



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

WIND ENERGY POWER PLANT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniela Kotrnetzová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Bc. Daniela Kotrnetzová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Větrná elektrárna

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku využití energie větru pro produkci elektrické energie. Přehledovým způsobem bude pojednáno o současných trendech v konstrukci větrných elektráren, velikosti instalovaných zařízení a možnostech akumulace elektrické energie. Konkrétně bude posouzen energetický potenciál vybrané lokality, proveden návrh vhodného zařízení a posouzeny technicko–ekonomické parametry zvoleného řešení.

Cíle diplomové práce:

- Přehledovým způsobem uvést trendy technologie větrných elektáren posledních let.
- Pro konkrétní lokalitu stanovit energetický potenciál využitelný větrnou elektrárnou.
- Navrhnout typ větrné elektrárny pro zvolenou lokalitu.
- Provést technicko–ekonomické posouzení navržené větrné elektrárny.
- Navrhnout a zhodnotit způsob akumulace elektrické energie pro zrovnoměnění dodávky.

Seznam doporučené literatury:

KADRNOŽKA, Jaroslav, 1984. Teorie proudových strojů. Praha: SNTL. Učební texty vysokých škol.

PAVELEK, Milan, 2011. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 9788021443006.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá popisem větrných elektráren se zaměřením na jeden konkrétní typ elektrárny. Stručně je popsán trend větrných elektráren ve světě a v České republice. Součástí práce je výpočet větrné elektrárny, dle zvoleného typu, která je umístěna v lokalitě Prosiměřice na Znojemsku. Zároveň je v práci uveden i výpočet pomocí programu RETScreen.

Abstract

This thesis describes wind power plants with focus on specific type of power plant. The trends of wind turbines in the world and in the Czech Republic are briefly described. Part of the thesis is the calculation of wind power plants, according to the selected type, which is located in the site of Prosiměřice in Znojmo. Calculation using RETScreen programme was also used.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, Vestas, RETScreen, akumulace

Key words:

Wind Powerplant, Vestas, RETScreen, accumulation

Bibliografická citace

KOTRNETZOVÁ, D. *Větrná elektrárna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedených zdrojů. Dále prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, a že nedošlo k porušení autorských práv (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 25. 5. 2018

.....
Daniela Kotrnetzová

Poděkování

Ráda bych především poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za pomoc při zpracování práce. Dále bych ráda poděkovala za podporu ze strany rodičů během celého studia.

Obsah

Úvod.....	10
1. Historie větrných elektráren.....	11
2. Větrné elektrárny ve světě	12
3. Větrná energetika v ČR.....	15
3.1. Výkupní ceny energie v ČR	15
4. Typy větrných elektráren	18
4.1. Malé	18
4.2. Střední	18
4.3. Velké.....	18
4.4. Odporové (DRAG)	19
4.5. Vztlkové (LIFT).....	19
4.6. Horizontální - vrtulové	20
4.7. Vertikální - rotorové.....	20
5. Technologie větrných elektráren	21
6. Princip větrné elektrárny a popis.....	24
6.1. Základ	24
6.2. Stožár	24
6.2.1. Ocelový tubusový stožár	24
6.2.2. Prefabrikovaný betonový stožár	24
6.2.3. Příhradový stožár	24
6.3. Rotor	25
6.4. Gondola	25
6.5. Generátor	25
6.6. Brzdy.....	25
6.7. Otočný mechanismus	25
6.8. Převodovka	27
6.9. Připojení k síti	27
7. Vznik větru.....	28
8. Vliv extrémních podmínek na chod větrné elektrárny	29
9. Výpočet.....	30
9.1. Volba elektrárny a umístění	30
9.2. Výpočet rychlosti větru	32
9.3. Výpočet výkonu	33
9.4. Výpočet otáček	37
9.5. Výpočet energie	37
10. Návratnost	39
10.1. Prostá návratnost	39
11. Akumulace	40
11.1. Elektrochemická akumulace.....	40
11.2. Mechanická akumulace.....	40
11.3. Tepelná akumulace	40
11.4. Elektrická akumulace	40

12. Výpočet v programu RETScreen	43
12.1. Postup výpočtu Vestas V52 – 850 kW	43
Závěr	46
Seznam zdrojů	47
Seznam obrázků	54
Seznam tabulek	54
Seznam grafů	54
Seznam příloh	55

Úvod

Vítr je jedním z několika obnovitelných zdrojů energie. Přitom stále obnovitelné zdroje nejsou tak rozšířené, jako fosilní paliva nebo jaderná energetika. Avšak již od 90. let 20. století začal postupně tento trend narůstat. Cílem bylo především snížení emisí CO₂, ale zároveň i obava z faktu, že uhlí, ropa nebo i zemní plyn nemají nekonečné zásoby.

V současné době je instalováno po světě několik tisíc větrných elektráren, ať už na souši, či na moři a každým rokem jich stále více přibývá. Například v roce 2015 přibylo celosvětově 64 GW výkonu. Stále největší velmocí v oblasti větrných elektráren zůstává Čína, dále USA a nakonec Německo. To se rozhodlo po roce 2011, kdy došlo k havárii v japonské jaderné elektrárně Fukušima, že se stane v budoucnu zemí produkující pouze zelenou energii.

Jedním z největších problémů ve světě je globální oteplování. To je také ve velkém množství způsobováno nadměrnou produkcí CO₂. Spalováním fosilních paliv se ročně do ovzduší dostanou milióny tun CO₂. Díky přibývajícím elektrárnám využívajícím obnovitelných zdrojů tak každým rokem toto riziko klesá. Je samozřejmé, že ani tyto alternativní zdroje se neobejdou bez vlivu nebo zásahu do životního prostředí, avšak občas je důležité zaměřit se i na budoucnost naší Země.

Větrné elektrárny jsou velmi atraktivní i z hlediska podnikatelského zájmu investorů nebo dokonce i obcí, ať už s vlastní elektrárnou nebo jen s pronájmem lokality pro výstavbu.

Tak jako všude ve světě je i v České republice problém s umístěním větrných elektráren, jelikož většina lokalit, kde vítr dosahuje větších rychlostí, se nachází převážně v horských oblastech, které však z velké části spadají do chráněných území. Je proto důležité vyhledat správnou oblast pro výstavbu elektrárny. Pro tuto otázku bylo vytvořeno již několik studií.

Postupem času dosáhla větrná energetika opravdu skvělých pokroků. Během několika let se přešlo z několika desítek elektráren s malými výkony na stovky a tisíce s velkými výkony. Je to především díky moderním technologiím a stále rozvíjejícímu se průmyslu, ale především i ve snaze o celkový rozvoj země.

1. Historie větrných elektráren

Větrnou energii používá lidstvo od dávnověku. Vítr poháněl plachetnice, větrné mlýny, vodní čerpadla atd. S větrnými motory se setkáváme už ve starověké Číně. Nejstarší větrné mlýny v Evropě vznikaly již od 12. století, avšak největší rozkvět doznalo větrné mlynářství v 19. století. Jeden z větrných mlýnů z 18. století najdeme také nedaleko česko-rakouských hranic – Retzu.



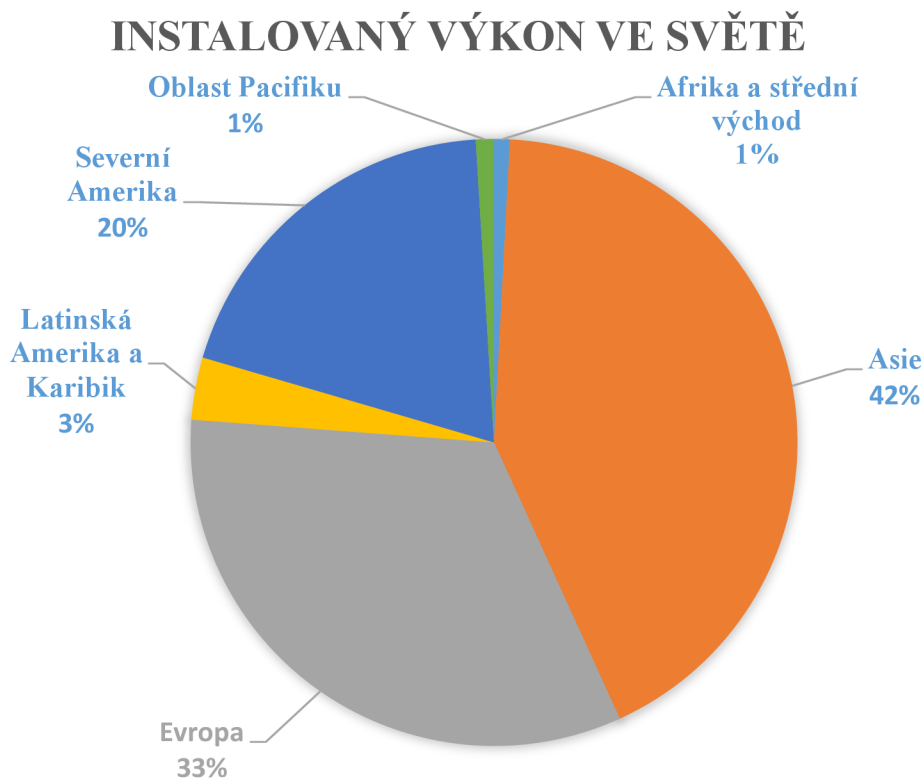
Obr. 1 - Větrný mlýn z 18. století v Retzu [24]

Začátek výroby novodobých moderních větrných elektráren za účelem výroby elektřiny se datuje na konec 19. století. Jeden z prvních elektrických generátorů poháněný větrem byl zkonstruován v 90. letech 19. století v Dánsku. Zkonstruoval jej dánský vynálezce Poul la Cour, který se už snažil řešit i akumulaci energie pomocí elektrolyzérů a výroby vodíku. V tu stejnou dobu byla v Clevelandu (Ohio, USA) sestavena větrná turbína s rozpětím listů s průměrem 17m. V tu dobu byly výkony těchto elektráren pouze v desítkách kW. V roce 1931 pak byla vystavena první elektrárna v výkonem 100kW a to na pobřeží Kaspického moře v Rusku. Pracovala dva roky a celkově vyprodukovala cca 200 000 kWh. V roce 1960 pracoval po celém světě už jeden milion zařízení na přeměnu větrné energie v elektrickou. Jedním z největších leaderů v budování větrných elektráren je Dánsko. To také v roce 1991 jako první přišlo s využitím pobřeží pro výstavbu. Tím vznikla nová etapa větrných elektráren – offshore¹. [1], [2], [3]

¹ Offshore elektrárny – větrné elektrárny instalované mimo pevninu na mořských mělčinách

2. Větrné elektrárny ve světě

Na počátku 90. let byl celkový výkon větrných elektráren velmi malý, v roce 1996 pouze 6,1 GW. Během deseti let však vystoupal celosvětový výkon na 432,4 GW a do začátku roku 2017 přibylo dalších 50 GW. Na konci roku 2017 byl celkový instalovaný výkon ve světě téměř 540 GW. Z toho cca jednu třetinu zabírala Evropská unie.



