“ teplotu. Tímto mechanismem vzniká proudění známé jako proudění vzduchu – vítr. Pokud nepřijmeme tuto zjednodušenou úvahu, tak se dále potýkáme s atmosférickým tlakem a s ním spojenou hustotou vzduchu. Vítr se pohybuje z oblasti vyššího tlaku k tlaku nižšímu. Na pohyb větru má vliv několik faktorů. Ve zkratce se setkáváme s cyklickým dějem, kdy teplý vzduch stoupá v oblasti rovníku do vyšších vrstev atmosféry a putuje směrem k polárním oblastem, a naopak studený vzduch proudí směrem k rovníku v nižších vrstvách atmosféry a snaží se opětovně ohřát. Ve skutečnosti se zde setkáváme s dalšími faktory, a to natočením osy Země či pohybu Země kolem své osy. Proudění vzduchu na Zemi můžeme rozdělit zjednodušeně do třech oblastí:

- a) Cirkulace vzduchu tropických šířek – Hadleyova buňka
- b) Cirkulace vzduchu mírných šířek – Ferrellova buňka
- c) Cirkulace vzduchu polárních oblastí – polární buňka

Proudění vzduchu v tzv. Hadleyově buňce se též nazývá pasátní větry. Ať se již nacházejí na severní nebo jižní polokouli, tak se jedná o větry, které proudí na východ. Na povrchu země se ohřívají a předávají teplo vyššími patry atmosféry směrem k mírnému pásu. Vzduch ve Ferrellově buňce, též zvaný západní větry, proudí opět dle náležité polokoule směrem na západ. V polární buňce se setkáváme s prouděním vzduchu směrem na východ [27].



Obr. 2 – Proudění vzduchu

1.3 Měření rychlosti a směru větru

Měření větrných veličin je důležitým aspektem při návrhu či provozování větrné elektrárny. Běžně je prováděno na meteorologických stanicích jejichž součástí jsou přístroje pro vyhodnocování údajů o pohybu a směru větru. Nejjednodušším způsobem měření větru je užití vlaječky či větrného pytle, se kterým se setkáváme na letištích. Pro podrobné měření je ovšem tento způsob nedostačujícím. Typickým představitelem měření rychlosti větru je anemometr, často doplněný o směrovku pro určení směru větru. Jedná se obvykle o trojramenný rotor s miskami, kdy je rychlost otáčení převedena na napětí a to je následně vyhodnoceno. Další možnou variantou je dle [19] anemometr se žhaveným drátkem, kde je zahříván drátek, který je ochlazován proudícím větrem. S narůstající silou větru je také jeho působení více kolmé na drátek, tudíž je drátek více ochlazován a dojde ke změně odporu, která bude následně vyhodnocena. Odlišným typem měření rychlosti větru je princip dynamického tlaku. Zde se potýkáme s měřením, kdy dojde k úplnému zastavení proudění vzduchu. Tento princip je přesnější, je však omezen pro užití pro větší sílu proudění vzduchu, protože dynamický tlak je úměrný druhé mocnině rychlosti větru [19].

Pokud se měření neprovádí kontinuálně, tak se provádí v předepsaných intervalech, které jsou pro celý svět shodné (samozřejmě s definovaným časovým posunem), běžně po třech hodinách. Za předpokladu, že budeme brát v potaz klimatologické termíny, tak se jedná o interval 7 hodin přes den, který je posunut dle dané lokace. Směr větru se udává v desítkách stupňů azimutu podle toho, odkud vane vítr [např. 36 – N (north), 09 – E (east), 04 – NE (north-east), 00 – Calm (vítr neváne)] [19].

Klasifikace síly větru byla vymyšlena admirálem britského námořnictva Francism Beaufortem, který si v 19. století vytvořil vlastní kódování, díky kterému označoval počasí. Toto kódování bylo dále přijato britským námořnictvem, později i po úpravách mezinárodní konferencí pro výměnu meteorologických údajů. Stupnice síly větru se tak jmenuje Beaufortova. Liší se podle omezení na souši a na moře [1].



Obr. 3 – Anemometr se směrovkou větru

Stupeň	Rychlost větru		Tlak větru v kg/m ²	Slovní označení	Znaky na souši	Znaky na moři
	m/s	km/h				
0	0 - 0,2	0 - 1	0	bezvětří	kouř stoupá svisle vzhůru	moře je zrcadlově hladké
1	0,3 - 1,5	1 - 5	0 - 0,1	vánek	kouř už nestoupá úplně svisle, korouhev nereaguje	malá šupinovitě zčeřené vlny bez pěno vých vrcholků
2	1,6 - 3,3	6 - 11	0,2 - 0,6	slabý vítr	vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje	malé vlny ještě krátké ale výraznější, se sklovitými hřebeny, které se nelámou
3	3,4 - 5,4	12 - 19	0,7 - 1,8	mírný vítr	listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory	hřebeny vln se začínají lámat, pěna převážně skelná. Ojedinelý výskyt malých pěnových vrcholků
4	5,5 - 7,9	20 - 28	1,9 - 3,9	dosti čerstvý vítr	vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi	vlny ještě malé ale prodloužují se. Hojný výskyt pěnových vrcholků.
5	8 - 10,7	29 - 38	4,0 - 7,2	čerstvý vítr	hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají	dosti velké a výrazně prodloužené vlny. Všude bílé pěnové vrcholy, ojedinelý výskyt vodní tříště.
6	10,8 - 13,8	39 - 49	7,3 - 11,9	silný vítr	pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, je nesnadné používat deštník	velké vlny. Hřebeny se lámou a zanechávají větší plochy bílé pěny. Trochu vodní tříště.
7	10,9 - 17,1	50 - 61	12,0 - 18,3	prudký vítr	pohybuje celými stromy, chůze proti větru obtížná	moře se bouří. Bílá pěna vzniklá lámáním hřebenů vytváří pruhy po větru.
8	17,2 - 20,7	62 - 74	18,4 - 26,8	bouřlivý vítr	láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná	dosti vysoké vlnové hory s hřebeny výrazné délky, od jejich okrajů se začíná odtrhává vodní tříšť.
9	20,8 - 24,4	75 - 88	26,9 - 37,3	vichřice	menší škody na stavbách	vysoké vlnové hory, husté pásy pěny po větru, moře se začíná valit, vodní tříšť snižuje viditelnost
10	24,5 - 28,4	89 - 102	37,4 - 50,5	silná vichřice	na pevnině se vyskytuje zřídka, vyvrací stromy a ničí domy	velmi vysoké vlnové hory s překlápějící mi a lámajícími se hřebeny, moře bílé od pěny. Těžné nárazovité valení moře.
11	28,5 - 32,6	103 - 117	50,6 - 66,5	mohutná vichřice	rozsáhlé zpusošení plochy	mimořádně vysoké pěnové hory. Viditelnost znehodnocena vodní tříšť.
12	32,7 - ??	118 - ??	66,6 - ??	orkán	ničivé účinky odnáší domy, pohybuje těžkými hmotami	vzduch plný pěny a vodní tříšť. Moře zcela bílé. Viditelnost velmi snížena. Není výhled.

Obr. 4 – Beaufortova stupnice síly větru

1.4 Zvlnění krajiny a jeho vliv na vítr

Krajinný ráz je jednou z hlavních věcí, na které se musí brát ohled při návrhu větrné elektrárny. S přibližující se vzdáleností k zemskému povrchu se snižuje rychlost proudícího vzduchu. Drsnost povrchu nám navíc určí, do jaké míry se sníží rychlost větru u povrchu. Ovlivnění mezi výškou od země a rychlostí můžeme dle [19] přepočítat jako:

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (-) \quad [19] \quad (1.1)$$

v^* průměrná rychlost větru ve výšce h nad povrchem ($m \cdot s^{-1}$)

v_0^* průměrná rychlost v referenční výšce h_0 ($m \cdot s^{-1}$)

n korekční exponent v závislosti na drsnosti povrchu (-)

h uvažovaná výška (m)

h_0 referenční výška (m)

	Druh povrchu	n (-)
a	Hladký povrch – vodní hladina, písek	0,14
b	Louka s nízkým travnatým porostem nebo oranice	0,16
c	Vysoká tráva, nízké obilniny	0,18
d	Porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesy	0,21
e	Lesy	0,28
f	Vesnice, malá města	0,48

Tab. 1 – Závislost exponentu n korekčního vztahu na druhu povrchu

Pro zjednodušení výpočtu je vhodné použít korekční součinitel, který přepočte jednotlivé poměrné hodnoty na danou výšku, ve které chceme spočítat průměrnou rychlost větru. Tento přepočet spočítáme pomocí hodnoty koeficientu pro danou výšku vynásobenou příslušnou průměrnou rychlostí:

$$v_h^* = k_h \cdot v_{h_0}^* \quad (m \cdot s^{-1}) \quad [19] \quad (1.2)$$

v_h přepočtená průměrná rychlost větru pro danou výšku ($m \cdot s^{-1}$)

v_{h_0} průměrná rychlost větru pro nulovou výšku ($m \cdot s^{-1}$)

k_h výškový korekční činitel (-)

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

Tab. 2 – Hodnoty výškového korekčního činitele k_h

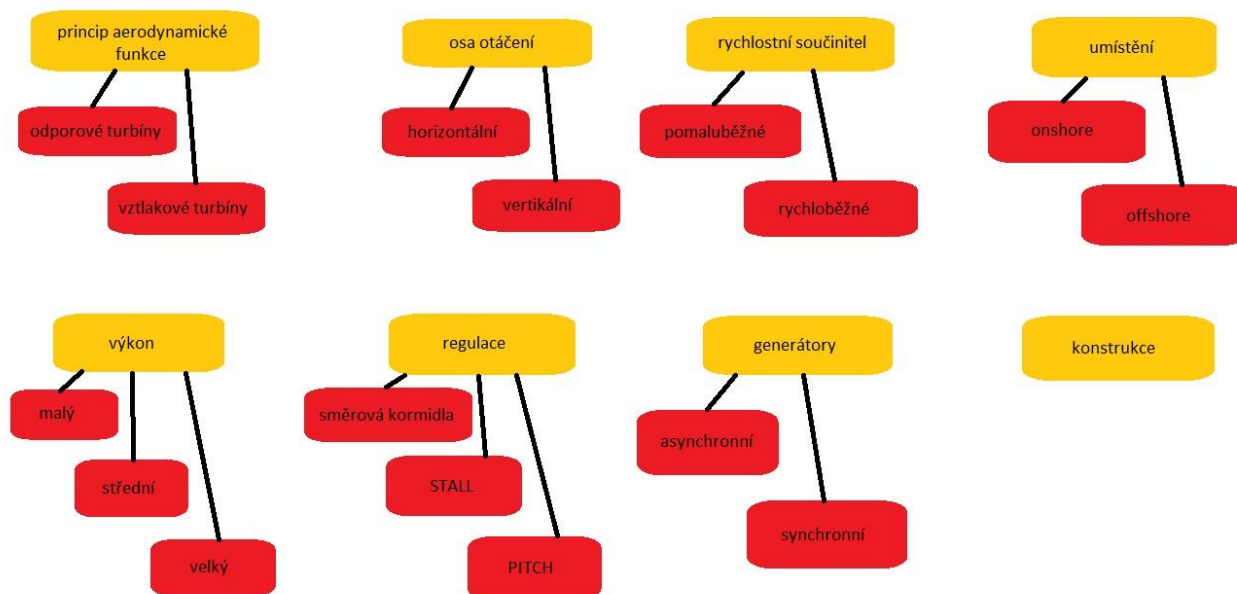
Pokud se zaměříme na krajinu České republiky, tak se drsnost povrchu značně mění. Naše země není jednotvárná, jelikož v ní nalézáme často se měnící ráz krajiny. Louky střídají lesy, z nížin se rychle přesuneme do vrchovin, do hor. Díky těmto skutečnostem musíme respektovat ovlivnění větru krajinným rázem při výběru vhodného místa pro stavbu VtE. Jinak se chová přicházející vítr na větrnou elektrárnu ve směru z drsnějšího povrchu na rovinný (urychlení větru v nižší oblasti) a vítr přicházející v opačném směru. Toto ovlivnění je nutno brát v potaz při přepočtu střední průměrné rychlosti větru [19].

Dalším důležitým faktorem při uvažování potenciálního místa pro stavu VtE jsou okolní překážky. Pod překážkou si můžeme představit budovy nebo lesy. Zkrátka jakoukoliv překážku, která bude mít přímý vliv na funkci VtE. Za překážku nebudeme považovat obilniny na poli, pokud je stožár VtE tak vysoký, že vliv obilnin na funkci VtE je zanedbatelný.

V případě naší domoviny nenalezneme téměř žádný potenciál ve využití nížin. Z toho vyplývá, že značná část naší krajiny není vhodná pro provozování VtE. V nížinách totiž vítr nedosahuje dostatečné rychlosti pro pravidelnou funkci VtE. Ještě více podtrhuje tuto skutečnost absence moře. Mořské pobřeží je ideálním místem pro stavbu VtE. Pro ČR poté zůstává vhodné umístění VtE pouze na horách a vrchovinách. Zde se ale setkáváme s odporem veřejnosti a ochránců přírody, kteří argumentují, že VtE nezapadají do krajinného rázu a že ohrožují ptactvo apod. Za předpokladu, že se podaří zadavateli pro stavu VtE obejít tyto nástrahy, opět se objevuje otázka vhodného umístění VtE. Jeví se nasnadě postavit VtE přímo na vrcholku hory. Tato představa je však mylná. Hledáme totiž takové místo, které bude jednak co nejméně ovlivněno překážkami -> turbulentními větry vznikajícími od okolních překážek a jejich následného poklesu rychlosti větru, a též místo, na které bude působit vítr v co největší síle. Parametrem, který hledáme, je maximální možné urychlení větru. Toho dosáhneme správným umístěním VtE. Ideální místo se nenachází na vrcholu kopce, ale v určité vzdálenosti pod ním. Vhodné se jeví využití proudění větru z údolí na návětrné straně a správně orientované, kolmě působícího větru přímo na listy VtE. Výběr správného místa podle proudění vzduchu je nejdůležitějším faktorem samotného návrhu VtE [19].

2. Větrné elektrárny a jejich rozdělení

Větrné elektrárny můžeme rozlišit podle různých znaků. Všechny mají společný princip, a to přetvoření energie větru na jiný typ energie. Kromě všeobecně známé výroby elektřiny je možné se setkat s mechanickým pohonem, který slouží k čerpání vody či mletí rozličných surovin. Větrné elektrárny jsou rozděleny podle vybraných parametrů níže.



Obr. 5 – Rozdělení větrných elektráren podle funkce

2.1 Princip aerodynamické funkce

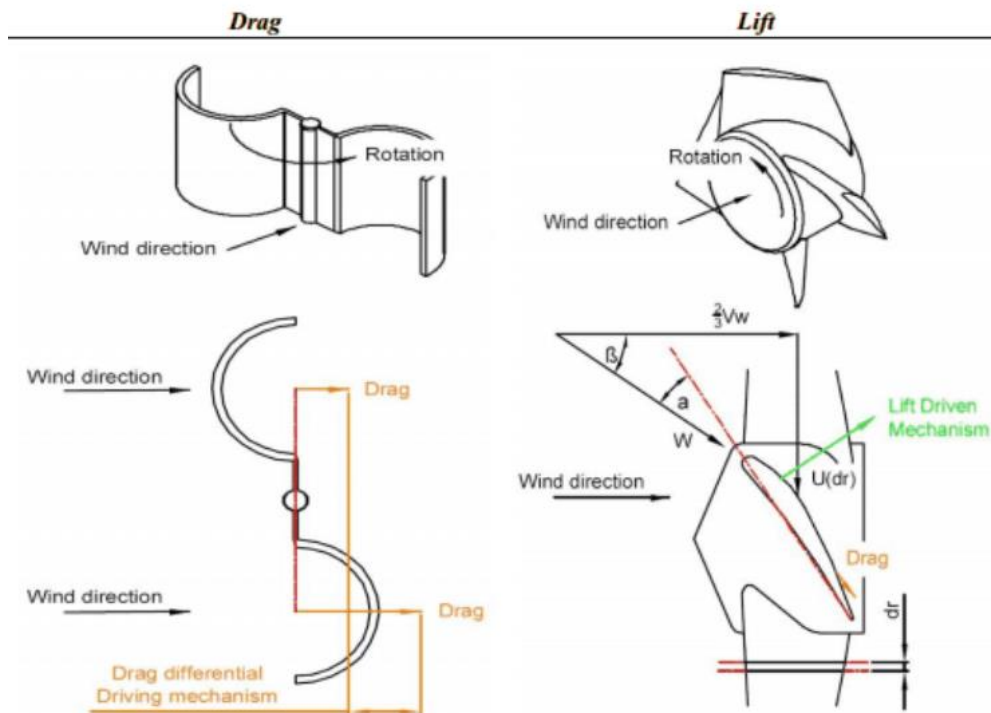
Základní rozdělení větrných elektráren, které bere v potaz funkci rotoru, je založeno na principu aerodynamiky. Při působení větru se energie přetváří z kinetické na mechanickou a následně díky generátoru na energii elektrickou. Toto zajišťují dva různé typy turbín, a to turbína odporová a turbína vztlková.