Graf. 1 - Celkový instalovaný výkon ve světě [10]

Na výše uvedeném grafu můžeme vidět podíl celkového výkonu větrných elektráren instalovaného ve světě. Celkový instalovaný výkon ve světě je tedy téměř 540 GW, jak můžeme vidět i v níže uvedené tabulce. V naprostém vedení je Asie s výkonem 228 542 MW. Za ní hned Evropa, jejíž instalovaný výkon je 178 GW, z toho cca 170 GW jsou země Evropské unie. S méně než polovičním celkovým výkonem než Asie je pak na třetím místě Severní Amerika. Naprosto nejnižší podíl má Oblast Pacifiku a Afrika společně se středním východem. Stejně jako výkon se liší i výkupní ceny vyrobené elektřiny. Trhy v zemích jako je například Mexiko, Maroko nebo Kanada se pohybují okolo 0,03 USD/kWh, což je v přepočtu asi 0,62 Kč. V loňském roce šla poprvé na trh bez dotací energie z offshore elektráren. Původně si tento pobřežní průmysl stanovil pokles výkupních cen na 100 EUR/MWh do roku 2020. Avšak počínaje Nizozemskem, kdy cena klesla cca na 70 EUR za MWh se výkupní ceny na evropských trzích dostaly do nového normálu pod 100 EUR. Konečný pokles se tak zastavil na 55 EUR/MWh. Je třeba však poznamenat, že tyto ceny nezahrnují náklady na přenos energie, které se pohybují mezi 6 – 12 EUR/MWh. [6], [10]

Z hlediska dlouhodobého pohledu na nově instalované elektrárny se nepočítá s příliš razantním nárůstem nových GW, pouze mírný pozvolný nárůst v průběhu desetiletí.

Tab. 1 - Celkový instalovaný výkon ve světě [10]

Instalovaný výkon v MW	
Afrika a střední východ	4 538
Asie	228 542
Evropa	178 096
Latinská Amerika a Karibik	17 891
Severní Amerika	105 321
Oblast Pacifiku	5 193
Celkem	539 581

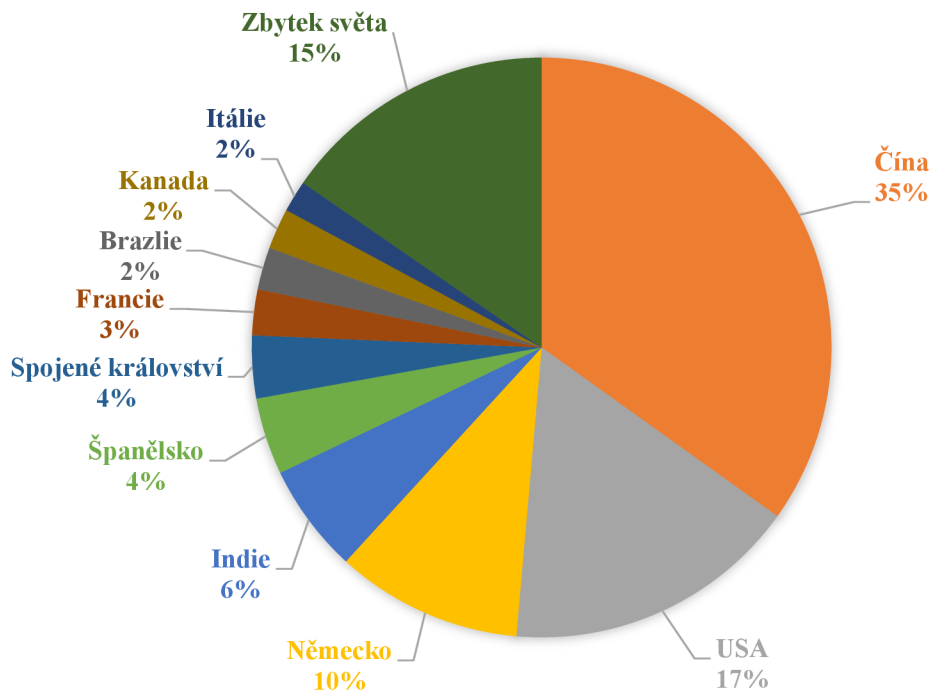
V níže uvedené tabulce vidíme deset zemí s nejvyšším výkonem větrných elektráren na konci roku 2017. Největším lídrem je Čína s téměř 190 GW a svou výrobou produkuje 35 % celkové výroby. Za ní následuje hned USA s polovičním výkonem Číny. Na třetím místě je pak Německo, kde mezi obnovitelnými zdroji má větrná energetika největší zastoupení. Na konci roku 2017 pocházela vyprodukovaná elektřina z dvaceti procent z větrných elektráren a oproti roku 2016 stoupla produkce větrných elektráren o 30 %. Tím se Německo podílelo i na exportu do jiných zemí. České republice přispělo dodávkou 3,3 TWh za minulý rok.

Tyto data pocházejí z ze světového koncilu větrných elektráren, který každoročně zasedá v Bruselu. Poslední se konal 14.2.2018, kde se shromáždily data za rok 2017. Oproti roku 2016 se žebříček příšil nezměnil, pouze Brazílie se svým výkonem posunula před Kanadu. Každá země navýšila svůj výkon, avšak nejvíce stoupl výkon Číny, o více jak 20 GW. [6], [10]

Tab. 2 - Deset zemí s nejvyšším výkonem [10]

Deset zemí s nejvyšším výkonem	
Čína	188 232
USA	89 077
Německo	56 132
Indie	32 848
Španělsko	23 170
Spojené království	18 872
Francie	13 759
Brazílie	12 763
Kanada	12 239
Itálie	9 479
Zbytek světa	83 008
Celkově	539 581

DESET ZEMÍ S NEJVYŠŠÍM VÝKONEM



Graf. 2 - Deset zemí s největším výkonem [10]

Za zmínku určitě stojí Německo, jehož cílem je čistá energie, tedy energie z obnovitelných zdrojů. V celosvětového podílu zabíralo Německo za loňský rok 10 %. Na domácím trhu ale obnovitelné zdroje přispěly téměř 40 %, z toho více jak polovina byly pouze větrné elektrárny. Na konci roku 2020 má však skončit podpora prvních podporovaných větrných elektráren. Tato podpora byla vyplácena 20 let. Německá společnost Fachagentur Windenergie an Land vydala v březnu 2018 studii, ve které se zabývá průzkumem u provozovatelů těchto větrných elektráren. Zúčastnilo se celkem 106 provozovatelů. Po skončení podpory pro ně připadají v úvahu tři možnosti. První je repowering. Jednalo by se tedy o výměnu starších elektráren za nové. Další možností je pokračování provozu stávající elektrárny a nakonec ukončení provozu elektrárny. Pokračující provoz je možnou cestou, jestliže není možnost nahradit modernější a efektivnější elektrárnou. Pro bezpečný provoz by byly pravděpodobně vyžadovány technické úpravy opotřebovaných částí, což je pak spojeno i s vyššími náklady na údržbu. V případě vyřazení elektráren je rozhodující budoucnost ekonomiky. Pakliže v budoucnu dojde ke stabilizaci cen na burze nad úrovní dnešní doby, o vyřazování elektráren by se jednalo v krajních případech a stávající turbíny by se pak mohly podílet na výrobě elektřiny i nadále. [7], [8]

3. Větrná energetika v ČR

První zmínka o větrném mlýně pochází z roku 1277 a to v Praze na zahradě Strahovského kláštera. Největší rozmach nastal pak ve 40. letech 19. století, kdy na území dnešní republiky bylo 879 větrných mlýnů.

První výstavby novodobých větrných elektráren započaly v 80. letech 20. století. Jejich největší rozkvět nastal mezi lety 1990-1995, následně ale došlo k poklesu výstavby, neboť téměř jedna třetina nainstalovaných větrných elektráren nevyhovovala nebo se ukázala jako vysoce poruchová (celkově v tomto období bylo vybudováno 24 VtE²). Bylo to převážně způsobeno dovozem vyřazených větrných elektráren z okolních zemí (většinou tedy repasované větrné elektrárny), ale také nedostatečnými odbornými znalostmi v této oblasti. Některé elektrárny byly např. postaveny v lokalitách s nevyhovujícími větrnými podmínkami. Propad způsobila také nízká výkupní cena, která se v roce 2001 pohybovala od 0,9 do 1,13 Kč/kWh. [5]

3.1. Výkupní ceny energie v ČR

Další etapu výstavby bylo rozhodnutí Energetického regulačního úřadu o minimální výkupní ceně, ta byla stanovena v roce 2002 na 3000 Kč/MWh. Postupně až do roku 2009 se snížila na 2340 Kč/MWh. Jednalo se tedy hlavně o dotace na výkup vyrobené elektřiny z OZE³.

Na začátku roku 2014 se zastavila podpora nově budovaných větrných elektráren a zůstala pouze pro elektrárny vystavěné do té doby. Tím došlo k dalšímu poklesu výkupních cen. V tabulce č. 3 vidíme srovnání výkupních cen z určitých obnovitelných zdrojů. Pro větrné elektrárny je zřetelný pokles až do letošního roku. Avšak za poslední roky se výkupní cena drží na stejné úrovni.

V případě fotovoltaických elektráren došlo k razantnímu poklesu výkupních cen. Navíc k tomu od roku 2012 jsou podporovány pouze elektrárny s výkonem do 30 kWp⁴. Nejvyšší výkupní ceny se stále drží u vodních elektráren a energie z biomasy. [6]

Tab. 3 - Srovnání výkupních cen 2007 – 2018 [6]

Výkupní ceny obnovitelných zdrojů [CZK/kWh]						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Fotovoltaika	13,5	13,5	12,8	12,2	5,5	6,2
Větrné elektrárny	2,5	2,5	2,3	2,2	2,2	2,2
Vodní elektrárny	2,4	2,6	2,7	3,0	3,0	3,2
Biomasa	3,4	4,2	4,5	4,6	4,6	4,6
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Fotovoltaika	2,8					
Větrné elektrárny	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9
Vodní elektrárny	3,2	3,2	3,2	3,1	2,7	2,7
Biomasa	3,7	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

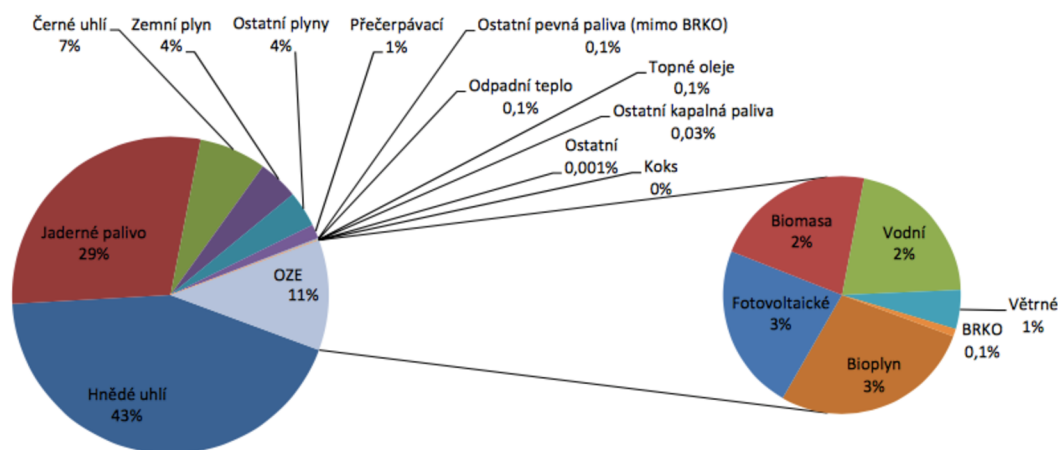
² VtE – Větrná elektrárna

³ OZE – Obnovitelné zdroje energie

⁴ kWp – jednotka Kilowatt - peak je jednotkou špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny při standardních podmínkách

Česká republika je stále převážně závislá na dovozu větrných elektráren z Evropských zemí, především Německa. Stále více komponent, jako hřídele, převodovky nebo gondoly, se vyrábí v České republice. Díky tomu se Česko čím dál více podílí na výrobě a hlavně vývozu těchto komponent. Jedním z výrobců těchto komponent v České republice jsou Vítkovice.[4]

V České republice mají obnovitelné zdroje 11 % podíl z celkové produkce energetiky. Nejvíce jsou zastoupeny fotovoltaika a energie z bioplynu (3 %), o něco méně pak vodní energetika a energie získávaná z biomasy (2 %) a jedním procentem větrné elektrárny. [11]

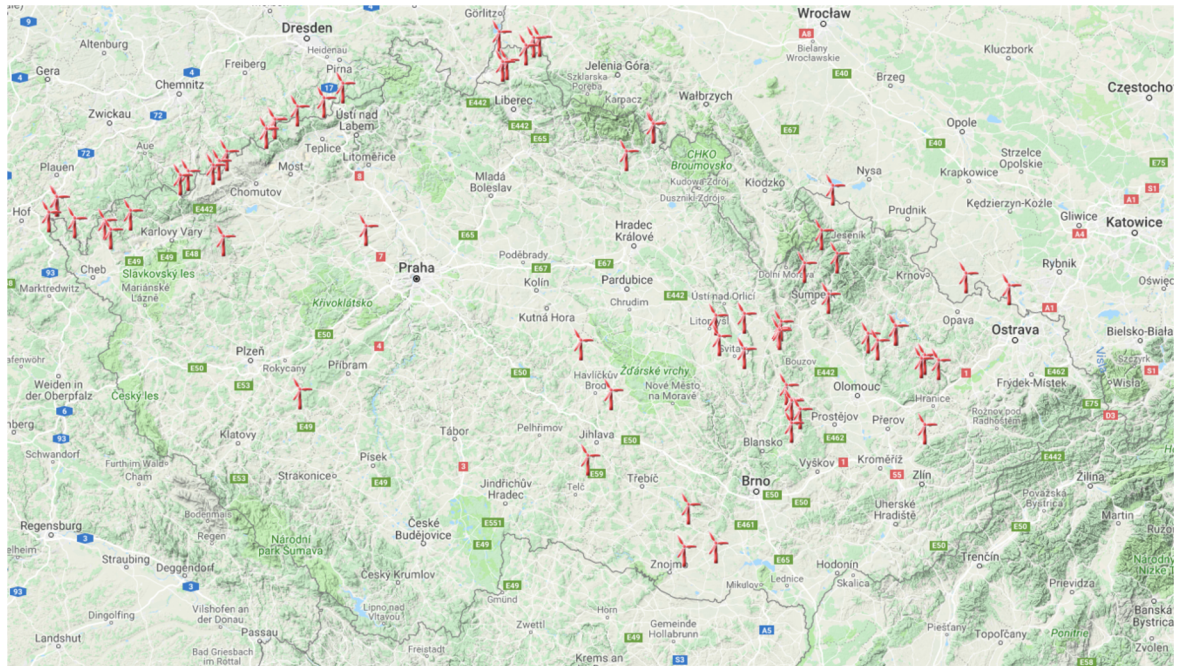


Graf. 3 - Podíl energetických složek v ČR (2016) [11]

Větrné elektrárny jsou často shlukovány do tzv. větrných parků. V tomto případě je však nutno počítat se vzájemnými ovlivňováním jednotlivých elektráren a s ohledem na to je proto umístít v dostatečné vzdálenosti od sebe. Elektrárny využívané ve větrných parcích jsou obvykle horizontálního typu, tří lopatkové s otáčením v závislosti na směru větru. Trubkové ocelové věže dosahují délky 60 ž 90 metrů a listy rotoru jsou v délce 20 až 40 metrů. Obvodová rychlost obvykle dosahuje více než 320 km/h. [5]

Nejvíce VtE je vystaveno v oblasti Krušných hor, kde se taktěž nachází i největší větrný park. Momentálně je zde nainstalováno 21 větrných elektráren o celkovém výkonu 42MW. Svým výkonem tak tento park tvoří více než jednu třetinu celkového výkonu větrných elektráren v ČR. [5], [6]

Na konci roku 2016 bylo v České republice celkově cca 170 větrných elektráren o celkovém výkonu 283 MW. Z toho nejvíce je situováno v Ústeckém kraji. Momentálně však od roku 2015 došlo k pozvolné stagnaci výstavby větrných elektráren na našem území. Na rozdíl od našich jižních a západních sousedů. Rakousko momentálně spravuje 1260 větrných elektráren s celkovým výkonem 2 844 MW (statistika ke konci roku 2017). Německo díky své rozloze a přístupu k moři mělo k roku 2016 přes 28 tisíc větrných elektráren, z toho téměř tisíc offshore, o výkonu 50 018 MW. [5], [6]



Obr. 2 - Rozmístění větrných elektráren v ČR [6]

Na obrázku můžeme vidět rozmístění větrných elektráren v České republice. Velké množství je instalováno po celé Krušnohorské oblasti, dále také v Olomouckém a Jihomoravském kraji. V tabulce č. 4 jsou uvedeny výkony větrných elektráren instalovaných v jednotlivých krajích. Zároveň je zde uveden i počet elektráren v krajích. Nejvíce v počtu elektráren zaostává Zlínský a Plzeňský kraj.

Tab. 4 - Instalace větrných elektráren v České republice [6]

Instalace větrných elektráren podle jednotlivých krajů

Kraj	Počet	Výkon [MW]
Zlínský	1	0,23
Jihomoravský	7	8,25
Karlovarský	24	51,80
Liberecký	31	50,00
Moravskoslezský	10	21,60
Olomoucký	38	42,60
Pardubický	18	19,20
Středočeský	2	6,00
Ústecký	44	86,80
Vysočina	7	11,80
Plzeňský	1	0,80
Královéhradecký	3	8,00

4. Typy větrných elektráren

Větrné elektrárny se rozlišují dle několika kritérií.

Na základě velikosti jsou rozděleny na: malé
střední
velké

Na základě aerodynamického principu na: odporové
vztlakové

Podle osy otáčení pak dělíme na: horizontální
vertikální

V závislosti na průměru rotoru – velikosti – se větrné elektrárny dělí na malé, střední a velké.

4.1. Malé

Malé VtE turbíny jsou s průměrem do 16 m a nominálním výkonem menším, než 60 kW.