2.1.1 Odporová turbína

Odporové turbíny patří k historicky starším. Jejich princip spočívá v rozdílu působících sil na jednotlivých lopatkách. Každá z lopatek má v daný časový moment odlišný odpor (jak odpovídá z názvu) působícího větru na lopatky. Pro správnou funkci odporových turbín musíme podle [25] dosáhnout vždy menší obvodové rychlosti, než je rychlost větru. Větrné elektrárny založené na odporovém principu nedosahují velké účinnosti (15-23 %). To je také hlavní důvod, proč je v moderní energetické koncepci vídáme pouze zřídka [16].

2.1.2 Vztlaková turbína

Nejpoužívanější typ turbíny pro výrobu elektrické energie v současné době je vztlaková turbína. Oproti odporovým turbínám dosahují 2 x, teoreticky až 3 x vyšší účinnosti (40 – 50 %). Princip vztlakových turbín je založen na obtékání vzduchu přes speciálně tvarované lopatky větrné turbíny. Díky tomu dochází k využití vztlakové síly, která zapříčiní pohyb turbíny. Neúčinnou sílu, kterou se snažíme eliminovat, je zde síla odporová.



Obr. 6 – Princip funkce odporové a vztlakové turbíny

Porovnáním odporové a vztlakové turbíny můžeme dojít k závěru, že odporové turbíny jsou značně jednodušší na návrh, jelikož se u nich nemusíme zabývat natočením turbíny vůči větru. Nespornou výhodou je také široké pásmo větru, které tato turbína dokáže využít. Nevýhodou odporových turbín jsou jejich pomalé otáčky vůči vztlakovým turbínám, malý dosažený výkon a účinnost. Největší nevýhoda vztlakových turbín je jejich rozběh za slabého větru. Stejně tak se musí odpínat při velké rychlosti větru, aby nedošlo k jejich poškození. Na druhou stranu dosahují výrazně vyšší účinnosti oproti odporovým turbínám a jsou vhodné pro výrobu elektrické energie.

2.2 Osa otáčení rotoru

Podle typu větrných elektráren je můžeme rozdělit na dva typy podle způsobu osy otáčení, a to na horizontální a vertikální. Každý z těchto způsobů má svá specifika, výhody a s tím spojené nevýhody.

2.2.1 Horizontální osa otáčení

Největší předností horizontálního směru otáčení větrné elektrárny je její vyšší účinnost. Z tohoto důvodu se také v dnešní době nejvíce využívají. Nevýhodou daného uspořádání je nutné natočení turbíny proti směru šíření větru. Toho se dosahuje díky směrovým lopatkám u menších VtE, u větších VtE pomocí měření rychlosti a směru větru a využití servopohonů pro pootáčení turbíny. VtE větších rozměrů potřebují většinou ke své správné funkci převodovku, protože rychlost jejich turbín není dostatečná pro generátor, který potřebuje určité parametry vhodné pro elektrickou síť, které změnit nemůžeme. Mezi VtE s horizontální osou točení řadíme např. třílopatkové vztlakové turbíny. Méně často se setkáme s jedno či dvojlopatkovým provedením. Naopak u menších VtE jsou typické i vícelopatkové VtE [25] [13].



Obr. 7 Třílopatková vztlaková turbína

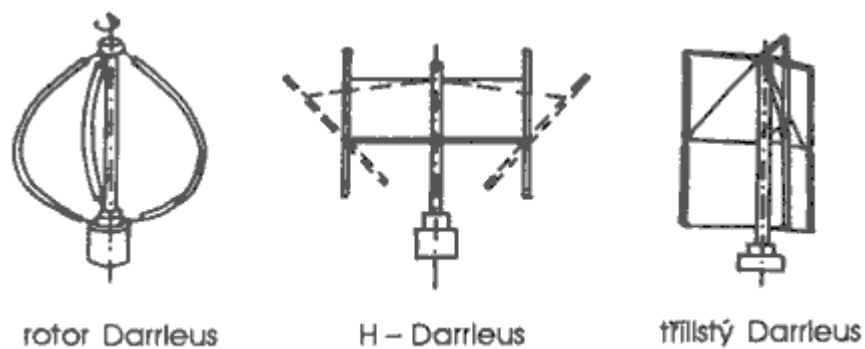


Obr. 8 Vícelopatková VtE

2.2.2 Vertikální osa otáčení

Vertikální turbíny se zcela liší od horizontálních. Hlavní odlišnost nás napadne již u vzhledu, kdy VtE s vertikální osou otáčení neobsahují žádnou vrtuli. Nepochybnou výhodou tohoto typu VtE je fakt, že se nemusí natáčet vůči směru větru. Této skutečnosti lze využít v místech s proměnlivým větrem, kdy horizontální typ VtE potřebuje minimální sílu větru pro svůj chod. Další výhodou těchto VtE je jejich mnohem menší ovlivnění aerodynamickými jevy za předpokladu, že se VtE tohoto typu nachází blíže u sebe, a jejich menší hluk. Oproti tomu se zde setkáváme s menší účinností při přepočtu stejného výkonu VtE oproti horizontální ose otáčení [25].

Turbíny typu Darrieus pracují na vztakovém principu. Mají větší účinnost než typ Savonius, který pracuje na odporovém principu. Půlkruhovitě turbíny Savoniova typu se využívají ve velké míře. Můžeme se s nimi setkat v lodní dopravě.



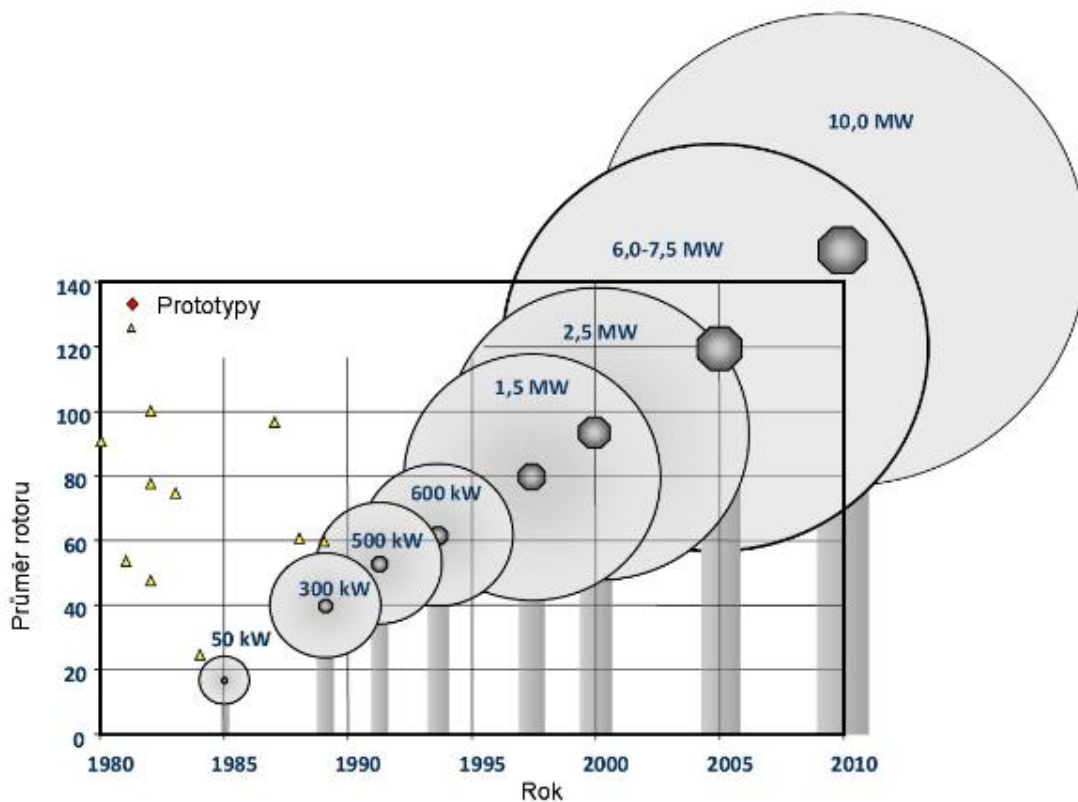
Obr. 9 - Turbíny typu Darrieus



Obr. 10 – Turbíny typu Savonius

2.3 Výkon

Výkonnostně se dají VtE rozdělit do třech kategorií podle vyráběného výkonu, a to na malé, střední a velké. Tato klasifikace se může každým rokem měnit s technickými parametry VtE. Úměrně s narůstajícím výkonem VtE se zvětšují jejich rozměry, poloměr turbín a primárně narůstá výkon dodávaný do sítě. Před dvaceti lety VtE nedosahovaly výkonu ani 1 MW. V dnešní době je výkon největší VtE Burbo Bank roven 8 MW. Tato VtE stojí na u pobřeží Liverpoolu [26]. Vývoj výkonu a rozměrů VtE je možné si prohlédnout na obrázku níže.



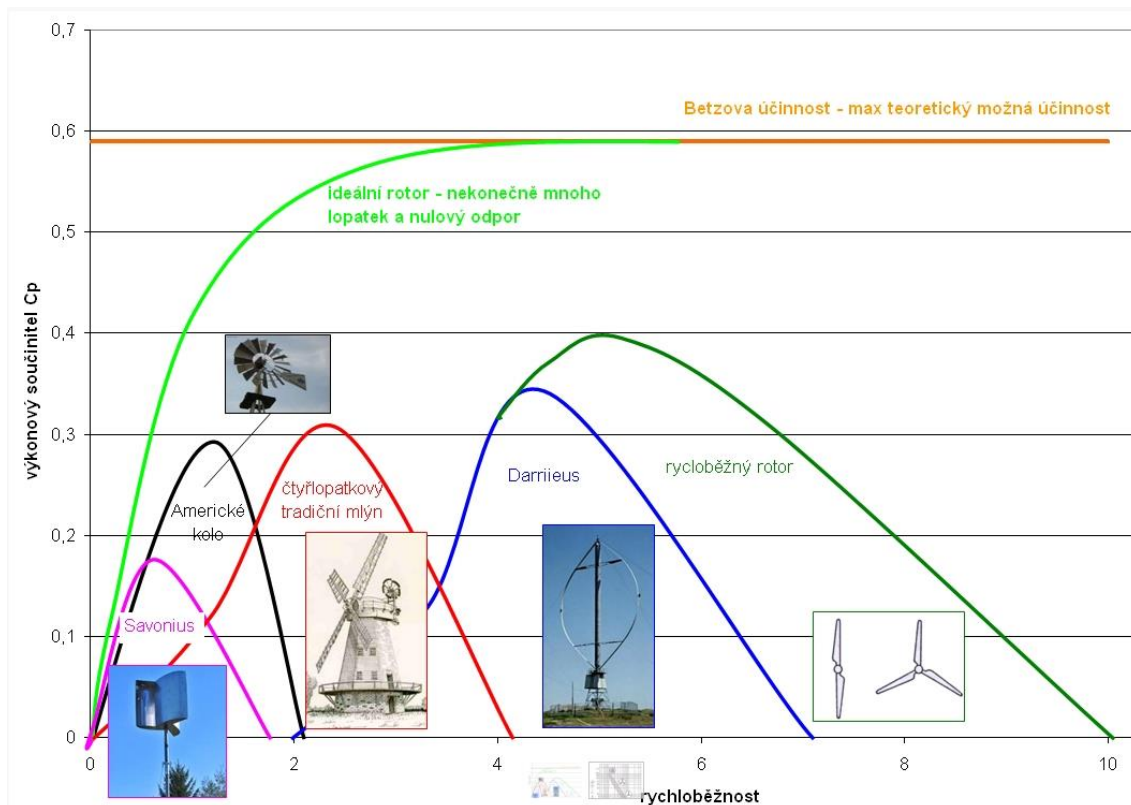
Obr. 11 – Vývoj velikosti VtE v čase

Podle [16] mají malé VtE výkon do 10 kW a slouží primárně k pokrytí vlastní spotřeby. Výkon středních a velkých VtE se pohybuje v řádech stovek kW až jednotek MW. Kromě velikosti se liší i provedením a typem generátoru. Zatímco malé VtE používají synchronní generátor, tak u větších výkonů se setkáváme s asynchronním generátorem. Ten se hůře reguluje, ale je spolehlivější, levnější a méně náročný na údržbu.

2.4 Rychlostní součinitel

Rychlostní součinitel neboli rychloběžnost rotoru je podíl rychlosti konce listů rotoru (U) ku rychlosti větru (v). Výsledek udává, zda je rotor VtE rychloběžný či pomaloběžný. Rozdělení jednotlivých typů turbín si můžeme prohlédnout na následujícím obrázku.

$$\lambda = \frac{U}{v} (-) [18] \quad (2.1)$$



Obr. 12 – Rozdělení rotorů VtE dle rychloběžnosti

Rychloběžnost není kvalitativním měřítkem. Vrtule je například rychloběžným typem rotoru, ale v současné době je nejpoužívanějším typem třílistá vrtule, která je díky jednomu listu navíc méně namáhána a dosahuje menšího gyrokopického efektu [18].

2.5 Umístění

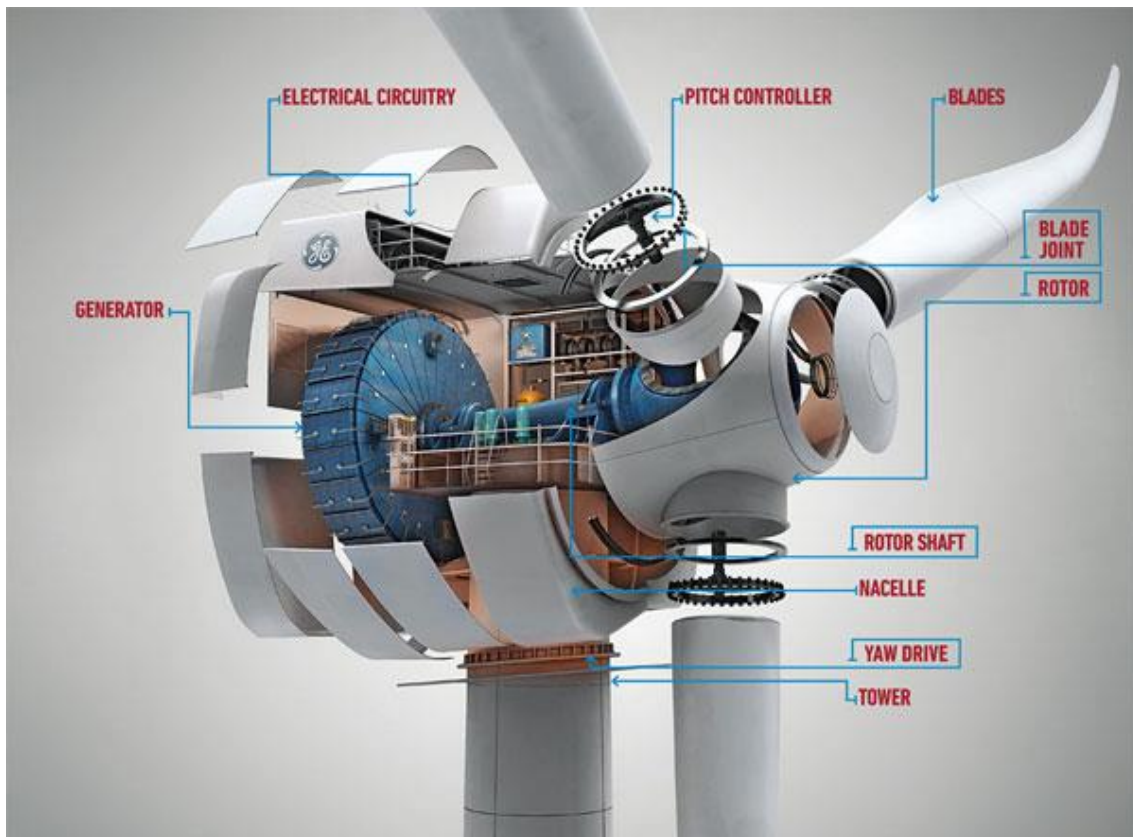
Poslední zmíněné rozdělení VtE se týká jejich umístění. VtE můžeme z hlediska umístění rozdělit na ty, které jsou mimo pevninskou část (offshore), a to na moři, a na ty, které jsou na pevnině (onshore). Z pohledu evropské perspektivy využití větru mají smysl hlavně elektrárny typu offshore. Větrné podmínky na moři jsou značně stabilnější a dosahují lepších parametrů než VtE typu onshore, které se musí potýkat s mnoha neduhy v podobě nestabilních podmínek větru, umístěním VtE i estetickým zakomponováním do krajiny. Na druhou stranu i VtE typu onshore mají svá omezení v podobě náročnosti výstavby či transportace vyrobené elektřiny na pevninu do sítě.