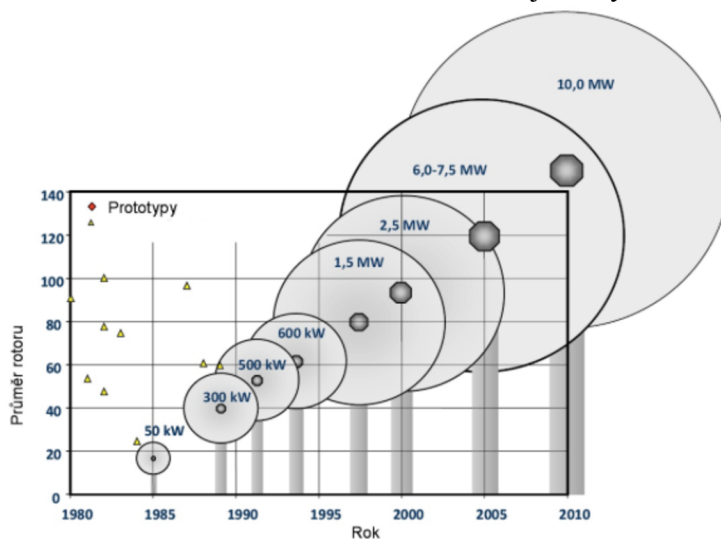
4.2. Střední

Mezi střední VtE řadíme turbíny s průměrem rotoru 16 – 45 m a nominálním výkonem v rozsahu 60 – 750 kW.

4.3. Velké

Velké větrné elektrárny mají pak průměr rotoru od 45 do 128 m a nominální výkon 750 až 6400 kW. Nejvíce se staví elektrárny s průměrným nominálním výkonem okolo 1500 – 3000 kW.

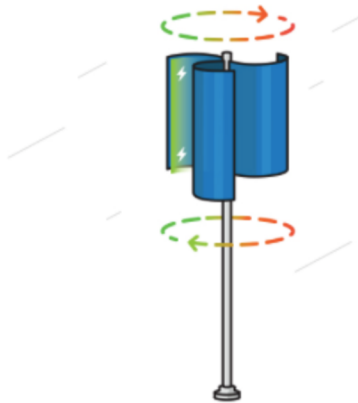
Z níže uvedeného obrázku můžeme vidět trend vývoje průměru rotorů a výšky stožárů. Původní větrné elektrárny dosahovaly výšky maximálně 20 m. Během třiceti let se pak zvyšovaly na 120 m a více. V České republice je nejčastěji instalován ocelový tubusový stožár s průměrnou výškou 100 – 120 m. Jelikož se s rostoucí výškou rychlost větru logaritmičtě zvyšuje, čím vyšší stožár, tím větší rychlost vzduchu. U zemského povrchu je rychlost ovlivňována členitostí terénu. Proudění vzduchu je vždy turbulentní.



Obr. 3 - Vývoj výšky stožáru a průměru rotoru VtE [5] Další rozdělení větrných elektráren je podle aerodynamického principu na:

4.4. Odporové (DRAG)

Odporové turbíny jsou nejstarší a jejich osa otáčení může být jak svislá, tak i vodorovná. Odporové turbíny dosahují nižší účinnosti než vztlakové, proto jsou v dnešní době minimálně využívány. Jejich princip závisí na rozdílu sil působících na lopatky. Plocha, která je nastavená proti směru větru klade aerodynamický odpor a zpomaluje tak proud vzduchu. Výsledná působící síla pak způsobuje rotaci vrtule.



Obr. 4 - Odporová turbína .[20]

4.5. Vztlakové (LIFT)

Vztlakové turbíny jsou spíše s vodorovnou osou otáčení a svojí rovinou otáčení jsou tak orientovány kolmo ke směru větru. Tento způsob patentoval v roce 1931 francouzský inženýr Darreieus. Novodobé jsou nejčastěji dvou nebo třílistá provedení. Byl vyroben i jednolistý typ s protizávažím. Důležitý je zde speciální tvar lopatek, který je velmi podobný jako u křídel letadla. Využívá tak stejný princip vztlaku. Znamená to, že pod listem se vytváří přetlak a nad listem podtlak, výslednice těchto tlakových polí je nazývána vztlaková síla a je vždy kolmá k nabíhajícímu proudu. Vzniká i odporová síla, která má stejný směr jako rychlost proudění. Výslednicí vztlakové a odporové síly je pak síla působící na profil. Při změně úhlu nátokové rychlosti se mění i směr vztlakové síly, tím se pak mění výslednice.



Obr. 5 - Vztlaková turbín [20]

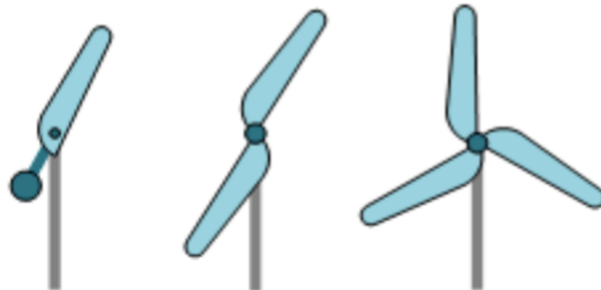
Podle osy otáčení dělíme větrné elektrárny na:

4.6. Horizontální - vrtulové

Horizontální turbíny jsou nejvyužívanější především z důvodu jejich vysoké účinnosti. Konstrukce s horizontální osou dosahuje účinnosti až 48 %. U vrtulových elektráren je však nutné natáčení podle směru větru a je potřeba umístění do vyšších výšek. Dochází u nich k velké obvodové rychlosti konců lopatek. Nejrozšířenější vrtulové větrné elektrárny jsou třílisté. Tento typ elektráren je velmi používán i pro stavbu offshore větrných elektráren, tedy elektráren, které stavějí mimo pevninu, na březích a v mořích, kde vítr dosahuje stabilně vyšších rychlostí. Díky tomu jsou větrné elektrárny schopny produkovat mnohonásobně vyšší elektrický výkon. Nevýhodou jsou však vysoké investiční náklady při stavbě těchto elektráren.

Typické jsou vrtule, které jsou nejpoužívanější. Nejčastěji využívané jsou třílisté. Profil těchto listů velmi ovlivňuje celou aerodynamiku a hlavně výkon celé elektrárny. Pracují na principu vztlakové síly.

Dalšími jsou pak mnoholopátkové rotory, především tedy Halladayova turbína. Ta byla v roce 1854 patentována v Americe.



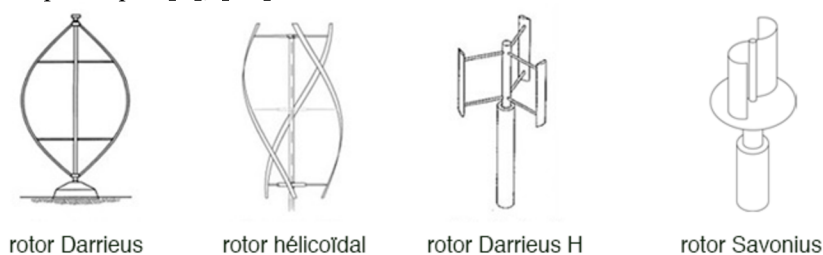
Obr. 6 - Jednolistý, dvoulistý a třílistý typ [21]

4.7. Vertikální - rotorové

Vertikální větrné elektrárny jsou naopak nezávislé na směru větru, což je výhodou zejména v místech, kde se směr větru často mění. Další výhodou je možnost umístění generátoru a převodového ústrojí na povrchu (zjednodušuje údržbu). Lze je zkonstruovat i v malém měřítku, zabírají tak méně prostoru a mohly by sloužit i pro domácnost. Navíc jsou i méně hlučné. Hlavní nevýhodou je vyšší cena a nižší účinnost. Tyto konstrukce dosahují účinnosti maximálně 38 %.

Jedním z příkladů je Savoniova turbína, která se využívá především pro domácí výroby energie, tedy pro nižší rychlosti větru. Její výhodou je v tomto případě minimální hlučnost. Savoniova turbína pracuje na odporovém principu. Je tvořena dvěma půl-válci, které jsou navzájem přesazené. Savoniovu turbínu lze využít i pro vodní elektrárny, avšak její účinnost je velmi malá.

Dalším příkladem je rotor Darrieus se zakřivenými lopatkami ve tvaru řeckého písmene Φ . Může být ve dvou, tří nebo čtyřlístém provedení. Byly také provedeny rotory trojúhelníkového tvaru, nebo tvaru do písmene H. Darrierova turbína pracuje na vztlakovém principu. [9], [14]

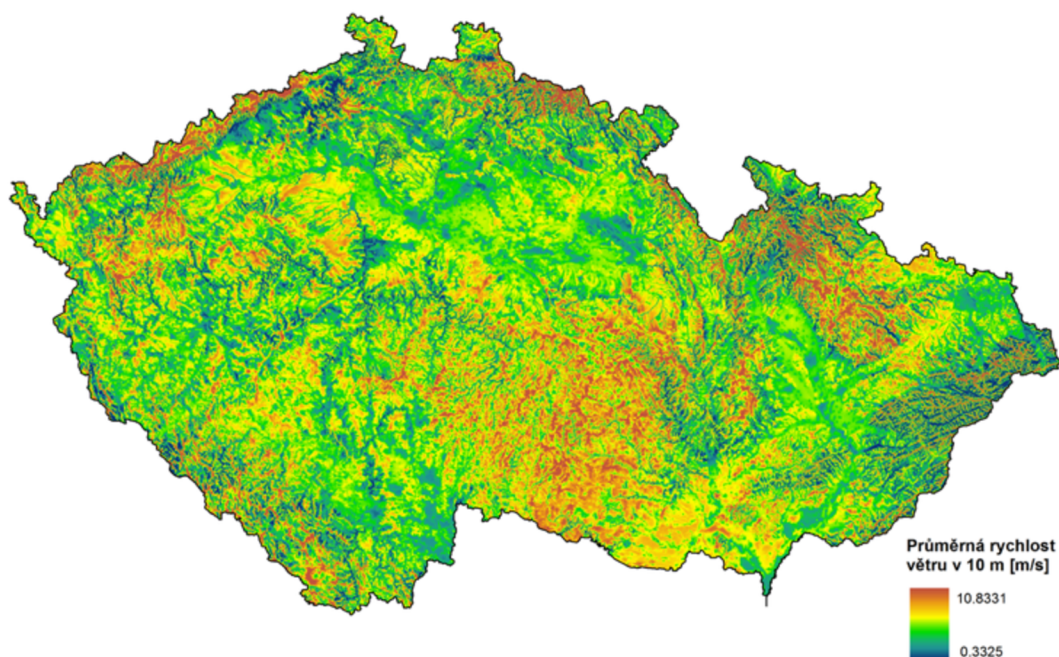


Obr. 7 - Typy vertikálních turbin [22]

5. Technologie větrných elektráren

Technologie větrných elektráren v České republice je přizpůsobena střeoevropským podmínkám, jelikož zde nejsou moře, ani rozlehlé stepi nebo horské pustiny, kde bývají rychlosti větru nejrychlejší. O výběru lokality pro stavbu větrných elektráren rozhoduje v první řadě rychlost větru. Rozhodující je však stavební povolení. Spoustu lokalit v České republice, kde vítr dosahuje nejvyšších rychlostí, patří do chráněných oblastí. Dalším kritériem pro stavbu je pak také přístup k lokalitě a možnost vývodu elektrických drah. Větrné poměry lze sjednotit pomocí matematických modelů do tzv. větrné mapy. Nejvíce praktická je mapa ukazující průměrnou rychlost větru v dané výšce nad zemským povrchem. [5], [9]

Na níže uvedeném obrázku vidíme průměrnou rychlost větru ve výšce 10 m.



Obr. 8 - Průměrná rychlost větru ve výšce 10 m [12]

Jelikož měření větru probíhá především ve výšce 10 m, lze odvodit vztah pro výpočet rychlosti větru v jiných výškách:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (5.1)$$

kde h je výška, v níž je umístěn měřic rychlosti větru
 h_0 je požadovaná výška
 v je průměrná rychlost větru ve výšce h
 v_0 je průměrná rychlost větru v požadované výšce h_0
 n je exponent korekčního vztahu, který závisí na drsnosti povrchu

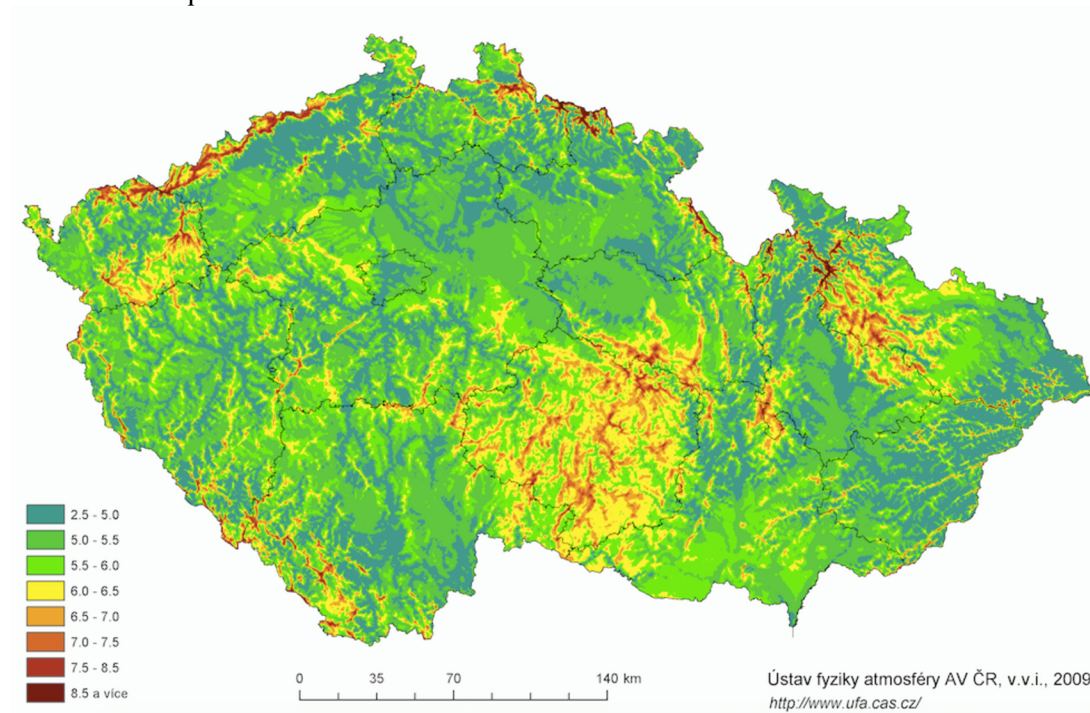
S rostoucí výškou roste i rychlost větru. Proto je momentálním trendem stavět vyšší stožáry elektráren. [9]

Tab. 5 - Závislost exponentu n na druhu povrchu [9]

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 obilné porosty	0,18
d – porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesní	0,21
e – lesy s mnoha stromy	0,28
f – vesnice a malá města	0,48

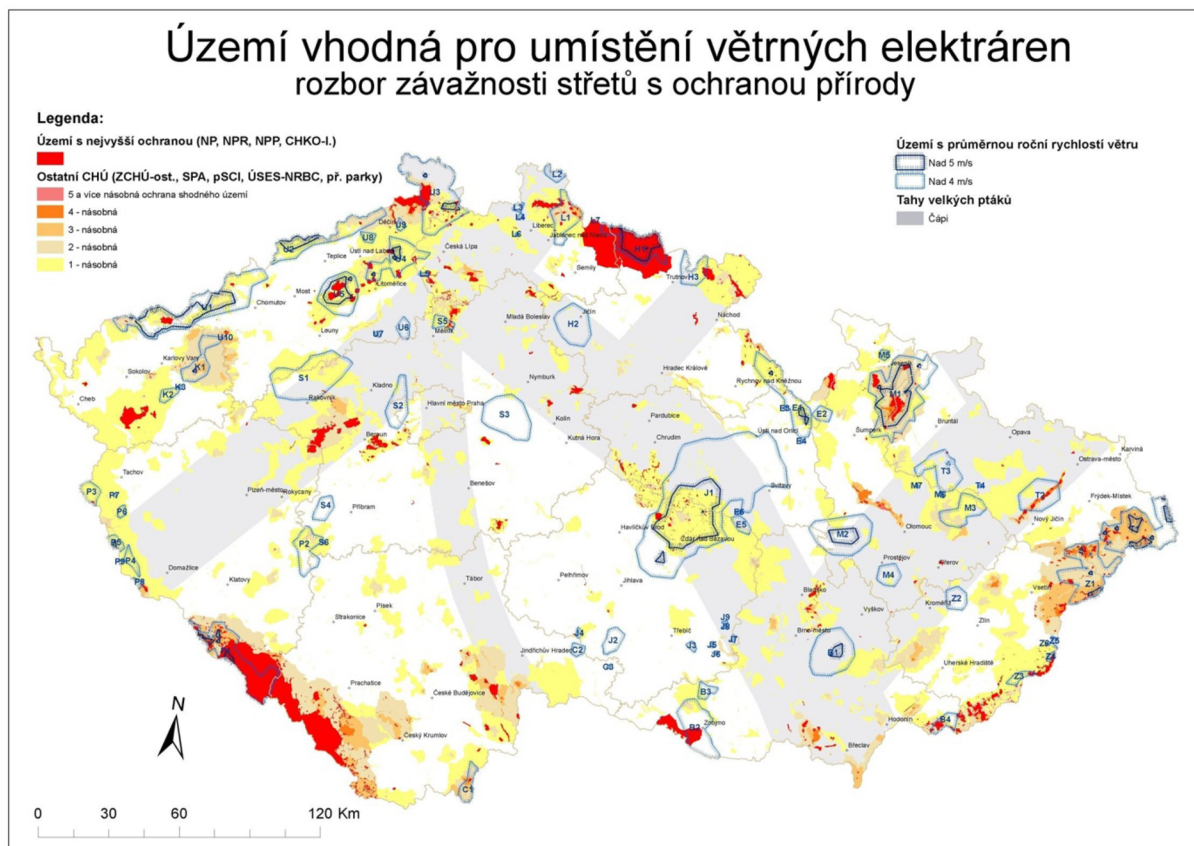
Proudění větru velmi ovlivňují různé překážky, jako jsou např. budovy nebo i větrolamy. Tyto překážky mohou způsobovat rychlost větru, která tím může klesnout až o 10 – 40 %.

Na obrázku č. 3 můžeme vidět větrnou mapu České republiky ve výšce 100 m od zemského povrchu.



Obr. 3 - Průměrná rychlost větru ve 100 m [6]

V případě výběru lokality jsou vyřazeny CHKO a Národní parky. Nevhodné jsou také lokality které jsou blíže jak 500 m od sídel, okolí vojenských objektů, hlavních letišť nebo dopravních komunikací. Vymezeny jsou i oblasti jako téměř vhodné pro výstavbu, tedy nelze zde výstavbu zcela vyloučit, ale lze předpokládat její omezení. Mezi nimi jsou přírodní parky, lesní porosty nebo chráněná území ptačích oblastí. Stavba větrných elektráren je i tak omezena dalšími podmínkami, jako je výše zmiňovaná dostupnost území, kulturní či přírodní hodnoty atd. V neposlední řadě je klíčový i souhlas obce (popř. majitele pozemku), na jejímž území má výstavba probíhat, a také obyvatel. [5], [9]



Obr. 9 - Území vhodná pro umístění větrných elektráren [14]

Na této mapě může vidět území, která jsou vhodná pro umístění větrných elektráren. Červeně jsou zde zobrazena území s nejvyšší ochranou. Jsou to především národní parky, přírodní rezervace a parky a chráněné krajinné oblasti. Je také velmi důležité, aby větrné elektrárny nezasahovaly do každoroční migrace velkých ptáků. Jsou zde zakresleny i oblasti s vysokými oblastmi větru, jako například v národním parku Krkonoše, nebo v oblasti Žďárských vrchů, kde ještě k tomu dochází k tahu velkých ptáků.