Obr. 13 – VtE typu offshore

2.6 Konstrukce větrné elektrárny

Pro bližší pochopení, z čeho se skládá, a jak funguje VtE, bude názornější popis obrázku větrné elektrárny.



Obr. 14 – Komponenty větrné elektrárny

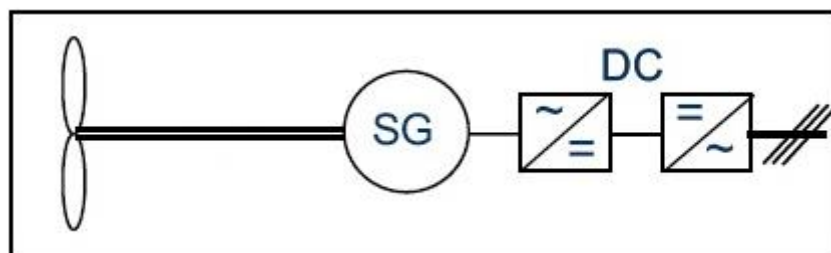
Každá VtE musí mít lopatky (blades) soustředěné v rotoru (rotor), které slouží pro přeměnu kinetické energie větru na energii mechanickou, která se přenáší přes hřídel (shaft) a roztáčí elektrický generátor (generator). Ten vyrábí elektrickou energii přeměnou mechanické energie na elektrickou. Většina VtE také obsahuje převodovku (gear machine), která upravuje převod mechanických otáček potřebných pro požadované parametry generátoru. Lopatky mají systém natáčení (pitch controller), který umožňuje natočit lopatky do požadované polohy, aby se předešlo zničení, nebo naopak aby se dosáhlo maximální účinnosti. Spojení lopatek s rotorem je vytvořeno pomocí spojky (blade joint). Elektrické řízení jednotlivých komponentů je umožněno díky elektrickým obvodům (electrical circuitry). Generátor, elektrické obvody, hřídel a převodovka jsou soustředěny v gondole (nacelle). Pro natočení gondoly vůči směru větru využíváme servopohony (yaw driver). Gondola spojená spolu s rotorem je umístěna na tubusu VtE (tower).

2.7 Větrné generátory

Pro převod energie získané z větru na energii elektrickou potřebujeme elektrický generátor. Pokud pomineme skutečnost, že existují VtE určené pro ostrovní provoz – vlastní spotřebu, tak nadále budeme pracovat s myšlenkou přivádění trojfázového střídavého proudu do lokální sítě VN. Elektrické generátory jsou v gondole připevněny na společné hřídeli spojené s vrtulí VtE. Ve větrných elektrárnách se setkáváme s generátory dvojího typu. Jedná se o generátory synchronní a generátory asynchronní. Na našem území se vyskytují generátory obojího typu. Využití jednoho či druhého typu generátoru závisí na výrobci.

2.7.1 Synchronní generátory

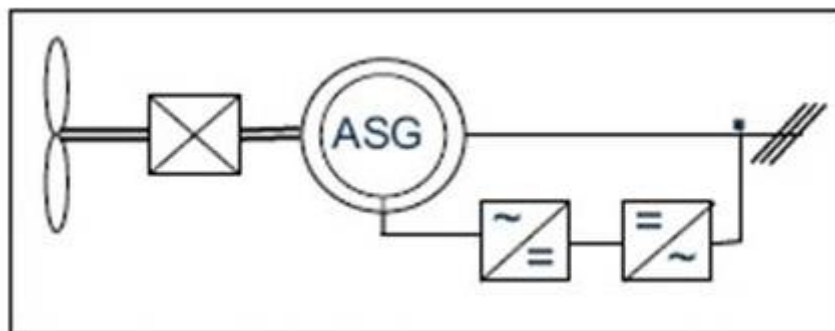
Typickým představitelem synchronních generátorů v Evropě je německá firma ENERCON. Synchronní generátory nevyžadují použití převodovky, díky čemuž se sníží počet dílů VtE, sníží se hmotnost nesená gondolou, zvýší se účinnost (převodovka nikdy nepřenáší 100 % dodaného výkonu). Vynecháním převodovky se snižuje hlučnost, kterou VtE vydává. Synchronní generátor je mnohapólový, kdy zásluhou velkého množství pólů na statoru se může VtE regulovat přepínáním počtu pólů v širokém spektru otáček bez potřeby užití převodovky. Oproti této koncepci stojí za zmínku VtE české firmy Wikow, která využívá planetární převodovku s proměnlivým převodem. Tato moderní konstrukce umožňuje stálou rychlost generátoru a značně menší převodovku oproti konvenčním typům. Na výstupu řídicí soustavy je zapotřebí elektrických měničů pro doregulování elektrické energie v požadovaných parametrech dodávaných do sítě.



Obr. 15 – Koncepce využití synchronního generátoru u VtE

2.7.2 Asynchronní generátory

Největší výhodou asynchronních generátorů je jejich jednoduchost, z toho vyplývající nižší cena či snadné připojení k rozvodné síti a v neposlední řadě také regulace [19]. Pokud zde zmíníme největšího výrobce, který využívá asynchronní generátory ve svých VtE, tak se jedná o dánskou firmu VESTAS, která je zároveň největším výrobcem VtE na světě. Charakteristické pro asynchronní generátory je využití převodovky. Ačkoliv se může z předchozího typu generátoru (synchronního) zdát, že využití převodovky je koncepčním mínusem, tak opak je pravdou. V dnešní době se účinnost převodovek pohybuje nad 90 % a její vydrž je až 20 let, kdy servis spojený s výměnou převodovkového oleje je minimální. Vinutí rotoru je napájeno z frekvenčního měniče přes kroužky asynchronního motoru.



Obr. 16 – Koncepce využití asynchronního generátoru u VtE

2.8 Regulace turbíny

Každá větrná elektrárna potřebuje řídit svůj výkon. U větrných elektráren malého výkonu se setkáváme se snahou předejít trvalým destruktivním následkům, které by mohly nastat z důvodu nadměrné síly větru. S rostoucím výkonem VtE potřebujeme značně prohloubit regulaci větrných turbín, a to z hlediska maximalizace možného využití větrné energie, stability dodávané elektřiny do sítě, a také omezení maximálního možného výkonu, na kterém je schopna VtE pracovat bez újmy. V takovém případě dochází k omezení výkonu VtE či následnému odstavení VtE od sítě. VtE velkých výkonů již nezregulujeme pouhou silou větru, ale potřebujeme k tomu některé mechanické prostředky. K natáčení gondol do směru větru pro maximalizaci možného získaného výkonu se využívá motorů. Samotný výkon VtE se však nereguluje pomocí natočení gondoly, ale pomocí natáčení lopatek připevněných k rotoru. V zásadě se můžeme setkat se třemi základními typy regulace.

2.8.1 Regulace VtE s malým výkonem

Základní a nejjednodušší regulací, se kterou se můžeme setkat je řízení VtE s malým výkonem (neobsahuje převodovku) v řádech maximálně jednotek kW. Takové VtE využívají regulačních kormidel a závaží pro jednoduché ovládání ve směru písmene „V“ pro odtržení rotoru VtE od směru větru při překročení [4]. Díky této jednoduché regulaci zamezíme poškození VtE při vyšších rychlostech větru, než na které je VtE konstruována.



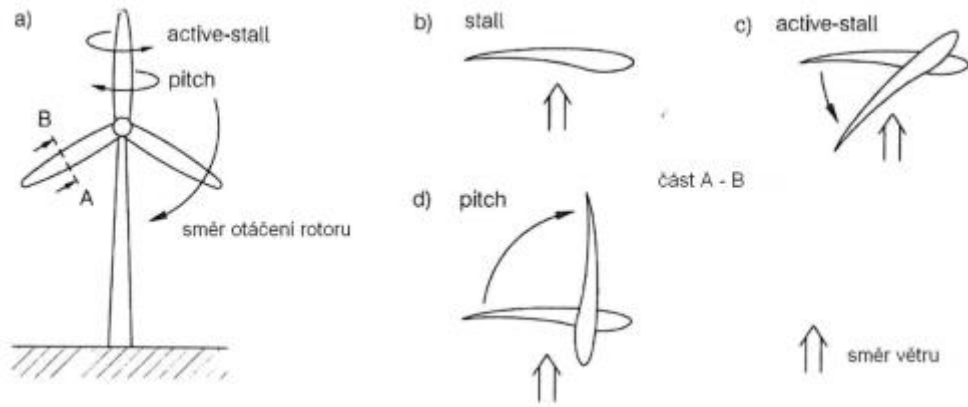
Obr. 17 – Regulace VtE malého výkonu pomocí regulačních kormidel

2.8.2 Regulace STALL a Active STALL

U regulace typu STALL se shledáváme s pevně uchycenými lopatkami rotoru, které není možné natáčet pomocnými motory. využívá aerodynamického působení větru. S narůstající rychlostí větru dochází ke změně proudění okolo listů, za listy se začnou tvořit turbulence, které mají za následek postupné snížení účinnosti rotoru. Druhou variantou je využití natáčení lopatek pomocí motorů (zde nejsou pevně uchyceny jako u typu STALL). V tomto režimu se ušší konec lopatky natáčí proti směru větru, čímž dochází k postupnému snížení výkonu díky odtržení proudu vzduchu. Výhodou je zde oproti systému PITCH, že natočené lopatky se tolik nezanášejí nečistotami. Systém Active STALL se využívá u velkých větrných elektráren [22].

2.8.3 Regulace PITCH

Zde se setkáváme s uchycením, které nám umožňuje natáčení lopatek turbíny směrem od větru. Rychlost větru je neustále vyhodnocována a podle zpracovaných dat se natáčejí lopatky. Tímto způsobem je zajištěno maximální možné využití energie větru. Nevýhodou oproti režimu Active STALL je větší odpor větru při opětovném natáčení zpět, dochází zde k většímu zanášení lopatek.



Obr. 18 – Ukázka regulačních režimů STALL, Active STALL a PITCH

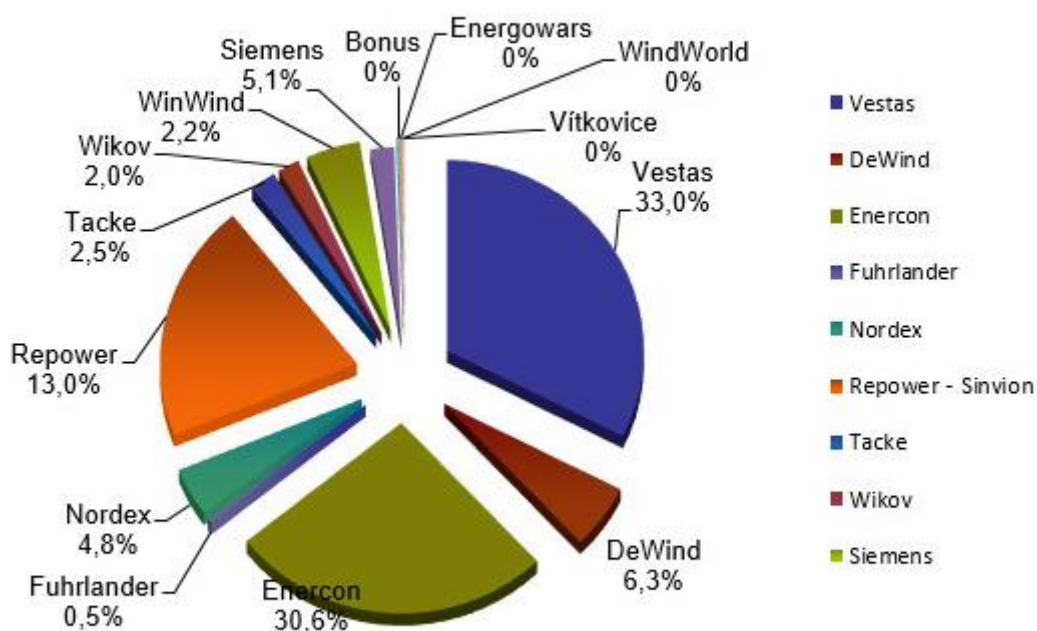
3. Návrh větrné elektrárny

Základem pro stavbu VtE je nalezení optimálního místa, kde se daná VtE bude nacházet. Výběr místa, kde by se daná VtE mohla nalézat, je značně omezen. Omezení pramení zejména od chráněných oblastí, blízkosti lidských obydlí či technické realizovatelnosti samotné stavby a s ním spojené následné údržby VtE. Následující kapitoly budou zaměřené na návrh větrné elektrárny od výběru vhodného místa, turbíny, výpočtů pro zhodnocení technické a ekonomické stránky věci, předpisů, jednotlivých úskalí, a naopak také výhod, které VtE skýtá.

3.1 Výběr větrné turbíny

Pro svoji bakalářskou práci jsem vybral větrnou elektrárnu od německé firmy ENERCON, typ E-70. Na našem trhu se firma ENERCON vyskytuje v množství 30,6 % ze všech instalací VtE. Jedná se o jednu z nejběžnějších VtE v České republice. Výběr větrné turbíny této firmy není náhodný. Z množství VtE výrobce ENERCON můžeme usoudit, že se jedná o zavedou firmu, která má kvalitní výrobky. Údržba takovéto VtE nebude jistě problémem. Z následujícího grafu ČSVE si můžeme prohlédnout zastoupení jednotlivých výrobců již instalovaných VtE na českém trhu. Prvenství v počtu instalovaných VtE patří dánské firmě Vestas, která má o 2,8 % více instalací než firma ENERCON.

Instalace větrných elektráren v ČR podle výrobců v MW



Aktualizace k datu 31. 12. 2017

Obr. 19 – Rozložení zastoupení VtE na českém trhu

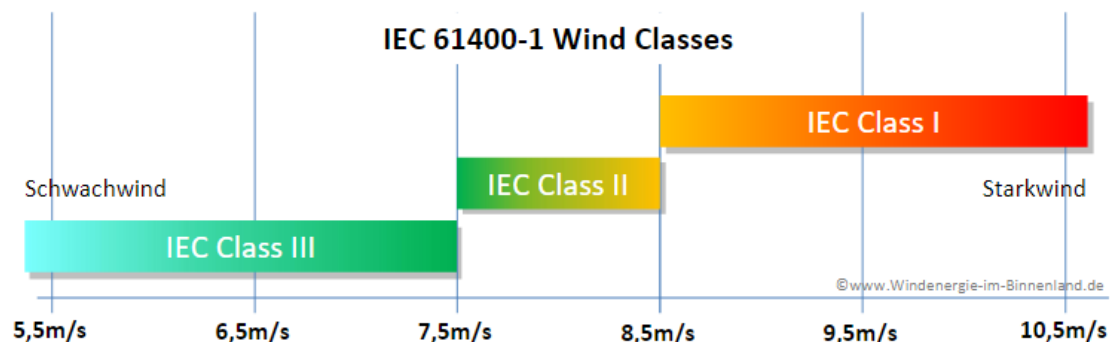
3.1.1 Větrná turbína ENERCON E-70

Vybraná VtE pochází, jak již bylo zmíněno, od německé firmy ENERCON. Pro další kapitulu bakalářské práce je tento typ VtE nezbytný pro porovnání s již fungující VtE, která je stejného typu. Pro bližší přiblížení si uvedeme základní technické údaje této VtE pocházející ze stránky samotného výrobce [9].

Nominální výkon (MW)	2,3
Průměr rotoru (m)	71
Výška tubus (m)	57/64/75/85/98/114
Zóny větru	WZ III/WZ 4 GK1/ WZ 4 GK2
Třídy větru	IEC/EN IA, IEC/EN IIA
Koncept VtE	Bezpřevodková, variabilní rychlost, nezávislé řízení jednotlivých lopatek

Tab. 3 – Technické údaje o VtE ENERCON E-70

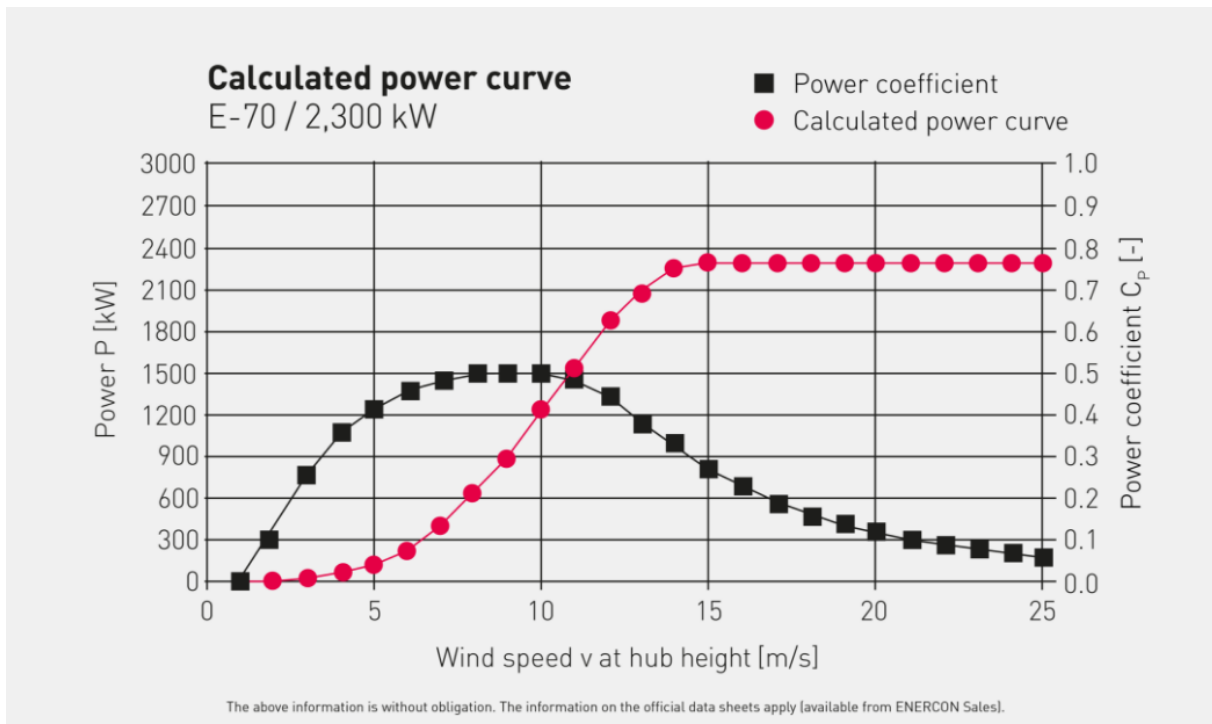
Maximální teoreticky dosažitelný výkon je 2,3 MW. Výška tubusu je podle přání zákazníka variabilní, a to v hodnotách udaných v tabulce. Zóny (německé normy) a třídy (mezinárodní normy) větru jsou pouze jiný náhled na stejnou problematiku rozřazení větrných elektráren podle optimalizace a síly větru do tříd. Turbína ENERCON E-70 spadá do zón WZ 3 a WZ 4 (wind zone) a do tříd větru WC IA a WC IIA (wind class). Na následujícím grafu si můžeme prohlédnout rozčlenění jednotlivých WC podle síly větru. Naše VtE patří do třídy I, resp. II. Tudíž je vhodná pro provozování od větru dosahujícího $7,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Není výhodná pro lokality se slabým výskytem větru.



Obr. 20 – Rozdělení VtE podle tříd větru

Větrná turbína ENERCON E-70, jak jsme si již popsali v kapitole 2.7.1, je bezpřevodkového typu, a proto nám odpadá problém s životností převodkového ústrojí. Naopak se zde objevuje větší náročnost regulace otáček pomocí pólů synchronního generátoru. VtE ENERCON E-70 disponuje nezávislým řízením jednotlivých lopatek rotoru. Díky tomu se mohou natáčet na požadovaný úhel, ať již pro dosažení maximálního výkonu, či pro snížení výkonu z důvodu optimalizace, nebo „brzdění rotoru“ během přiblížení se k povolené maximální provozní rychlosti VtE. Jednotlivé lopatky jsou řízeny elektrickými nebo hydraulickými motory.

Pokud se na větrnou turbínu ENERCON E-70 podíváme z výkonového hlediska, ze stránek výrobce můžeme získat výkonovou křivku [9].



Obr. 21 – Výkonová křivka VtE ENERCON E-70

Růžově je zobrazena vypočítaná výkonová křivka, černě vidíme výkonový součinitel. Ten znázorňuje poměr výkonu rotoru k výkonu dodaného větrem protečeným skrz plochu rotoru. Výkonový součinitel vypočteme dle [19] jako:

$$C_p = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot A \cdot v^3} \quad (-) \quad (3.1)$$

P výkon rotoru (W)

ρ hustota vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

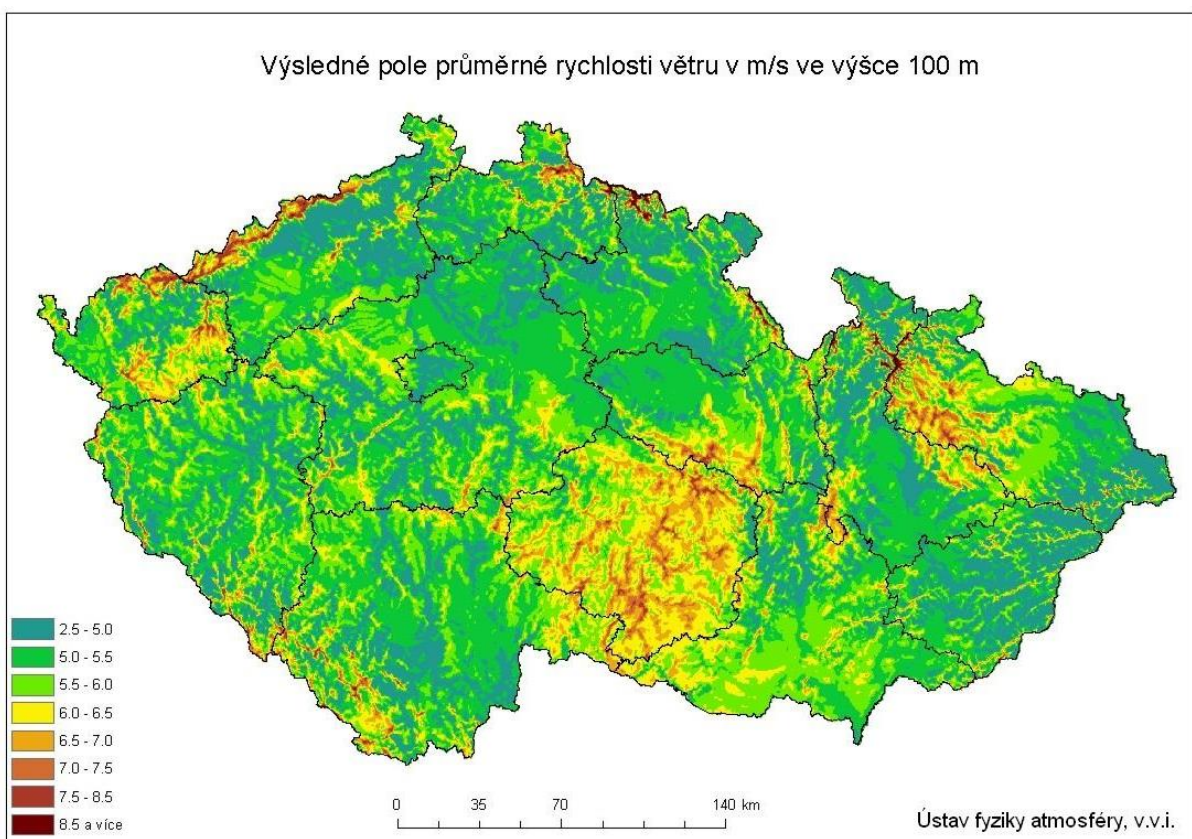
A plocha rotoru (m^2)

V rychlost větru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_p výkonový součinitel (-)

3.2 Výběr lokality

Základním aspektem při výběru lokality pro potenciální stavbu VtE je výběr větrné lokality s pokud možno stálými větrnými podmínkami, které se budou shodovat s našimi představami o vyrobené energii a s tím pramenícího zisku pro investora. Pokud se zaměříme na ČR, v úvahu připadají zejména horská pásma a oblast kraje Vysočina. V rámci výběru lokality pro moji bakalářskou práci jsem vybral území Krušných hor, které patří, jak se můžeme podívat na přiložený obrázek větrné mapy České republiky ČSVE, k těm vůbec největrnějším. Vyskytuje se zde vítr o největší síle. Navíc se jedná o lokalitu, kde jsou umístěny další dvě VtE, se kterými budu porovnávat vypočtené údaje návrhu VtE.



Obr. 22 – Větrná mapa ČR

3.2.1 Lokalita VtE

Výběrem Krušných hor pro výstavbu VtE jsem narazil na problém s vyhledáním samotného místa pro vhodnou lokalitu. Většina vhodných míst je již zabrána. Pověšinou se veškerá ideální místa z hlediska síla větru/dostupnost ke komunikaci a elektrické síti nachází na chráněných územích, jako jsou CHKO či PP. Po určitém porovnání větrné mapy pro ČR a topografických map jsem dospěl ke třem vhodným místům, kde by se potenciální VtE mohla postavit. Z těchto tří míst se jedno nacházelo v bezprostřední blízkosti místa, kde stojí VtE pro porovnání, tudíž by byla data obdobná. Další VtE se po pečlivějším zkoumání nacházela nedaleko stojících VtE. Z těchto důvodů zůstala jediná možnost, a to oblast Moldavy v Krušných horách.

3.2.2 Moldava v Krušných horách a NATURA 2000

Obec Moldava se nachází na hřebeni Krušných hor při hranici s Německem, 25 km severozápadně od Teplic v nadmořské výšce přibližně 800 m.n.m. [17]. V obci žije 180 obyvatel (údaj k roku 2017). Obec je rozdělena na více částí. Jedná se o turistickou lokalitu, křižovatku cest. V obci se nachází FVE o výkonu 4,403 MW [7]. Z toho můžeme usoudit, že obec již má zkušenosti s obnovitelnými zdroji energie a místní obyvatelé jsou této formě výroby energie nakloněni.

Během bližšího zkoumání možností stavby VtE na území spadající pod katastrální území obce Moldavy jsem v územním plánu (ÚP), který zkoumá vlivy nedalekých chráněných území, území NATURA 2000 (zabývající se ochranou ptactva), našel, že se v blízkém okolí ptačí oblasti Východní Krušné hory – konkrétně Grünwaldské vřesoviště – vyskytuje chráněný Tetřívěk obecný. Z tohoto hlediska se v ÚP zvažuje možná výstavba VtE. Závěrem této zprávy je přiznání, že se zde může vyskytovat VtE, pokud se však nejedná o větší počet VtE. Větší rušení než způsobené VtE se uvažuje s navýšením rozvoje cykloturistických tras [15]. V mé práci se jedná pouze o jednu VtE. Posouzením zahraničních vlivů se jeví výskyt netopýra velkého jako „mírně problémová“. Jako zanedbatelný na stavbu VtE se jeví výskyt včelojeda lesního. Z hlediska možného vlivu VtE na tyto druhy: luňák červený, moták pochop, moták pilich, je potřeba prozkoumat, zda zmíněné druhy budou dotčeny.

Pokud prozkoumáme studii [20] Ústeckého kraje z roku 2004, která se zaměřila na možné posouzení vlivu potenciálních VtE, tak zjistíme, že v lokalitě Moldavy se nachází dvě možné lokality, které jsou uvažovány. Jednu z lokalit uvažuje firma podnikatele Daniela Křetínského – EP Renewables, která ovšem chce vystavět 18 jednotek VtE. Firma momentálně čeká na udělení výjimky pro stavbu těchto VtE. Obec Moldava se zatím nevyslovila, že by si na svém území nepřála VtE. Mnou vybraná lokalita se bude nacházet nedaleko obce Moldava, ne však v přímé blízkosti těchto míst. Pokud přihlídneme k faktu, že se jedná pouze o jednu VtE, tak by takový problém v rámci schvalovacího procesu jistě nepředstavovala oproti zmíněnému větrnému parku.

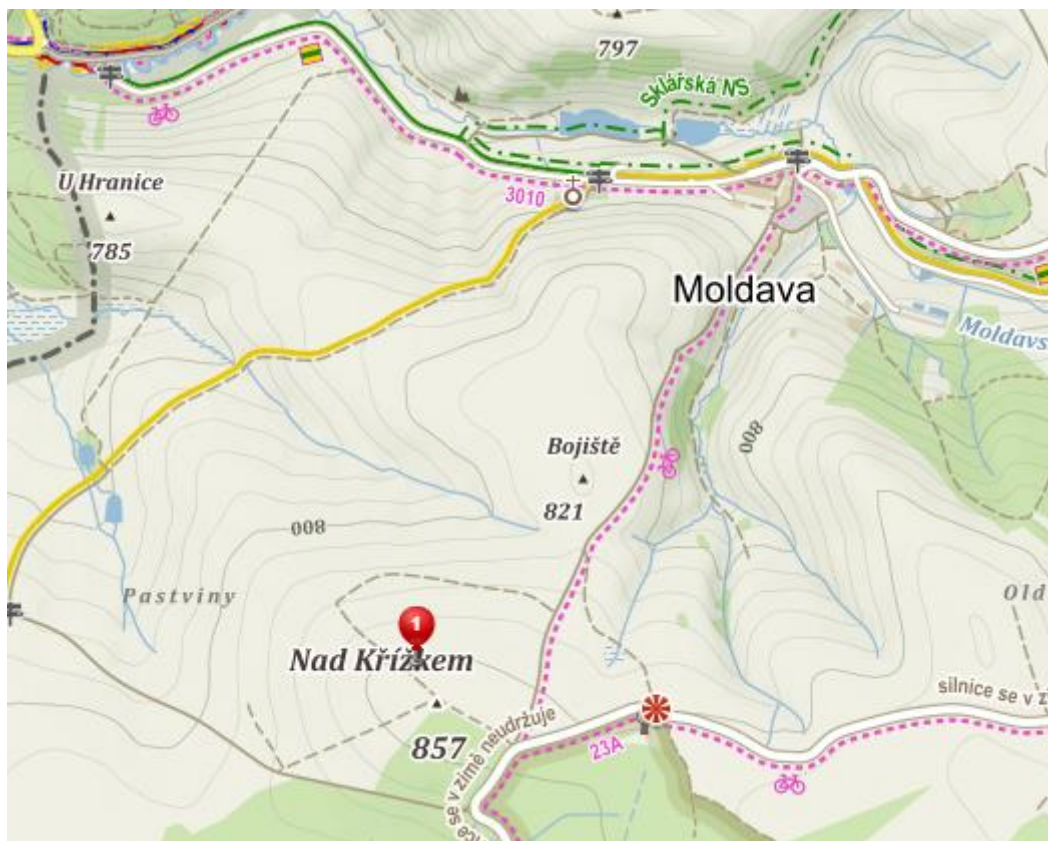
3.2.3 Místo stavby

Samotné místo pro stavbu VtE by stála nedaleko vrchu „Nad Křížkem“, který je ve v nadmořské výšce 857 m.n.m. VtE by byla umístěna pod tímto vrcholem severozápadně, směrem na Moldavu v Krušných horách. Obec Moldava se nachází na dohled ve vzdálenosti 1,8-2,0 km od samotné VtE. Větrná elektrárna se nachází v blízkosti silnice a zpevněných cest. V takovém případě by stačilo pouze místní komunikace zpevnit, popř. dostavět na již zakreslených mapách stálou asfaltovou komunikaci, která je nutná pro přístupnost k VtE pro její kontrolu.