6. Princip větrné elektrárny a popis

Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína umístěná na stožáru energii větru na rotační energii mechanickou. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie.

6.1. Základ

Každá elektrárna musí být betonový základ, se kterým se začíná již několik týdnů před samotným vztyčením elektrárny. To vše samozřejmě zahrnuje i geologická měření půdy. Na které později bude daná elektrárna postavena. Betonový základ se odvíjí podle výšky stožáru a celkové hmotnosti. Betonový základ se dělá čtvercového, kruhového a šestibokého tvaru.

6.2. Stožár

Stožáry větrných elektráren jsou prstencovitého tvaru. Jejich výška se pohybuje většinou od 40 do 110 m. Mohou být různého provedení. V Evropě se nejčastěji využívá technologie ocelového tubusového stožáru nebo prefabrikovaného betonového stožáru. V Číně nebo v Indii je naopak více rozšířený příhradový stožár.

6.2.1. Ocelový tubusový stožár

V Evropě nejpoužívanější. Jedná se o ocelové plechy o tloušťce 12 – 45 mm, které jsou svařovány do jednotlivých segmentů. Ty jsou kvůli přepravě cca 25 m dlouhé. Při výrobě jsou nejprve plechy rozřezány a povrch plechů je následně tryskán litinovými broky kvůli případné korozi. Poté se z těchto plechů pálí tvar pro skružování. Ten odpovídá rozvinutému plášti kužele. Skružování se provádí se třemi až čtyřmi válci, přičemž plech se musí protočit několikrát dokola, aby nabyl požadovaného tvaru. Pak dochází ke svařování podélného spoje. Na jednotlivé části jsou přivařovány i příruby pro šroubové spojení. Nakonec je segment povrchově upraven nástřikem barvy a dovnitř konstrukce je připevněn žebřík s kabelovým roštem.

6.2.2. Prefabrikovaný betonový stožár

Výhodou tohoto stožáru je, že je sestaven z dílců, které se skládají až na místě výstavby elektrárny. Tím se velice snadno dopravují i do méně přístupných lokalit. Na místě jsou pak tyto dílce skládány do prstenců. Jeden prstenec může mít 1 a více dílců. Je vyroben z ocelových výztuží s betonovou skořepinou. Skládáním prstenců můžeme při stavbě regulovat výšku. Celkově je stožár rozdělen do tří částí. Základnu tvoří několik prstenců o výšce 4 m a směrem nahoru pak prstence o výšce 3 m. Zakončením je pak ocelové zakončení, na které nasazena otočná gondola. Tento typ konstrukce má dlouhou životnost a není náročný na opravy, avšak začíná být ekonomicky výhodný při výšce větší než 80 m. Při takové výšce je průměr základy téměř 5 m.

6.2.3. Příhradový stožár

Je vhodný pro elektrárny s výškou větší než 100 m. Především tedy z ekonomického hlediska. Seskládá se z jednotlivých částí, takže jeho instalace je prováděna přímo na místě stavby. To je výhodou pro dopravu, pro kterou není potřeba nadrozměrného nákladu s doprovodem. Svou konstrukcí je tento stožár velmi podobným sloupům s vysokým napětím, proto jejich zásah do krajiny není tak razantní. Nejvyšší elektrárna tohoto typu je v Německu s výškou stožáru 160m.

6.3. Rotor

Hlavní konstrukční jednotkou je rotor. Na našem území se instalují hlavně třílisté rotory, které jsou lépe aerodynamicky a dynamicky vyvážené. Elektrárna začíná vyrábět už při rychlosti větru 4m/s. Optimální rychlost větru pro dosažení maximálního výkonu je mezi 10 – 15 m/s. Při vyšších rychlostech se elektrárna začne zbrzdňovat. Aby nedocházelo při vysokých rychlostech větru k poškození generátoru, musí se regulovat výkon turbíny. Díky regulaci dosahují elektrárny konstantního jmenovitého výkonu. Další možností regulace je regulace natáčením lopatek. Při rychlosti větru větší než 25 m/s dochází k odstavení elektrárny a uvedení do klidové polohy. To však může následně na síti způsobovat kolísání. Z toho důvodu pak přichází v úvahu akumulace vyrobené energie. U velkých větrných turbín se konce lopatek pohybují rychlostmi většími než rychlost zvuku (v závislosti s na teplotě, cca kolem 320 m/s).

Obvodová rychlost je jiná v různých částech listu rotoru. Otáčky rotoru se pohybují mezi 10 – 20 m/s. U rotoru s průměrem 90 m a rychlostí větru 13 m/s se nejčastěji nastavují pracovní otáčky 15 ot/min. Obvodová rychlost se mění po délce rotorového listu. Nejvyšší rychlosti dosahuje na konci rotorového listu. V těchto parametry dosahuje rychlost na konci listu 70 m/s. Za účelem co nejefektivnější práce aerodynamického profilu, se musí profil natočit tak, aby byl stále ofukován. Duté lopatky, které jsou vyrobené ze sklolaminátu, dosahují délky až 50 m a jejich hmotnost je více než 10 tun. Lopatky musí odolávat extrémním podmínkám, a proto jsou vybaveny i bleskosvodem, teplotními čidly nebo i odmrazovacími zařízeními.

6.4. Gondola

Gondola je vlastně úložná skříň pro celou strojovnu elektrárny. Je vyrobena ze sklolaminátu. I když se elektrárny velmi podobají, každý výrobce má vlastní princip, ať už vybavením, či uspořádáním.

6.5. Generátor

V případě generátoru je opět na výrobcí, jestli použije synchronní nebo asynchronní generátor. V České republice je využito však více asynchronních generátorů. Nejčastěji jsou využívány čtyř- nebo šesti - pólové generátory.

Asynchronní motory jsou oproti synchronním generátorům levnější, jednodušší a i připojení k síti je snadnější.

6.6. Brzdy

Při vysokých rychlostech větru je potřeba zabrzdit rotor, aby nedošlo k jeho porušení a odstavení celého systému. Z tohoto důvodu je na hřídeli umístěna brzda rotoru. Brzdy mohou být ovládány buď hydraulicky, elektricky nebo mechanicky. K zjištění zvýšené rychlosti nad maximum slouží snímače nebo detektory rychlostí větru. Zvýšení rychlosti můžeme zjistit i pomocí snímače otáček rotoru. V případě hlášení zvýšené rychlosti dojde odstavení elektrárny počítačem. Je však důležité, aby mohla být elektrárna zabrzděna i obsluhou. Jestliže by došlo přímo k porušení jakýchkoliv bezpečnostních čidel, opět by byl motor odstaven. Elektrické nebo hydraulické ovládání brzd se využívá spíše u větších elektráren. U malých naopak mechanické.

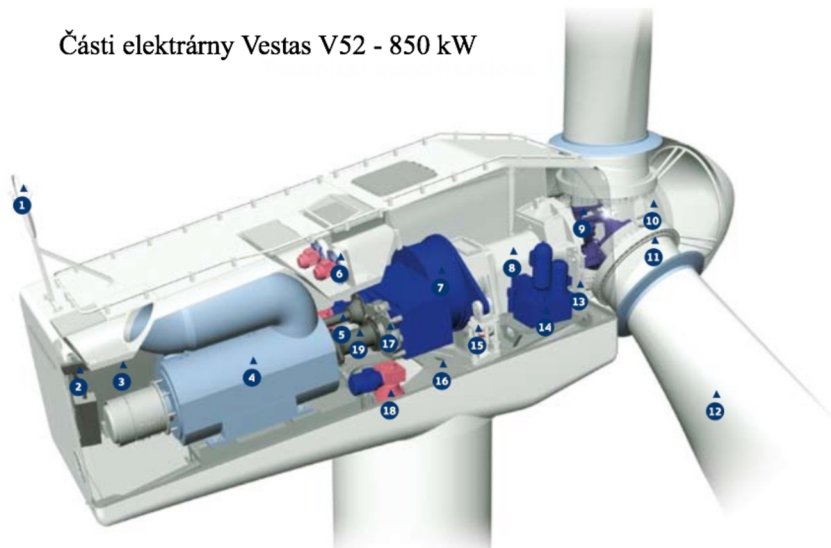
6.7. Otočný mechanismus

Jedná se o natáčení gondoly kolem svislé osy. Toto efektivní řízení je důležité, aby se zajistilo, že větrné turbíny budou vždy čelit přímo větru. Tím se zároveň zajistí, že větrná turbína bude stále produkovat maximální množství energie. Systém může mít jak elektrický pohon, tak i hydraulický.