Detaily umístění v geografických souřadnicích:

Zeměpisná šířka: 50°42'24.804"N

Zeměpisná délka: 13°38'26.369"E



Obr. 23 – Umístění VtE

3.3 Vizuální pohled a jeho zhodnocení

Jelikož nevlastním žádnou relevantní fotku místa stavby, budu vycházet z vizualizace. Tu si můžeme pustit jako 3D pohled map od Seznam.cz. Sám vycházím z toho, že jsem okolí Moldavy v Krušných horách opakovaně navštívil. Hodnocená VtE je znázorněna červeným křížkem na obrázku vyobrazeném pod textem. Jak již bylo zmíněno, VtE by se nacházela ve vzdálenosti cca 1,8 km od nejbližšího obydlí obce. VtE by stála na současné louce, u které můžeme vidět nedalekou polní cestu, která by byla zmodernizována ve prospěch asfaltové zpevněné cesty pro údržbu a počáteční dopravu jednotlivých dílů VtE. V modrém oválu můžeme vidět už zmíněnou FVE. V polovině pravé strany obrázku se vyskytuje panelová cyklostezka vedoucí do obce. Pokud budeme uvažovat možné odletující kousky ledu z VtE v období zimní sezóny, v tuto dobu je oblast mimo turistickou sezónu. Navíc se VtE nalézá mimo cestu uprostřed louky. V takovém případě soudím, že by stačilo využití upozorňujících cedulí.



Obr. 24 – Vizualizace místa stavby, zobrazení nedaleké FVE

3.4 Četnost větru

Základem uvažované stavby VtE je potřeba si vypočítat, kolik nám daná VtE vydělá finančních prostředků, aby byla rentabilní. Jedním ze základních faktorů k podání žádosti o stavbu VtE jsou podklady s naměřenými průměrnými hodnotami větru za poslední rok. Ve větrné energetice se využívá tzv. Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti větru.

Ideálními podklady pro zpracování údajů o měření větru by byla stavba provizorní měřicí stanice se směrovkou a anemometrem se souhlasem majitele pozemku po období jednoho roku. Takovými prostředky ovšem nedisponuji, a proto se uchýlíme ke statistickému měření Ústavu fyziky atmosféry (ÚFA) AV ČR, která zdarma nabízí statistické údaje pro rychlosti a směry větru ve výšce 10 m nad povrchem.

Jak je možno vytušit, výška 10 m nad povrchem není pro mnou zamýšlenou VtE vhodná. Jelikož stránky výrobce ENERCON podávají podklady pro výšku tubusu (výška umístění rotoru) 99 m nad zemí, rozhodl jsem se pro tuto uvažovanou výšku. Je nezbytné pro další uvažované rychlosti větru přepočítat pomocí vztahu z kapitoly 1.4 jednotlivé rychlosti větru pro výšku 99 m.

Z následující tabulky získané drobnými přepočty původní tabulky ÚFA můžeme vyčíst, odkud fouká vítr na místě uvažované VtE, sílu větru přepočtenou z 10 m pro požadovanou výšku tubusu 99 m, která je nadále podle intenzity rozřazena na jednotlivý počet dnů v roce.

Příklad přepočtu síly intenzity větru z 10 m na 99 m:

$$v^* = v_0^* \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^n = 5,18 \cdot \left(\frac{99}{10}\right)^{0,18} = 7,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.2)$$

Index exponentu 0,18 byl zvolen na základě výběru z Tab.1¹, kde hodnota odpovídá krajině, která obsahuje vysokou travu či obilniny. VtE je uvažována na nynější louce.

Příklad přepočtu četnosti větru z procentuálního podílu na dny:

$$\text{počet dní} = \text{procentní roční podíl} \cdot \text{délka roku}^2 = 4,9 \% \cdot 365 \frac{1}{4} = 17,9 \text{ dne} \quad (3.3)$$

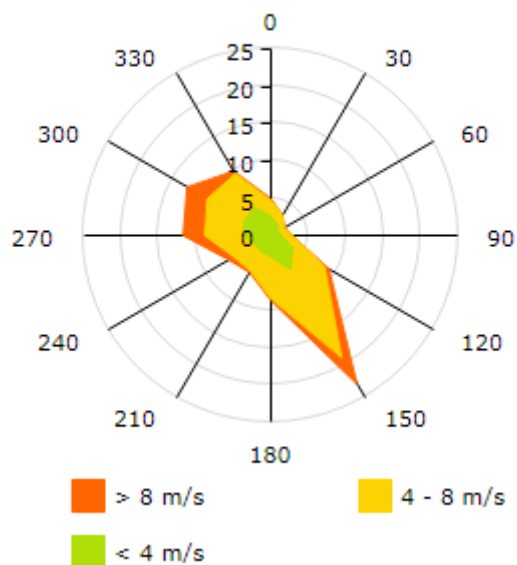
¹ Tab.1 se nachází v kapitole 1.4

² Délkou roku je uvažováno 365 a ¼ dne

Délka roku (dny)	Směr větru (°)	Relativní četnost větru (dny)				Průměrná rychlost větru (m.s ⁻¹)
		Celkem	0-4 m.s ⁻¹	4-8 m.s ⁻¹	> 8 m.s ⁻¹	
365,25	0	17,9	9,2	7,8	0,9	6,30
	30	11,3	6,2	5,1	0,1	5,86
	60	7,7	3,9	3,6	0,1	6,07
	90	10,2	4,9	5,4	0,0	6,15
	120	32,5	12,2	17,8	2,5	7,31
	150	83,6	19,0	49,7	15,0	8,82
	180	31,8	10,4	20,4	1,0	7,28
	210	20,8	9,1	10,9	0,8	6,68
	240	23,7	8,8	12,1	2,9	7,61
	270	42,7	13,6	18,6	10,6	8,99
	300	47,1	14,9	20,8	11,4	8,90
	330	36,2	15,7	19,0	1,5	6,72
		celkově	365,6	127,8	191,1	46,7

Tab. 4 - Relativní četnost větru napříč rokem

Rozdělení směrů větru (%)



Obr. 25 – Rozdělení směru větru podle jeho četnosti

Pokud zhodnotíme výskyt větru, nejvíce nám fouká JV vítr při 150 °, nejméně při 60 ° SV vítr. Průměrná rychlost větru se po přepočtu pohybuje v rozmezí 6 až 9 m.s⁻¹.

3.4.1 Weibullovo rozdělení četnosti větru

Jeden ze základních kvalitativních parametrů, který nám posoudí relativní četnost větru na daném místě, je využití Weibullova rozdělení.

$$f(x) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\frac{x^b}{a}} \quad [19] \quad (3.3)$$

$f(x)$ funkce

x průměrná rychlost větru (m.s^{-1})

a součinitel a (-)

b součinitel b (-)

e Eulerovo číslo (-)

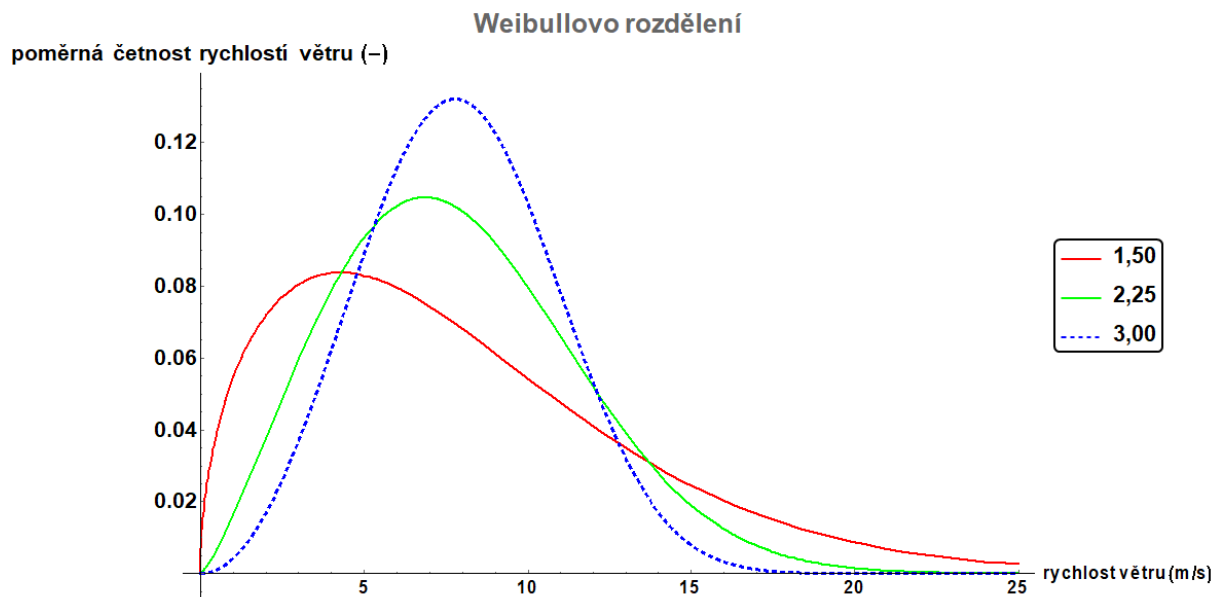
v^* průměrná rychlost větru (m.s^{-1})

$$a = \frac{v^*}{0,88} = \frac{7,83}{0,88} = 8,90 \quad (-) \quad (3.4)$$

Weibullovo rozdělení si můžeme popsat výše napsanou funkcí. Součinitel „ a “ určuje polohu maxima funkce [19]. Mezitím co výpočet součinitele „ a “ probíhá s fixní průměrnou rychlostí určenou napříč celým rokem z dat ÚFA (ve vzorci je proveden výpočet pro roční průměrnou rychlost větru), tak průměrná rychlost „ x “ dosazená pro výpočet Weibullova rozdělení probíhá napříč spektrem rychlostí větru.

Součinitel „ b “ je nazýván tvarovým součinitelem. Jeho hodnota se mění v závislosti na různých distribučních funkcích větru; přibližně v rozmezí 1,5 – 3,0 [19].

Pro lepší názornost této funkce jsem si v software společnosti Wolfram – Mathematica vymodeloval Weibullovo rozdělení četnosti větru v rozmezí 0 – 25 m.s^{-1} pro tři různé součinitele „ b “, a to: 1,50; 2,25; 3,00.



Obr. 26 – Weibullovo rozdělení relativní četnosti větru

Na grafu můžeme vidět ukázkou, jak volba tvarového součinitele „b“ má vliv na charakteristiku Weibullova rozdělení. S narůstající hodnotou součinitele „b“ se nám navyšuje poměrná četnost rychlosti větru, která dosahuje svého maxima poblíž součinitele „a“, který je roven hodnotě 8,898.

Pokud si vypočítáme obsah funkce pod křivkou, zjistíme, že jednotlivé funkce jsou si rovny, nehledě na velikost součinitele „b“. Tento úkaz si můžeme snad dokázat, a to pomocí integrace v software Wolfram Mathematica. Názorná ukáзка je přiložena pod tímto textem. Zadaná funkce odpovídá vzorci ze strany 32, hodnoty součinitele „b“ jsou popsány indexy shodné s grafem pro Weibullovo rozdělení.

```

In[72]:= Integrate[b15, {x, 0, 25}]
Out[72]= 0.99099

In[73]:= Integrate[b225, {x, 0, 25}]
Out[73]= 0.999964

In[74]:= Integrate[b3, {x, 0, 25}]
Out[74]= 1.
  
```

Obr. 27 – Integrace jednotlivých funkcí Weibullova rozdělení pro dílčí součinitele „b“

3.5 Výkon, přepočty

Hlavní věcí, která nás bude vždy zajímat při uvažování VtE, je vyrobená energie. Podklady pro výpočty souvisí se zmíněným měřením rychlostí větru. Mnou uvažované statistické údaje vychází z dat ÚFA AV ČR a výkonové křivky poskytnuté ze stránek výrobce plánované VtE – firmy ENERCON.

Jelikož se nacházíme ve vyšší nadmořské výšce (850 m.n.m.), jeví se příhodné přepočítat hustotu vzduchu pomocí barometrického tlaku. S narůstající výškou nám totiž klesá atmosférický tlak. Tento přepočet můžeme provést podle [19] pomocí následujícího postupu.

$$p_b(h) = p_b(0) \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} \cdot h + 0,5291 \cdot 10^{-8} \cdot h^2) \text{ (Pa)} [19] \quad (3.5)$$

h nadmořská výška (m)

Po dosažení naší výšky (850 m.n.m.) dospějeme k hodnotě 91 519 Pa - $p_b(h)$, pokud počítáme s normálním atmosférickým tlakem - $p_b(0)$, který je roven 101 325 Pa v úrovni moře.

Dalším přepočtem se dostaneme k přepočtené hustotě vzduchu.

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot T} = \frac{91\,519}{287 \cdot (273,15 + 10)} = 1,12619 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (3.6)$$

ρ hustota vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

r plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T termodynamický teplota (K)

Dosažením předchozího přepočtu barometrického tlaku, využitím plynové konstanty pro vzduch a následného přepočtu průměrné teploty v Moldavě v Krušných horách během roku se dostaneme k hodnotě $1,12619 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Při tlaku 100 kPa je rovna $1,276 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tudíž zde můžeme vidět nepatrný pokles hustoty vzduchu.

Pokud máme hotové přepočty, můžeme si pomocí odečtení příslušných hodnot výkonu pro danou sílu větru ze stránek výrobce (zde uvedeno jako Obr.21) a daných přepočtů vypočítat potenciální zisk větru pomocí následujícího vzorce:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2 \text{ (W)} \quad (3.7)$$

ρ hustota vzduchu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

v průměrná rychlost větru ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$\pi \cdot r^2$ plocha prošlého vzduchu přes průměr lopatek (m^2)

r poloměr lopatek (m), zde 35,5 m

Dosazením do vzorce dojdeme k potenciálnímu maximálně možnému výkonovému zisku z VtE v daném místě. Výsledky výpočtů si můžeme prohlédnout v tabulce pod textem.

Výkon VtE (kW)	Při rychlosti (m.s ⁻¹)	Potenciální 100 % výkon (kW)
127	5	278,68
240	6	481,55
400	7	764,68
626	8	1141,45
892	9	1625,23

Tab. 5 – Potenciální výkonový zisk

Hodnoty výkonu VtE byly vyčteny z tabulky výrobce pro danou rychlost [8].

Převzetím některých dat z Tab.3 pro Weibullovo rozdělení větru, konkrétně se jedná o průměrnou rychlost a relativní četnost dnů v roce, se můžeme pomocí extrapolace výkonů VtE z Tab.4 dostat k hodnotám vyrobené energie, která se dá očekávat od VtE ENERCON E-70 na zvoleném místě stavby nad Moldavou v Krušných horách.

Přepočtená hustota vzduchu (kg.m ⁻³)	Průměrná rychlost větru (m.s ⁻¹)	Relativní četnost větru (dny)	Vyrobená energie (MWh)
1,12619	6,30	17,9	123,71
	5,86	11,3	60,87
Délka dne (h)	6,07	7,7	46,94
24	6,15	10,2	64,80
	7,31	32,5	366,68
	8,82	83,6	1694,26
	7,28	31,8	353,10
	6,68	20,8	174,38
	7,61	23,7	306,55
	8,99	42,7	912,80
	8,90	47,1	978,15
	6,72	36,2	308,08
Průměr	7,83		5159,56
Suma		365,6	5390,33

Tab. 6 - Energetický roční zisk z VtE

Z tabulky je možné vyčíst vyrobenou energii v rámci využití četnosti průměrné rychlosti větru napříč rokem. Hodnota průměru vyrobené energie odpovídá teoreticky stálému větru o hodnotě 7,83 m.s⁻¹ po dobu celého roku. Energetický zisk při tomto stálém větru je nepatrně nižší než součet jednotlivých dílčích energetických zisků. V kolonce suma můžeme naopak vidět celkový roční zisk, kdy jsou započítány veškeré hodnoty z tabulky napříč celým rokem. Výpočtem docházíme k údaji 5390,33 MWh vyrobené energie za jeden rok.

3.6 Efektivnost větrné elektrárny

Efektivnost větrné elektrárny můžeme kromě samotné účinnosti porovnat také s kritériem, které nazýváme roční využití výkonu. Samotný výpočet je možné si prohlédnout pod textem.

$$k_r = \frac{E_r}{P_{inst} \cdot t_r} = \frac{5390,33}{2,3 \cdot 365,25 \cdot 24} = 0,267 (-) [2] \quad (3.8)$$

k_r koeficient ročního využití výkonu (-)

E_r roční vyrobená elektřina (MWh)

P_{inst} instalovaný výkon VtE (MW)

t_r délka roku (h)

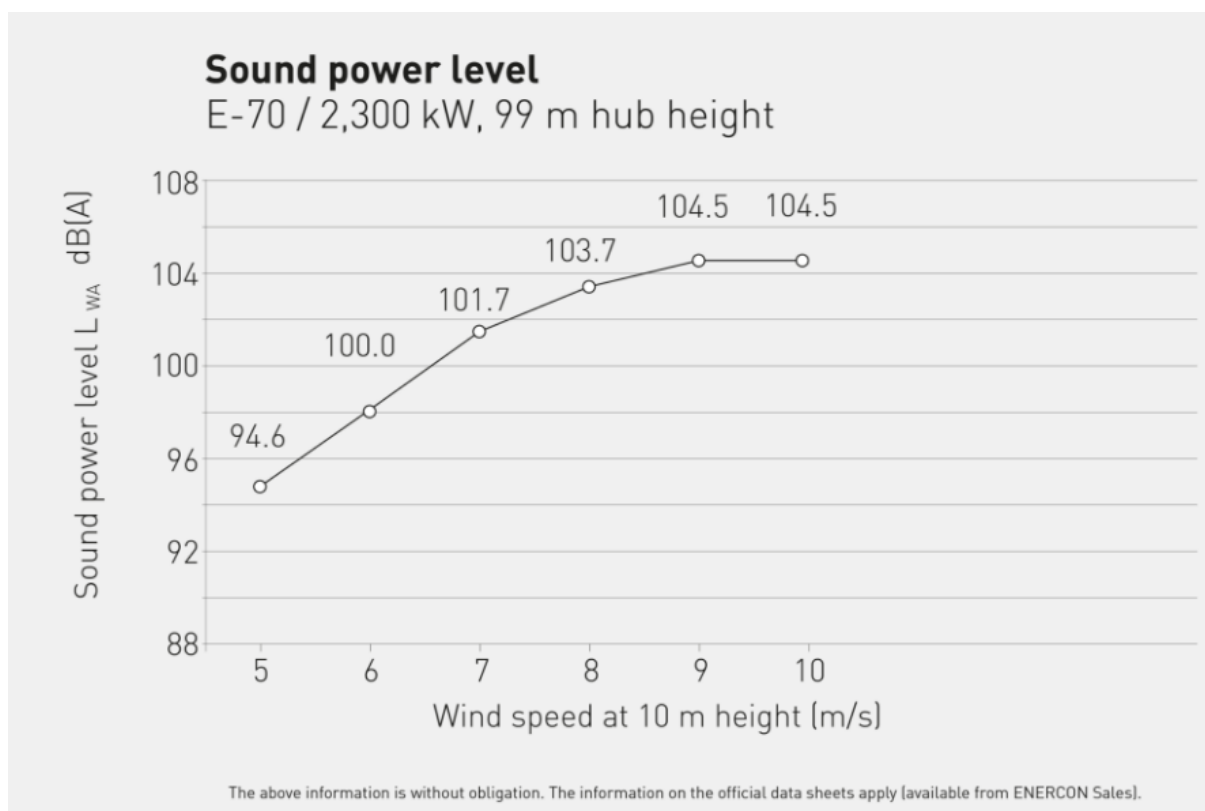
Roční vyrobenou energii dosadíme jako průměrnou roční vyrobenou energii napříč rokem z kapitoly 3.5. Délka roku je v našem případě 365 a ¼ dne.

V ČR se koeficient ročního využití energie z VtE pohybuje podle [28] kolem hodnoty 22,6 %. Spočítaná hodnota dosahuje 26,7 %, která převyšuje průměr ČR. V takovém případě je využití instalovaného výkonu VtE více než čtvrtinové.

3.7 Hluk

Každá VtE vydává hluk způsobený obtékáním větru kolem lopatek rotoru. Oproti starší koncepci VtE jsou současné VtE mnohem větších rozměrů. Na druhou stranu se setkáváme s pokročilejší technologií tvarování lopatek a zvýšené izolace gondoly. Hluk se měří pomocí přístrojů a v EU jsou stanoveny příslušné limity, které si následně samotné členské státy mohou nadále poupravit či zpřísnit dle svého. Typicky se v EU dle [12] shledáváme s různými možnostmi pohledu na hlukovou hranici. Nejběžněji se odlišuje hladiny hluku v období noci (22:00-6:00) a dne, kdy v noci je pohlíženo na hodnoty přísněji. V ČR přicházíme do styku s hodnotami 40 a 50 dB (pořadí noc/den).

Mnou vybraná VtE – ENERCON E-70 dosahuje následujících hodnot hluku.



Obr. 28 – Hluk VtE ENERCON E-70 v závislosti na rychlosti větru

Jak je možno vidět, VtE dosahuje hodnot mezi 94,6 až 104,5 dB. Při porovnání s průměrnou rychlostí větru z Tab.4 jsou pro nás nejdůležitější hodnoty mezi 100,0 až 104,5 dB. Pokud využijeme jeden z kalkulačků [21] nezohledňující reliéf krajiny, kde se mezi obcí a VtE vyskytuje zlom, tak při vzdálenosti 1,5 km od nejbližšího obydlí se hodnota hluku pohybuje mezi 30,5 až 41 dB pro maximální rychlost VtE. Z těchto údajů můžu usoudit, že VtE by po hlukové stránce mohla vyhovět. Ve skutečnosti by se použil zřejmě nižší tubus, zde jsou ovšem data pro výšku 99 m. Hodnota 41 dB přesahuje limit pro noční dobu, ovšem během noci se setkáváme se značným poklesem větru, který by tudíž neměl takovou rychlost, a proto by se do limitu 40 dB vešel.

3.8 Kalkulace nákladů

V této kapitole si rozčleníme jednotlivé náklady týkající se výstavby VtE. Dílčí položky nebudou zahrnovat veškeré reálné skutečnosti, jedná se o hrubý odhad nákladů pro výstavbu VtE poblíž Moldavy v Krušných horách.

Veškeré udané ceny jsou počítány bez DPH.

3.8.1 Cena větrné elektrárny

Samotná VtE je nejdražší položkou kalkulace. Opotřebované elektrárny ENERCON E70-4 můžeme pořídit přibližně v rozmezí 300 tisíc € až 1 milion €. U nás se ovšem bavíme o elektrárně nové. Firma ENERCON nemá zveřejněný údaj o ceně na svých stránkách. Podle webové stránky [24] se můžeme dostat k ceně již stojících VtE. Zde se jedná podle [23] o dvojici VtE. Pro odhad ceny VtE budu proto brát cenu poloviční – 28 milionů Kč.

3.8.2 Napojení na síť

Napojení na síť bude provedeno pomocí podzemního kabelu pro hladinu VN – 22 kV. Jedná se o úsek dlouhý 2,1 km vedoucí podél uvažované zpevněné cesty, která bude zhotovena před stavbou samotné VtE. Kabel povede v zemi podél panelové cesty směřující z kopce do Moldavy v Krušných horách. Jelikož je transformátor součástí dodávané VtE, tak musíme pouze provést samotné napojení kabelu na začátek Moldavy, kde je umístěn transformátor 22 kV/400 V. Kabelové vedení bude použito z estetického důvodu, aby nebyl ovlivněn ráz krajiny více, než by bylo zdrávo (již samotná VtE bude značně ovlivňovat ráz krajiny). Cenu zemních kabelů budu uvažovat ve výši 800 Kč/m. Jednoduchým vynásobením délkou úseku a ceny za metr dojdou k hodnotě 1,68 milionu Kč. K této částce dále uvažuji odhadem 1,32 milionu Kč za pokládku a napojení na síť. Dohromady se jedná o 3 miliony Kč.

3.8.3 Komunikace

Ke každé funkční VtE se musí ze zákona zajistit přístup pro údržbu. Pro dosažení tohoto požadavku, který bude navíc rozšířen samotnou podstatou dopravy VtE na místo určení, se na základě porady s lidmi z oboru stavařství dostávám na částku 1000 Kč/m², která zahrnuje práci, dovoz materiálu z blízkého kamenolomu a lehké terénní úpravy. Komunikace bude zřejmě postavena na základech současné cesty, bude zpevněna pro účely stavby kamennou drtí/drceným asfaltem. Výměr této cesty pro napojení od betonové cesty je při uvažované šířce komunikace 3,5 m délka 350 m nové komunikace (změna současné polní cesty na zpevněnou komunikaci). Z těchto úvah se dostávám na celkový výměr 3675 m². Následným propočtem dojdou k částce 3,675 milionu Kč, kterou pro zjednodušení zaokrouhlím pro nečekané výdaje na částku 4 milionů Kč.

3.8.4 Pozemek

Výměra pozemku pro elektrárnu o velikosti 2 MW je podle [10] 1,5 akru pozemku, kde 1,5 akru ≈ 4747 m². Cena pozemku za 1 m² v Moldavě v Krušných horách se dle [11] pohybuje v rozmezí 15-21 Kč/m². Pro svoji úvahu si vyberu vyšší cenu tohoto rozpětí ve výši 20 Kč/m². Při uvažovaných 4747 m² se jedná o částku 80 940 Kč, kterou zaokrouhlím na částku 100 tisíc Kč. Prozatím jedná o nejnižší částku, která se nepohybuje v milionech Kč.

3.8.5 Administrativní činnost

Část, která je nutná a trvá zdaleka nejdéle, se týká administrativy. Shromáždění jednotlivých povolení, dokumentace potřebné pro stavbu, zapsání do územního plánu obce (zde se již s VtE počítá) zabere velké množství času. Do administrativní činnosti bych dále zahrnul roční měření intenzity větru na místě uvažované VtE, které není nezbytné, ovšem podává značný přínos informací pro investora, zda se má pustit do takto velkého projektu (záleží na velikosti podnikatelského subjektu – míra peněz je relativní) a ne nepochybným bonusem pro materiálové podklady při schvalovacím procesu VtE náležitými právními subjekty. Odhad částky pro tuto činnost není jednoduchý. Při uvažování schvalovacího procesu 2-3 roky odhaduji, že by se mohlo jednat o částku 3-4 miliónů Kč.

3.8.6 Suma nákladů

Pokud posčítáme dílčí položky nákladů a seřadíme si je do tabulky znázorněné níže, dostaneme se k hodnotám, kde zdaleka nejvyšší částkou je samotná VtE s její instalací. Komunikace a napojení na síť se bude pohybovat v podobných částkách, zde 3-4 miliony Kč. Obdobnou částku odhaduji u administrativní činnosti spojené se získáváním údajů. Zdaleka nejlevnější je pořízení pozemku, které při nejdražší možné variantě bude dosahovat částky 100 tisíc Kč.

Položka	Částka (bez DPH)	Kč
Větrná turbína	28 000 000	
Napojení na síť	3 000 000	
Komunikace	4 000 000	
Administrativa	4 000 000	
Pozemek	100 000	
Celkově	39 100 000	

Tab. 7 – Celkové náklady na stavbu

Celkové náklady po sečtení jednotlivých položek dosahují výše 39,1 milionu Kč. S touto částkou budeme dále počítat v kapitole týkající se ekonomických ukazatelů.

3.9 Zisk z prodeje elektřiny

Výstavbou VtE cílíme na zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie na našem trhu, snížení emisí produkovaných výrobou elektřiny a spousty dalších faktorů. Hlavním cílem pro investora VtE je vydělat finanční prostředky prodejem elektřiny do elektrické sítě.

Výsledná částka výkupu elektřiny od subjektu vlastníci jakýkoli z OZE se skládá ze dvou částí. První z nich výkupní cena za MWh, která může být podle typu smlouvy fixní či hodinová. Druhá část se týká podpory OZE. Tato podpora je také označována jako „zelený bonus“.

3.9.1 Výkupní cena

Rozdíl mezi výkupní cenou elektřiny a využitím zeleného bonusu je ve formě prodeje. U výkupní ceny je nám garantován 100 % odkup elektřiny od některého z následně zmíněných subjektů: výrobce elektřiny, provozovatel distribuční či přenosové soustavy [5]. Výběrem výkupní ceny nad využitím zeleným bonusů se zřikáme možnosti využití jakýchkoli bonusů. Výkupní cena je pro rok 2018 stanovena ve výši 1930 Kč/MWh [3]. Při uvažování této ceny provedeme dva výpočty. Jeden pro sumu jednotlivých příspěvků energie a druhý pro zisk energie během stálého větru. Hodnoty jsou převzaty z Tab.5 a počítány jako Cash Flow – tok peněz v rámci roku (zde pouze kladné hodnoty).

$$CF_{výk} = \text{výkupní cena} \left(\frac{\text{Kč}}{\text{MWh}} \right) \cdot \text{Energie (MWh)} \quad (3.9)$$

$$CF_{výk,rok} = 1930 \cdot 5390,33 = 10,4033 \cdot 10^6 \text{ Kč} \quad (3.10)$$

$$CF_{výk,\emptyset} = 1930 \cdot 5159,56 = 9,9773 \cdot 10^6 \text{ Kč} \quad (3.11)$$

Jak můžeme vidět, celková tržba za rok je vyšší pro sumu příspěvků než při nereálném uvažování průměrné rychlosti větru.

3.9.2 Zelený bonus

Oproti výkupní ceně se u zeleného bonusu setkáváme se značně vyšší výkupní cenou, která je navýšena dotací od OTE, která nám proplácí tzv. „zelený bonus“. Výše tohoto příspěvku se liší každým rokem a je udávána ERÚ. Hlavní nevýhodou výkupu s užitím zelených bonusů je nutnost si najít výkupce naší vyrobené elektřiny a sjednat s tímto subjektem výkupní cenu. Tím se dostáváme k nejistotě v podobě možnosti vypovězení smlouvy či její vypršení. Zelený bonus se nevztahuje na spotřebovanou elektřinu na vlastní provoz VtE či na dodaný výkon nad sjednanou smlouvu [5]. Opět provedeme výpočty při uvažování zeleného bonusu. Výši cen převezmu z dat ERÚ (1930 za výkupní cenu, 1340 Kč/MWh za zelený bonus), přestože smluvní cena za výkup soukromým subjektem je předmětem vyjednávání. Pro naše účely bude ovšem dostačující.

$$CF_{výk+bon} = \text{výkupní cena}[fix + bonus] \left(\frac{\text{Kč}}{\text{MWh}} \right) \cdot \text{Energie (MWh)} \quad (3.12)$$

$$CF_{výk+bon,rok} = (1930 + 1340) \cdot 5390,33 = 17,6264 \cdot 10^6 \text{ Kč} \quad (3.13)$$

$$CF_{výk+bon,\emptyset} = (1930 + 1340) \cdot 5159,56 = 16,8718 \cdot 10^6 \text{ Kč} \quad (3.14)$$

Již při prvním pohledu vidíme více než poloviční rozdíl v částce účtované za MWh a s tím spojené rozdílné zisky v rámci období jednoho roku.