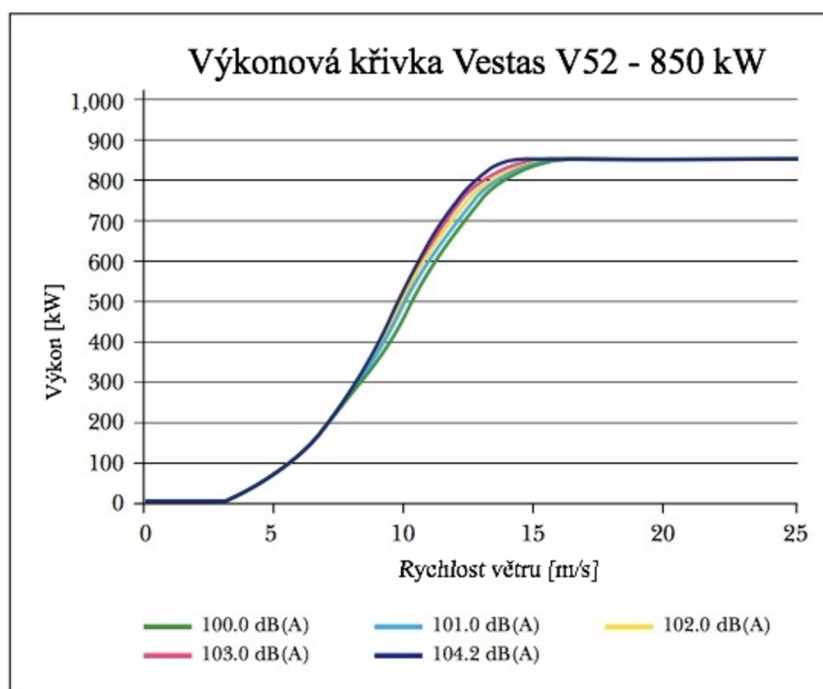
Základní popis stroje větrné elektrárny společnosti V52:

1 – Ultrazvukový snímač větru, 2 – Servisní jeřáb, 3 – Regulátor s převodníkem, 4 – Opti – Speed generátor, 5 – Roztečový válec, 6 – Chladič vody a oleje, 7 – Převodovka, 8 – Hlavní hřídel, 9 – Roztečový systém, 10 – Náboj listů, 11 – Ložisko listů, 12 – List, 13 – Zámek rotoru, 14 – Hydraulická jednotka, 15 – Momentové rameno⁵, 16 – Základ stroje, 17 – Mechanická kotoučová brzda, 18 – Otáčecí převod, 19 – Spojka kompozitního disku

Části elektrárny Vestas V52 - 850 kW



Obr. 10 - Části větrné elektrárny Vestas V52 [17]



Graf. 4 - Výkonová křivka elektrárny Vestas V52 - 850 kW [17]

⁵ momentové rameno – slouží k nastavení změny úhlů listů

6.8. Převodovka

Díky převodovce je zajištěna plynulá změna převodového poměru za cílem konstantních otáček synchronního generátoru. Pro větší elektrárny (nad 500 kW) se tento poměr pohybuje mezi 1:70 – 1:200. Převodovka je nejvíce namáhaná část objektu. Každý výrobce má svou vlastní konstrukci převodovky. Převodovka musí odolávat vysokým mrazům a případným vysokým nárazům větru. Proto musejí být navrhovány co možná nejpřesněji a nejbezpečněji. Nejčastěji se používá vícestupňová převodovka.

Jako první začala společnost Enercon prosazovat bezpřevodkovkové větrné elektrárny, které pracují na principu mnohapólového generátoru. Díky chybějící převodovce se především eliminovaly ztráty vznikající v převodovce a snížila hmotnost a hluchost. Princip spočívá v umístění jednoho prstence cívek na rotor. Druhý prstenec je statorový. Se zesilujícím se větrem se jednotlivé pólové dvojice postupně zapínají. Čím větší rychlost, tím více dvojic se zapne. Pro převod do sítě se vyrobená energie musí upravit výkonovou elektronikou, tím však vznikají určité ztráty.



Obr. 11 - Prstenec mnohapólového prstence ViE [6]

6.9. Připojení k síti

Elektrárna přes spuštěním a připojením do sítě prochází přes podrobnou kontrolu, kde musí splnit určité požadavky ohledně kvality dodávané energie a ovlivnění celkové přenosové soustavy. V opačném směru se také zjišťuje vliv poruch v síti na elektrárnu. Připojení k síti může být buď přímé nebo přes měnič kmitočtu. Elektrárny pracují při konstantních otáčkách. Přidáním frekvenčního měniče mezi generátor a síť zajistíme změnu otáček. Tímto se vlastně využije maximálního výkonu větru při všech rychlostech. Z ekonomických důvodů se však tento způsob používá velmi málo. [6],[10]

7. Vznik větru

Vítr vzniká v atmosféře na základě rozdílu atmosférických tlaků. Povrch naší planety je rozmanitý a v atmosféře vznikají místa s rozdílnou teplotou a rozdílnými fyzikálními vlastnostmi – důsledkem je pak nerovnoměrné ohřívání zemského povrchu. Následně pak dochází k dorovnávání těchto rozdílů, kdy teplý vzduch vstupuje vzhůru a na jeho místo se tlačí vzduch studený. Na proudění vzduchu působí rotace Země, nebo také odklonění zemské osy od roviny. Rychlost a proudění větru je ovlivňováno i reliéfem krajiny, či různými překážkami. Příznivější podmínky jsou ve vyšší nadmořské výšce s nerovným terénem. Je zřejmé, že rychlost větru s nadmořskou výškou stoupá. Při umístění elektrárny na vrchol hřebenu se může dosáhnout vyššího výkonu. Při obtékání větru přes hřeben dochází ke zhuštění proudnic.

Měření větru se běžně provádí na meteorologických stanicích. V dnešní době se používají téměř jen automatické senzory, kde výsledky jsou zaznamenávány do elektronických zařízení. [9]

K přibližnému odhadu rychlosti větru bez použití měřicí techniky slouží Beaufortova stupnice z 19. století.

Tab. 6 - Beufartova stupnice [18]

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 zčeřená vlny bez pěnových 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	docela čerstvý vítr	vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi	vlny ještě malé ale prodlužují se. Hojný výskyt pěnových vrcholků.
5	8 - 10,7	29 - 38	4,0 - 7,2	čerstvý vítr	hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají	docela 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 vzniká 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	docela vysoké vlnové hory s hřebeny výrazné délky, od jejich okrajů se začíná odtrhávat 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 překlápějícími 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 zrušení 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 tříště. Moře zcela bílé. Viditelnost velmi snížena. Není výhled.

8. Vliv extrémních podmínek na chod větrné elektrárny

Nepříznivé teplotní a tlakové podmínky značně ovlivňují hustotu vzduchu, na kterém je závislý výkon elektrárny. Na základě stavové rovnice zjišťujeme, že se zvyšující se teplotou se hustota snižuje a se zvyšujícím se tlakem se hustota vzduchu snižuje.

$$p = \rho RT \Rightarrow \rho = \frac{p}{RT} \quad (8.1)$$

ρ je hustota vzduchu [kg/m^3]

p tlak vzduchu [Pa]

T je termodynamická teplota [K]

R je plynová konstanta vzduchu ($R = 8,314 \text{ [J/K}\cdot\text{mol]}$)

Ztráty na výkonu jsou většinou kolem 2 %. Samozřejmě ve vyšších nadmořských výškách nejsou stejné podmínky jako v nižších, a proto se s těmito vlivy již předem počítá. Se zvyšující se nadmořskou výškou teplota i tlak klesají.

V případě velmi vysoké rychlosti větru rozhodně neplatí, že výkon bude vyšší. Při vyšších rychlostech dochází u elektrárny k brždění a zastavování výroby. Při poklesu rychlosti dochází k automatickému rozběhu elektrárny. Dle odolnosti se větrné turbíny dělá do tří skupin podle normy IEC 61400-1 (IEC – International Electrotechnical Commission).

Tab. 7 - Jednotlivé třídy [5]

Třída	I	II	III
$V_{ave} \text{ [m/s]}$	10	8,5	7,5
$V_{ref} \text{ [m/s]}$	50	42,5	37,5
$V_{50,poryv} \text{ [m/s]}$	70	59,5	52,5

V této tabulce vidíme rozdělení do tří skupin. V_{ave} je roční průměrná rychlost větru ve výšce gondoly. V_{ref} popisuje extrémní rychlosti větru po dobu více než 10-ti minut opakovaně pravidelně po dobu 50-ti let. Hodnota $V_{50,poryv}$ vyjadřuje třísekundový extrémní poryv větru opět po dobu 50-ti let.

Nás především zajímá prostřední hodnoty této tabulky. Tyto hodnoty určují maximální možné rychlosti větru. České republice odpovídá třetí třída s výjimkou horských oblastí a celkově lokalit s vyšší nadmořskou výškou. Zde se pak uvažuje o druhé kategorii. První kategorie je s maximální rychlostí větru určena spíše pro oblasti ve vysoké nadmořské výšce a přímořské a mořské oblasti.

Velkým rizikem v zimním období je námraza. Nejen, že mohou způsobovat ztráty na výkonu, ale úlomky ledu odletující z vrtule mohou způsobit škody na majetku. Úlomky se mohou dostat až do vzdálenosti 150 m. Snížení výkonu může být v zimním období až o 20 %. Námraza je při provozu elektrárny pravidelně kontrolována a při výstavbě se musí brát ohled na umístění elektrárny.

Dále je potřeba zabezpečit elektrárnu proti účinkům blesku, především tedy v horských oblastech a offshore instalacích. Podle statistik dojde na 100 větrných elektrárnách průměrně ke 4 – 8 úderům blesku za rok. Je to především závislé na geografickém členění. Z větší části byl zásah bleskem do elektrického vedení, na které je elektrárna napojena. V dalších případech pak blesk zasáhne rotorové listy, což v nahlášených případech bylo až 10 % poškozených elektráren, u kterých byla nutná delší odstávka s opravami. Na ochranu proti blesku jsou zavedeny receptory po obou stranách rotorového listu a jedna přímo na vrcholu listu. Listy pak musejí projít stejnými zátěžovými testy jako letadla. [5]

9. Výpočet

9.1. Volba elektrárny a umístění

Nejvíce instalované větrné elektrárny jsou od společnosti Vestas (Dánsko) a německých společností Siemens a Enercon. Pro svůj výpočet jsem zvolila nejčastěji instalovanou elektrárnu v České republice a to Vestas V52 s instalovaným výkonem 850 kW. Tuto elektrárnu jsem zvolila proto, že je vhodná pro široké spektrum středních až silných větrů. Je velmi adaptabilní i díky možnostem různých výšek a vhodných, ne příliš velkých, konstrukčních rozměrů. To umožňuje jednodušší přepravu a instalaci. Je dokonce ideální volbou jak pro osídlené oblasti, tak i vzdálené polohy.

Základní data jsem sepsala do tabulky (Tab. 8). Dle výrobce je uvedena u této elektrárny třída IEC IA. Tyto třídy sestavila Mezinárodní elektrotechnická komise (*International Electrotechnical Commission*). Tímto stanovila mezinárodní normy pro rychlost větru, kterou musí odolat každá třída větru. [13], [19]

Tato elektrárna je schopna vyrábět od rychlosti větru 4 m/s a nominálního výkonu dosahuje v rychlosti 16 m/s. Při rychlostech větších, než 25 m/s je pak elektrárna odstavena.