3.10 Ekonomická kritéria

Pilířem každého vyhodnocení uvažované investice je její ekonomická rentabilita. Mezi ekonomická vyhodnocení patří následující kritéria ekonomické efektivnosti: reálná doba návratnosti, čistá současná hodnota a vnitřní výnosové procento.

Předtím, než se pustím do výpočtů kritérií ekonomické efektivnosti, je potřeba se rozhodnout, jakým způsobem bude výstavba a provoz VtE financována. V mém případě budu uvažovat část vlastního kapitálu, který bude doplněn o půjčku.

3.10.1 Financování projektu

Z kapitoly 3.8.6 jsme si spočetli náklady ve výši 39,1 milionu Kč. Do těchto nákladů nebyla započítána údržba VtE, která činí v průměru 2 % z prodané energie ročně. Jednoduchým výpočtem docházíme k částce 350 tisíc Kč ročně. Na energii spotřebovanou pro vlastní spotřebu a nedomluvené přetoky energie mimo rámec smlouvy se nevztahuje využití zelených bonusů. Do takového hloubky ovšem svou ekonomickou úvahu rozpracovávat nebudu. Tato fakta by se uvažovala v reálném hodnocení projektu. Když vezmeme částku 39,1 milionu Kč a budeme v mém případě uvažovat o vlastním kapitálu ve výši 9,1 milionu Kč, vyjde nám z toho, že půjčka bude ve výši 30 milionů Kč. Na půjčku budu uvažovat roční úrok ve výši 10 %. Splatnost půjčky bude 10 let. Pro kalkulaci roční splatné částky využiji výpočet anuity, kterou spočtu následovně:

$$S = U \cdot \frac{q^T \cdot (q-1)}{q^T - 1} = 30 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,1^{10} \cdot (1,1-1)}{1,1^{10} - 1} = 4,88 \cdot 10^6 \text{ Kč} \quad (3.15)^3$$

S roční splatná částka (Kč)

U výše úvěru (Kč)

q kvocient (základ 1,0 [100 %] + úrok v %)

T časové období (počet let)

Z výpočtu je vidět, že roční splatná částka za úvěr činí 4,88 miliónu Kč. K této částce budeme nadále při dalších úvahách připočítávat roční částku za údržbu VtE v již zmíněné výši 350 tisíc Kč.

³ Převzato ze cvičení předmětu EPD: „6 Rokový počet.pdf“

3.10.2 Reálná doba návratnosti

Reálná doba návratnosti na rozdíl od prosté doby návratnosti, která je také jedním z ekonomických ukazatelů, zohledňuje faktor času a ušlou příležitost pro jiné investice. Hlavní myšlenkou reálné doby návratnosti je, jak je možné vytušit, vypočítat, kdy se nám daná investice vrátí. Vzorec pro výpočet je téměř shodný s výpočtem čisté současné hodnoty (3.17), zmíněné v další kapitole. Jediným rozdílem je doba, se kterou počítáme. Z hlediska investora hledáme co nejnižší dobu, za kterou se nám investice navrátí. Takový faktor ovšem ne vždy koresponduje s výnosností. Reálnou dobu návratnosti můžeme vyjádřit jako:

$$\sum_{t=1}^{T_{sd}} CF_t \cdot (1+r)^{-t} - I \quad (\text{počet let}) \quad (3.16)^4$$

CF_t Cash Flow daného roku [zde zisk za rok] (Kč)

t daný rok (-)

T_{sd} doba návratnosti (počet let)

r diskont (%)

I výše investice (Kč)

Pro výpočet reálné doby návratnosti využijí SW Wolfram Mathematica, kdy po dosazení docházím k době návratnosti 3,87 roku. Ve výpočtu je uvažován diskont ve výši 9 %. Výše investice, jak je zmíněno v kapitole 3.8.6, je 39,1 miliónu Kč. Do kalkulace jsem nadále zahrnul roční náklady na provoz větrné elektrárny z kapitoly 3.10.1. Ty dosahují částky 350 tisíc Kč na samotný provoz navýšené splácením bankovního úvěru v hodnotě 4,86 miliónu Kč. Dohromady tyto dvě položky dosahují výše 5,23 miliónu Kč.

Projekt, jež se splatí za necelé čtyři roky, je snem každého investora. Důvod, proč se jedná o krátký interval můžeme hledat ve vysoké výnosnosti výkupu elektřiny, kdy v našem případě využíváme zelených bonusů.

⁴ Převzato z Přílohy č. 5 k vyhlášce č. 480/2012 Sb

3.10.3 Čistá současná hodnota

Čistá současná hodnota, anglicky Net Present Value (NPV), udává částku, o kterou se zvýší kapitál společnosti jako součet současných hodnot budoucích peněžních toků přepočtených pomocí diskontu [6]. NPV by měla být vždy kladná a maximální. V opačném případě bychom neměli projekt realizovat. NPV spočteme následovně:

$$NPV = \sum_{t=1}^T CF_t \cdot (1 + r)^{-t} - I \text{ (Kč)} \quad (3.17)^5$$

NPV Net Present Value, čistá současná hodnota (Kč)

CF_t Cash Flow daného roku (Kč)

t daný rok (-)

T životnost projektu (počet let)

r diskont (%)

I výše investice (Kč)

Projekt si můžeme rozdělit na dvě části. V první zainvestujeme výstavbu VtE, zafinancujeme VtE využitím úvěru. V druhé části po splacení úvěru (délka úvěru je 10 let) již pouze VtE servisujeme a získáváme prostředky za prodej elektřiny.

Diskont je opět zvolen ve výši 9 %, dle kapitoly 3.8.6 je investice 39,1 miliónu Kč. Výsledná vypočtená částka je 87 290 200 Kč. Z výpočtu je zřejmé, že jsme nejenom dosáhli kladné hodnoty, ale že jsme zúročili naši investici do VtE více než dvojnásobně.

⁵ Převzato z přednášky EPD – 5. a 6. Kritéria efektivnosti.pptx

3.10.4 Vnitřní výnosové procento

Vnitřní výnosové procento je poslední ze zmíněných ekonomických kritérií. V anglické literatuře je možné vyhledat pod zkratkou IRR – Internal Rate of Return. Hodnota NPV je při IRR nulové. Hledáme takovou hodnotu IRR, při které je vyšší než diskontní sazba. IRR je oproti NPV méně realistická, protože se snaží zohlednit maximální možnou výtěžnost investice, kdy NPV naopak zohledňuje výši investice/příjmu [6]. IRR je definováno jako:

$$\sum_{t=1}^T CF_t \cdot (1 + IRR)^{-t} - I = 0 \quad (3.18)^6$$

CF_t Cash Flow daného roku (Kč)

T počet let (-)

t daný rok (-)

IRR vnitřní výnosové procento (%)

I výše investice (Kč)

Projekt si rozdělíme na dvě poloviny. V první části se uvažuje půjčka a splácení úvěru. Druhá část disponuje pouze údržbou VtE.

Během prvních 10 let provozu VtE, kdy splácíme úvěr, dosahuje výše IRR 20 %. Naopak v druhé polovině životnosti VtE je IRR rovno 46 %. Pokud zprůměrujeme hodnoty, dostaneme se k 33 %. Kritériem IRR je maximální možná hodnota. Při porovnání s výší diskontu z kapitoly 3.10.3, která byla 9 %, jasně splňujeme předpoklad, že IRR je větší než diskontní sazba.

⁶ Převzato ze cvičení EPD: cv10 Kritéria ekonomické efektivity.pdf

4. Porovnání větrných elektráren

Pomocí jednotlivých výpočtů z 3. kapitoly můžeme porovnat mnou teoreticky navrhnutou VtE s daty jiných dvou VtE postavených na katastrálním území jedné obce na území Krušných hor. Jedná se o technická data, nikoliv ekonomická kritéria.

Všechny tři porovnávané VtE jsou produktem jedné firmy ENERCON, která vyrábí shodný typ VtE E-70 a má stejný nominální výkon. Teoretická VtE má vyšší tubus (99 m), který byl zvolen z důvodu dostupnosti dat o hluku. U stojících VtE se setkáváme s rozdílem 14 m výšky tubusu (mají 85 m). Fungující VtE se nalézají ve výšce 612 a 593 m.n.m. U teoretická VtE u obce Moldava v Krušných horách bychom se setkali s nadmořskou výškou 850 m.n.m. Tento výškový rozdíl v nadmořské výšce bude mít bezpochyby vliv na rychlost větru a z ní pramenící energetický zisk. Technická data a jejich rozdíly si můžeme prohlédnout přehledněji v tabulce.

Nadmořská výška	850	612	593	m.n.m.
Výrobce	ENERCON			
Typ	E-70			
Výkon	2			MW
Vztah	teoretická	již fungující		
Výška tubusu	99	85		m
Průměr rotoru	71			m
Instalace		2005	2007	rok

Tab. 8 – Technický přehled porovnávaných VtE

4.1 Porovnání přeměněné energie

Nejnázornějším porovnáním větrných elektráren je porovnání jejich energetických zisků. U svého návrhu jsem vycházel, jak již bylo popsáno, z dostupných dat ÚFA AV ČR pro hodnoty větru přečtené dle [19] na danou výšku tubusu (99 m). Ze stránek výrobce VtE společnosti ENERCON a z dostupných naměřených charakteristik jsem interpoloval jednotlivé „naměřené“ údaje pro příslušnou rychlost větru. Z těchto rychlostí jsem vypočetl energetický zisk, který jsem následně sečetl pro období celého roku přes četnost větru. Oproti tomu údaje z fungujících VtE jsem získal zásluhou svého vedoucího práce – Ing. Víta Kleina, Ph.D., který mi zajistil hodnoty z těchto VtE. Místa větrných elektráren nemohou být z důvodu anonymity uvedena, jsou však zaručena vedoucím práce.

Pozn.: Tabulka se nachází na další stránce.

Nadmořská výška (m.n.m.)	850	612		593		
Výrobená energie		brutto	netto	brutto	netto	rok
(MWh)		2 522,83	2 493,00			2005
		5 465,84	5 404,90			2006
		5 587,15	5 521,78	260,67	257,13	2007
		5 241,55	5 178,00	4 115,99	4 060,00	2008
		4 575,67	4 522,13	4 324,73	4 265,91	2009
		3 913,06	3 867,28	3 718,21	3 667,64	2010
		4 949,19	4 891,29	4 637,65	4 574,57	2011
		5 360,72	5 298,00	4 925,04	4 858,05	2012
Průměr (MWh)	5390,33	5013,31	4954,77	4344,32	4285,23	

Tab. 9 – Porovnání zisků energie z teoretické a fungujících VtE

Získaná data jsou z různých období. VtE v nadmořské výšce 612 m.n.m. byla spuštěna do provozu o 2 roky dříve než větrná elektrárna v 593 m.n.m. Rozdíl mezi brutto a netto výrobou se liší ve vlastní spotřebě energie na provoz VtE. Snížené hodnoty u VtE v 612 m.n.m. v roce 2015 a u VtE v 593 m.n.m. v roce 2007 jsou z důvodu stavby VtE v daném roce v závislosti na období od konce roku.

Při porovnání energetických zisků všech tří elektráren můžeme z Tab.9 vyčíslit, že mezi hodnotami nejsou velké rozdíly. Jednotlivé roky se liší energetickým ziskem v závislosti na průměrné rychlosti daného roku. Nejblíže jsou si hodnoty teoretické VtE s již fungující pro rok 2012. Z toho usuzují, že ve mnou vypočtených hodnotách se nenachází žádné závratné chyby a shodují se s běžnou realitou.

4.2 Vlastní spotřeba VtE

Každá VtE potřebuje pro svůj chod energii na dálkový přenos dat, na řízení chodu VtE pro natáčení lopatek a veškerých pohonů (hydraulických, elektrických, pneumatických). Tato energie se bere ze samotného energetického zisku VtE, popřípadě v době odstavení z elektrické sítě, na kterou je VtE napojena.

Vlastní spotřeba se pohybuje nad 1 % vyrobené energie VtE. Z naměřených údajů fungujících VtE můžeme vidět, že vlastní spotřeba dle ERÚ pro níže zmíněné roky, se opravdu pohybuje nad 1 % vyrobené energie. Zde konkrétně 1,17 % v průměru pro VtE (612 m.n.m.), pro druhou VtE máme jen jeden údaj, a to 1,36 %. Rozdíl se může týkat samostatným chováním VtE na regulaci větru.

	Nadmořská výška (m.n.m.)	
Průměr pro vlastní spotřebu elektřiny	612	593
2005	98,817 %	
2006	98,885 %	
2007		98,640 %
2008	98,788 %	
Průměr těchto let	98,830 %	

Tab. 10 – Vlastní spotřeba VtE

5. Závěr

Větrné elektrárny se řadí mezi obnovitelné zdroje energie. V rámci životního cyklu větrné elektrárny jsou energetické náklady na její výrobu zanedbatelné ve srovnání s množstvím vyrobené energie samotnou větrnou elektrárnou. Po postavení větrné elektrárny již energii vyrábí. Využitím těchto elektráren snížíme uhlíkovou stopu. Podpora výkupu elektrické energie z větrných elektráren se řadí vůbec mezi ty nejnižší. Nenastává zde tedy fenomén náhlého postavení řady fotovoltaických elektráren na úrodné půdě, jako tomu bylo před pár lety.

Historie větrných elektráren se datuje až do období starověku, kde se využívala síla větru jako pohon zavlažovacích zařízení, později ve středověku jako mlýny na drcení obilí. Prapůvod větrných elektráren můžeme hledat na území Egypta či Blízkého východu. Rozšíření zaznamenaly větrné elektrárny údajně s migrací obyvatelstva a válečných výprav, jako například křížácké války do Svaté země.

Samotné větrné elektrárny můžeme rozdělit podle celé škály různých parametrů. Mezi ty hlavní patří typ větrné turbíny, rotoru, počet listů, výkon, umístění a regulace výkonu. O jednotlivých rozděleních pojednává 2. kapitola. Teoretická část bakalářské práce může poskytovat uceleně zpracovaný přehled vývoje a rozdělení větrných elektráren pro uvedení do problematiky větrné energetiky.

Rozmach větrné energetiky nastal s první ropnou krizí, kdy se prudce zvýšila cena ropy za barel. V 70. letech se stavělo velké množství větrných elektráren na území USA s výkonem v řádech kW. S poklesem ceny ropy nastal na určitou dobu opět útlum, který vystřídal zájem o větrné elektrárny s nástupem další krize. Kolem milénia se výkon větrných elektráren přehoupl přes pomyslnou hranici 1 MW, kdy bylo možné technologicky zvládnout a hlavně řídit větrné elektrárny s velkým rotorem. Postupně se začaly objevovat větrné parky na mořích, tzv. off-shore větrné elektrárny. Na mořích je značně stabilnější a silnější vítr. Pevnina poskytuje vhodné podmínky na horách, kde ovšem narážíme na problémy estetického rázu, ochrany přírody, zvířectva či samotných obyvatel, kteří bydlí v blízkosti.

V České republice se momentálně vyskytují větrné elektrárny o celkovém výkonu 309,1 MW (data platná k 31.12.2017, údaj z ČSVE), kdy hlavní nárůst zaznamenaly až po roce 2000. Nejvíce vyrobené energie je v chladnějších měsících pro vyšší výskyt větru. Potenciál pro vybudování dalších větrných elektráren stále je. Naráží se na problém umístění větrných elektráren, kdy připadají v úvahu kraje Ústecký, kraj Vysočina a kraj Moravskoslezský. Největším nepřítelem větrných elektráren je jejich schvalovací proces. Samotná stavba trvá pouze v řádech jednotek měsíců.

V rámci schvalovacího procesu musí každá elektrárna být zapsána v územním plánu rozvoje obce. K tomu potřebuje souhlas místních obyvatel v referendu. Dále je nutný posudek ochránců přírody, zda se větrná elektrárna nenalézá v cestě tahu ptactva, je potřeba dodržet hlukové limity větrné elektrárny, tudíž postavit větrnou elektrárnu poblíž obydlení je prakticky nemožné. Větrná elektrárna nesmí narušit esteticky významnou chráněnou lokalitu. Pro úspěšný schvalovací proces se provádí roční měření větru na uvažovaném místě stavby na provizorním stožáru. Schvalovací proces je zdaleka nejdelší časový úsek z celé časové osy výstavby větrné elektrárny.

Pro svůj návrh jsem vybíral na území Krušných hor vhodnou lokalitu. Ačkoliv se zdá, že najít vhodné místo v horách je lehké, opak je pravdou. Většina míst je již zabrána, nebo se nachází v blízkosti chráněných území. Nakonec jsem si z celkového počtu tří potenciálních míst vybral lokalitu Moldavy v Krušných horách, kterou jsem osobně navštívil. Později jsem zjistil, že na území Moldavy je v ÚP zapsána, ba dokonce i povolena výstavba menšího počtu větrných elektráren, která je odsouhlasena místním obyvatelstvem.

Volba typu větrné elektrárny padla na německého výrobce ENERCON. Velikost a typ větrné elektrárny jsem uzpůsobil získaným datům z VtE, které jsou již v provozu, pro porovnání s navrhovanou VtE. Jedná se tedy o typ E-70 E4 o nominálním výkonu 2,3 MW.

Větrnou elektrárnu bych umístil na kopec v blízkosti panelové cesty nad obcí Moldava v Krušných horách. Průměrná přepočtená rychlost větru z dat ÚFA AV ČR zde dosahuje $7,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pomocí funkce Weibullova rozdělení jsem vypočetl energetický zisk v rámci celého roku odpovídá hodnotě 5930,33 MWh. Efektivní využití větrné elektrárny, kdy se porovnává nominální výkon a vyrobená energie dosahuje 26,7 %, což nám říká, že se jedná o větrné, dobře využitelné místo pro stavbu větrné elektrárny. Při přepočítání hlukových limitů by měla větrná elektrárna obstát, ačkoli limity hluku pro ČR jsou přísnější než v ostatních státech EU či USA.

Znalosti o ekonomických ukazatelích jsem nabyl v předmětu „Ekonomika Podniku“. Pro reálné využití těchto znalostí jsem využil část 3. kapitoly. Nákladnost investice byla spočítána na částku 39,1 milionu Kč, kdy jednotlivé dílčí aspekty hodnocení jsou popsány v kapitole 3.8. Samotné zisky z prodeje elektřiny se liší ve využití fixní výkupní ceny nebo výkupní ceny navýšené o zelené bonusy. Zde byla uvažována varianta se zelenými bonusy, která obnáší větší ziskovost, ale také riziko spojené s prodejem elektřiny. Zisky včetně zelených bonusů činí 17,6264 miliónu Kč ročně.

Základem investice je vlastní kapitál. V rámci své práce jsem uvažoval vlastní kapitál ve výši 9,1 miliónu Kč, kdy dalších 30 miliónu činila půjčka na dobu 10 let s úrokem 10 %. Roční náklady v prvních 10 letech dosahují 5,23 miliónu Kč, kdy 4,88 miliónu Kč činí splátka s úroky a 350 tisíc Kč ročně odpovídá údržbě a provozu větrné elektrárny (částka na údržbu je uvažována i období 11.-20. roku provozu větrné elektrárny).

Pro ekonomické zhodnocení jsem využil ekonomických kritérií. Jmenovitě se jedná o anuitu (zmíněná výše splátky), reálnou dobu návratnosti v období 4 let, čistou současnou hodnotu, rozdělenou na část prvních deseti let a druhé půlky ve výši 87,29 miliónu Kč, a nakonec vnitřní výnosové procento opět rozdělené podle doby splátky na 20 %, resp. 46 %, v průměru 33 %.

V poslední kapitole jsem porovnal mnou navrhnutou větrnou elektrárnu s údaji již fungujících dvou elektráren. V přímém porovnání výkonu je vidět, že výkon odpovídá lokalitě Krušných hor. Drobné odchylky se mohou vyskytovat mým idealizovaným pohledem na věc, ovšem hlavním faktorem bude vždy síla větru a z něho pramenící přeměna větru na energetický zisk.

Výstavbu větrné elektrárny na vybraném místě v blízkosti obce Moldava v Krušných horách bych doporučil postavit. Jedná se však o časově náročný projekt. Při dvacetileté životnosti větrné elektrárny se jedná o projekt, kdy se navrátí investované prostředky a zároveň investor vydělá. Celý projekt je závislý na kladném vyjádření všech schvalovacích subjektů.

Téma návrhu větrné elektrárny jsem si vybral z důvodu rozšíření povědomí o tuto problematiku. Na střední škole jsem se zabýval návrhem elektrárny fotovoltaické. Třebaže jsem doposud neabsolvoval předmět zaměřující se na obnovitelné zdroje na naší univerzitě, sám vidím určitou povinnost si v tomto tématu rozšířit své znalosti. Práce poskytuje ucelené shrnutí problematiky výstavby nové větrné elektrárny. Z tohoto důvodu bych svoji bakalářskou práci doporučil jako prvotní nástin pro investora, který nemá při uvažování výstavby samotné výstavby s větrnými elektrárnami zkušenosti. Zásluhou bakalářské práci jsem získal povědomí o schvalovacím procesu větrných elektráren, nahlédl jsem do problematiky územních plánů, ochrany přírody a v neposlední řadě jsem reálně využil znalosti nabyté v ekonomické části svého oboru.

Seznam literatury

- [1] Beaufertova stupnice síly větru - Inter Flag s.r.o. *Inter Flag s.r.o.* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: http://www.vlajky.cz/informace/informace_beaufertova_stupnice.php
- [2] BECHNÍK, Bronislav. Roční využití výkonu větrných elektráren v České republice: Efektivnost větrných elektráren. *TZB-info* [online]. 14.4.2014 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/11077-rocni-vyuziti-vykonu-vetrnych-elektren-v-ceske-republice>
- [3] Ceny paliv a energií: Výše výkupních cen a zelených bonusů. *TZB.info* [online]. 2018 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energie/91-vyse-vykupnich-cen-a-zelenych-bonusu>
- [4] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-861-6719-4.
- [5] Často kladné dotazy: 7. Jaký je rozdíl mezi zeleným bonusem a výkupní cenou?. *ERÚ* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy#7>
- [6] Čistá současná hodnota. *FEBMAT* [online]. 17.03.2016 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.febmat.com/clanek-cista-soucasna-hodnota-csh-npv/>
- [7] ELEKTRARNY.PRO: FVE Moldava I. [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.elektarny.pro/detail.php?id=11620>
- [8] *ENC Datenblae E: E 70* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://vttsi.free.fr/Pages/Page_Pratique/Infos_Tourisme/Infos_EoliennesDuHorps/Documents/Product_overview_E70.pdf
- [9] ENERCON: E-70 [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>
- [10] How Much Land Is Needed for Wind Turbines?: Direct Land Use. *Sciencing* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://sciencing.com/much-land-needed-wind-turbines-12304634.html>
- [11] JAKÁ JE TRŽNÍ CENA PŮDY VE VAŠÍ LOKALITĚ?: TRŽNÍ CENA PŮDY PRO ZADANOU LOKALITU. *Cenová mapa půdy* [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.cenova-mapa-pudy.cz/#vys>
- [12] JIRÁSKA, Jan. *ČSVE: Kniha Hluk větrných elektráren* [online]. , 25 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://www.csve.cz/pdf/cz/Hluk_vetrnych_elektren.pdf
- [13] KLEPÁRNÍK, Ján. *Větrná energie* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/ez/oez_wind.htm
- [14] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. *ELEKTRO* [online]. 2017, 6.12.2017, 2017(12), 68 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>

- [15] KURAS, Tomáš. Územní plán Moldavy návrh ke společnému jednání: Posouzení vlivu koncepce na předměty ochrany evropsky významných lokalit a ptačích oblastí soustavy NATURA 2000 podle § 45i zák. 114/1992 Sb., v platném znění [online]. 2012 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.moldava.cz/uzemni-plan/>
- [16] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [17] Oficiální stránky obce Moldava: Titulní strana [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.moldava.cz/titulni-strana/>
- [18] Počet listů rotoru větrné elektrárny - ČSVE - Větrné elektrárny | Větrná energie. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310#prettyPhoto>
- [19] RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01563-7.
- [20] TERÉN DESIGN, s.r.o. Možnosti umístění větrných elektráren v krušných horách z pohledu ochrany krajinného rázu [online]. 06/2004 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: http://www.kr-ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1642437
- [21] Tontechnik-Rechner - sengpielaudio: Damping of sound level (decibel dB) vs. distance [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-distance.htm>
- [22] Větrná energie - Systémy regulace. *W.E.B Větrná energie s.r.o.* [online]. 2010, [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27
- [23] Větrné elektrárny v ČR: Aktuální instalace. ČSVE [online]. 31.12.2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>
- [24] Větrný park Dukovany: Parametry některých již postavených větrníků. *Dukovany.cz* [online]. 29.12.2006 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.dukovany.cz/vetrny-park-dukovany.html>
- [25] VOBOŘIL, David. *Větrné elektrárny, princip činnosti, základní rozdělení* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [26] VOTRUBA, Jan. *Největší větrná turbína na světě byla uvedena do provozu* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/nejvetsi-vetrna-turbina-svete-byla-uvadena-provozu/>
- [27] Všeobecná cirkulace atmosféry. *Klimatologie a hydrografie pro učitele* [online]. Brno: Katedra geografie, Pedagogická fakulta, Masarykova univerzita, 2014 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/04-cirkulace.html
- [28] WÁGNER, Vladimír. Větrné elektrárny včera, dnes a zítra (díl 2.): Jak je to v České republice?. *OEnergetice.cz* [online]. 13.12.2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/vetrne-elektrarny/vetrne-elektrarny-vcera-dnes-zitra-dil-2/>

Zdroje použitých obrázků

- Obr. 1** - SKALIČKA, Zdeněk. Větrný mlýn nad Jalubím navštívily v létě tři tisíce lidí. In: *Slovácký deník* [online]. slovacky.denik.cz, 2014, 18.9.2014 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://slovacky.denik.cz/zpravy_region/vetrny-mlyn-nad-jalubim-navstivily-v-lete-tri-tisice-lidi-20140918.html
- Obr. 2** - Všeobecná cirkulace atmosféry. *Klimatologie a hydrografie pro učitele* [online]. Brno: Katedra geografie, Pedagogická fakulta, Masarykova univerzita, 2014 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/04-cirkulace.html
- Obr. 3** - Senzor a elektronika anemometru. In: *Papouch.cz* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <https://www.papouch.com/cz/shop/product/tx20eth-ethernetovy-anemometr/>
- Obr. 4** - Beufortova stupnice. In: *Pocasi-decin.cz* [online]. [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: http://www.pocasi-decin.cz/Obrázky/beufortova_stupnice.jpg
- Obr. 5** - MILICHOVSKÝ, Jan. *Rozdělení větrných elektráren*. 2017. Vlastní tvorba.
- Obr. 6** - VOBOŘIL, David. *Větrné elektrárny, princip činnosti, základní rozdělení* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- Obr. 7** - PIELKE, Roger. Windmill. In: *Climate Science: Roger Pielke Sr.* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://pielkeclimatesci.files.wordpress.com/2011/12/wind-mill.jpg>
- Obr. 8** - EKOWATT. Informace - Obnovitelné zdroje energie - Energie větru. In: *EkoWATT* [online]. 2007 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: http://ekowatt.cz/obrazky/infostranky/vitr_57.jpg
- Obr. 9** - KLEPÁRNÍK, Ján. *Větrná energie* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/ez/oez_wind.htm
- Obr. 10** - EKOBONUS, redakce. Větrné elektrárny: Nejčastější typy, experimentální projekty a zajímavosti | EkoBonus.cz. In: *EkoBonus.cz* [online]. 2012 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: https://www.nazeleno.cz/Files/ResizedImages/obrazky/2013/04/savoniova_vetrna_turbina-perex_329x-1_1304241834.jpg
- Obr. 11** - Velikost větrné elektrárny a její vývoj - ČSVE - Větrné elektrárny | Větrná energie. In: *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- Obr. 12** - Počet listů rotoru větrné elektrárny - ČSVE - Větrné elektrárny | Větrná energie. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310#prettyPhoto>
- Obr. 13** - *UK Wind farm* [online]. In: . 2016 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2016/02/uk-wind-farm01.jpg>
- Obr. 14** - GE - General Electric Wind Turbine [online]. In: . [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://2.bp.blogspot.com/-DoCHWEiMuGU/WOPxYMGsVNI/AAAAAAAA4dw/gp00Gc8w0iA-DjTNmmWDerrQz25YxHj7ACLcB/s640/GE-General-Electric-Wind-Turbine.jpg>

Obr. 15 - Strojovna větrné elektrárny bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem (výrobce ENERCON) – ČSVE – Větrné elektrárny | Větrná energie [online]. [cit. 2018-03-12]. 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)

Obr. 16 - Strojovna větrné elektrárny s převodovkou a asynchronním generátorem (výrobce VESTAS) – ČSVE – Větrné elektrárny | Větrná energie [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-\(vyrobce-vestas\)/332](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-(vyrobce-vestas)/332)

Obr. 17 - CROME, Horst. *Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-861-6719-4.

Obr. 18 - MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

Obr. 19 - Česká společnost pro větrnou energii: Větrné elektrárny [online]. 2017 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/grafy/280>

Obr. 20 - WINDENERGIE IM BINNENLAND: *The truth about windpower...* [online]. 2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://www.windenergie-im-binnenland.de/siteassessment.php>

Obr. 21 - ENERCON: E-70 [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>

Obr. 22 - Větrná mapa ČR. In: ČSVE [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/pdf/cz/vetrna-mapa.jpg>

Obr. 23 - Mapy.cz: Vlastní body [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: [https://mapy.cz/turisticka?vlastni-body&x=13.6282395&y=50.7126875&z=14&ut=Nový%20bod&uc=9epN0x1YsO&ud=50°42'25.130"N%2C%2013°38'27.238"E](https://mapy.cz/turisticka?vlastni-body&x=13.6282395&y=50.7126875&z=14&ut=Nový%20bod&uc=9epN0x1YsO&ud=50°42'25.130)

Obr. 24 - Mapy.cz: 3D pohled [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://mapy.cz/turisticka?x=13.6507412&y=50.7238551&z=15&m3d=1&height=2902&yaw=23.205&pitch=-10.07&pano=1>

Obr. 25 - ÚFA AV ČR: *Větrné podmínky ve výšce 10 m, podmínky pro malé VtE* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>

Obr. 26 - MILICHOVSKÝ, Jan. Weibullovo rozdělení relativní četnosti větru. Vytvořeno pomocí SW Wolfram Mathematica

Obr. 27 - MILICHOVSKÝ, Jan. Integrace jednotlivých funkcí Weibullova rozdělení pro dílčí součinitele „b“. Vytvořeno pomocí SW Wolfram Mathematica

Obr. 28 - ENERCON: E-70 [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>

Zdroje použitých tabulek

Tab. 1 – MILICHOVSKÝ, Jan. Závislost exponentu n korekčního vztahu na druhu povrchu. Údaje dostupné z ISBN: 80-01-01563-7. Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 2 - MILICHOVSKÝ, Jan. Hodnoty výškového korekčního činitele k_h . Údaje dostupné z ISBN: 80-01-01563-7. Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 3 - MILICHOVSKÝ, Jan. Technické údaje o VtE ENERCON E-70. Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-70/>

Tab. 4 - MILICHOVSKÝ, Jan. Relativní četnost větru napříč rokem, Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 5 - MILICHOVSKÝ, Jan. Potenciální výkonový zisk, Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 6 - MILICHOVSKÝ, Jan. Energetický roční zisk z VtE, Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 7 - MILICHOVSKÝ, Jan. Celková kalkulace nákladů, Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 8 - MILICHOVSKÝ, Jan. Technický přehled porovnávaných VtE. Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 9 - MILICHOVSKÝ, Jan. Porovnání zisků energie teoretické a fungujících VtE. Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office

Tab. 10 - MILICHOVSKÝ, Jan. Vlastní spotřeba VtE. Vytvořeno pomocí SW Microsoft Office