Pro výpočet jsem zvolila výšku 65 m.

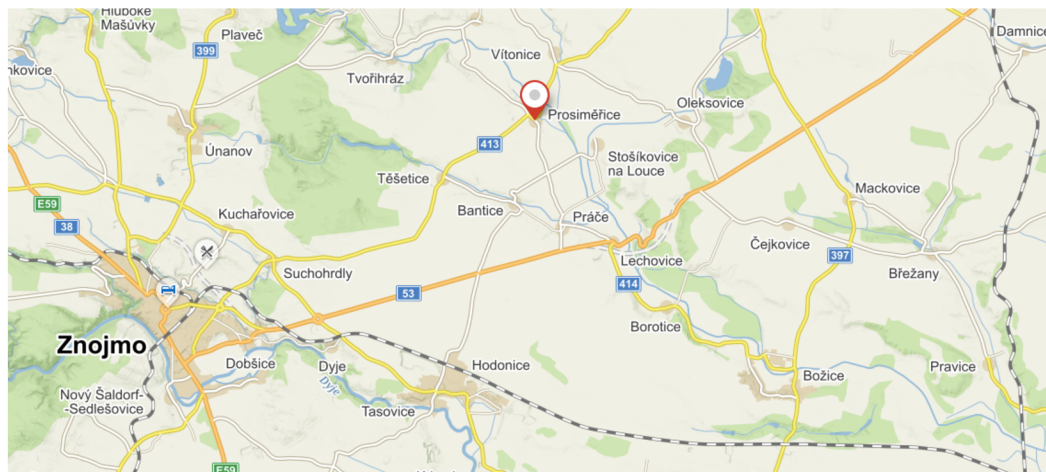
Tab. 8 - Parametry větrné elektrárny Vestas V52 - 65 m [13]

Vestas V52 – 850 kW		
Výkon	850	[kW]
Počet listů	3	
Průměr rotoru	52	[m]
Pracovní plocha	2124	[m ²]
Nominální otáčky	26	[ot/min]
Provozní otáčky	14,0 - 31,4	[ot/min]
Výška hubu ⁶	65	[m]
Min. rychlost větru	4	[m/s]
Nominální rychlost větru	16	[m/s]
Max. rychlost větru	25	[m/s]
Váha rotoru	10	[t]
Váha strojovny	22	[t]
Váha hubu	75	[t]
Třída	IEC IA	

⁶ hub – slovo *hub* pochází z anglického jazyka a je jím označován náboj větrné elektrárny

Svůj výpočet větrné elektrárny jsem umístila v Jihomoravském kraji k obci Prosiměřice vzdálené necelých 15 km od Znojma (Obr. 12). Jelikož je v této obci amatérská měřicí stanice, měla jsem k dispozici naměřené hodnoty rychlostí větru za roky 2015, 2016 a 2017. Do tabulky jsem zapsala naměřená data ze stanice, tedy denní rychlost větru v roce 2017 (Tab. 9), 2016 (Příloha 2), 2015 (Příloha 6). Hodnoty byly naměřeny ve výšce 10 m nad zemí, jak je rovněž umístěna měřicí technika. Ve výpočtu budu pracovat především s rokem 2017.

Na této mapě je vidět umístění obce Prosiměřice od Znojma. Na mapě lze vidět i obec Břežany, kde se nachází větrný park s pěti větrnými elektrárnami, jejichž celkový výkon je 4,25 MW. Nedaleko Prosiměřic u státní silnice směr Brno se nachází i samostatná větrná elektrárna o výkonu 2 MW, zapsaná na pozemku obce Bantice.



Obr. 12 - Poloha obce Prosiměřice [15]

Tab. 9 - Naměřené rychlosti větru ve výšce 10 m v roce 2017 [14]

10 m	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	0,7	0,8	5,9	6,8	5,5	3,9	6,1	6,3	3,7	4,4	3,1	2,5
2	4,5		7,6	2,4	3,1	2,6	5,0	4,9	3,6	5,9	3,7	2,2
3	6,9	3,4	3,9	5,3	3,3	2,9	4,7	4,8	4,7	10,9	3,2	3,7
4	8,3	1,9	7,9	4,8	4,1	7,4	5,3	4,4	3,4	3,8	2,6	5,3
5	7,2	1,7	8,0	4,6	4,0	2,9	4,0	3,6	4,7	7,9	2,3	6,1
6	6,4	2,7	5,0	7,9	3,3	7,4	2,5	2,8	5,5	5,7	2,0	4,6
7	4,3	3,7	29,5	6,1	4,9	9,3	4,9	3,0	5,5	4,6	3,4	2,4
8	1,8	2,5	5,9	5,7	5,3	2,9	6,0	5,3	3,7	5,5	2,3	2,5
9	2,5	3,8	4,0	2,6	4,2	4,9	5,4	4,2	4,3	3,7	1,3	5,2
10	3,8	5,5	7,0	43,5	3,1	5,0	6,1	10,3	2,4	4,3	4,6	3,9
11	2,1	4,4	3,9	7,7	2,9	2,5	6,3	4,8	2,8	3,6	5,2	8,8
12	4,6	3,3	5,0	3,1	3,0	5,1	6,6	5,2	3,7	5,4	4,6	11,0
13	7,1	11,6	3,4	6,8	6,0	5,6	6,0	3,4	4,8	5,2	6,6	2,5
14	5,9	21,8	5,2	4,1	3,9	3,9	2,6	2,2	10,5	2,9	4,0	7,3
15	5,3	1,8	4,2	5,2	5,3	2,7	4,8	3,2	4,5	1,7	2,1	2,2
16	2,1	22,8	4,9	6,8	2,6	6,1	3,0	5,2	1,6	1,2	1,8	1,7
17	4,2	1,1	5,6	4,8	2,2	6,7	2,8	1,9	2,1	0,7	3,2	4,1
18	3,4	4,2	7,2	4,9	5,4	4,5	3,9	3,3	3,3	1,7	4,1	2,4
19	1,4	1,8	4,7	10,0	6,3	3,1	3,5	6,7	3,1	1,6	4,6	3,5
20	1,9	6,0	6,8	5,9	6,3	3,5	6,4	3,8	12,2	1,4	7,4	1,8
21	1,9	5,9	4,0	4,7	5,5	3,9	4,0	3,4	10,9	1,8	3,0	3,5
22	4,1	6,4	4,5	5,7	3,5	3,4	3,7	3,3	3,2	4,7	1,6	4,4
23	3,8	5,4	2,7	7,3	3,8	7,2	5,9	2,9	3,3	5,4	1,7	6,2
24	2,6	9,2	4,2	3,7	6,4	4,3	4,5	3,4	1,9	3,4	1,9	6,3
25	3,1	4,6	3,2	4,3	4,8	4,4	5,6	3,2	2,5	2,4	3,8	2,9
26	3,4	2,1	4,2	3,3	4,1	4,2	5,0	2,6	2,5	2,4	4,7	1,4
27	4,6	4,3	2,4	3,2	3,7	4,7	4,3	5,2	2,4	6,2	4,6	4,6
28	4,0	6,3	2,1	3,6	4,0	6,4	5,4	3,2	3,8	5,7	1,4	5,7
29	2,0		43,5	3,7	2,0	7,7	2,7	2,6	5,1	15,4	1,7	5,8
30	3,6		4,3	3,8	3,7	5,9	3,4	3,7	5,1	8,3	4,0	2,2
31	3,3		4,5		3,9		2,9	3,8		4,4		3,6

Z naměřených hodnot jsem rovněž vypočítala průměrná rychlost za jednotlivé měsíce. Vypočítané hodnoty za poslední tři roky jsem zapsala do níže uvedené tabulky. Srovnáme-li tyto roky, lze říci, že v jednotlivých měsících se průměrná rychlost příliš neliší, avšak nejvíce větrný je přelom zimy a jara.

Tab. 10 – Průměrné rychlosti za jednotlivé měsíce pro výšku 10 m

Průměrná naměřená rychlost ve výšce 10 m												
	Led.	Úno.	Bře.	Dub.	Kvě.	Črv.	Čvc.	Srp.	Zář.	Říj.	Lis.	Pro.
2015	4,79	4,16	4,58	5,66	4,26	4,07	4,36	5,13	4,49	3,39	4,78	2,76
2016	4,96	4,67	4,45	4,60	4,45	4,10	4,28	4,75	3,66	3,60	4,83	4,90
2017	3,90	5,52	6,94	6,41	4,20	4,83	4,62	4,08	4,36	4,59	3,35	4,20

9.2. Výpočet rychlosti větru

Pomocí vzorce na přepočet rychlosti (5.1), jsem vypočítala rychlost větru ve výšce 65 m. Budu počítat s jednotlivými rychlostmi větru po celý rok. Opět vypočítám hodnoty i pro průměrné rychlosti. Pro příklad výpočtu uvádím výpočet rychlosti větru ve výšce 65 m pro průměrnou rychlost větru za měsíc březen v roce 2017, která byla 6,94 m/s. Hodnotu jsem v tabulkách vyznačila modrou barvou.

Jako hodnotu exponentu n korekčního vztahu volím hodnotu 0,18 pro vysokou trávu a nízké obilné porosty, dle umístění elektrárny, kterou jsem zjistila z tabulky závislosti exponentu n na povrchu (Tab. 5.). Výpočty v následujících kapitolách byly počítány dle literatury [9], [17].

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

$$\frac{v}{6,49} = \left(\frac{65}{10}\right)^{0,18} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$v = \left(\frac{65 \cdot 6,49}{10}\right)^{0,18} = 9,72 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Stejný postup jsem aplikovala i na ostatní hodnoty a vypočítané hodnoty jsem opět uvedla do tabulky (Tab. 12). Taktéž jsem vypočítala i průměrné rychlosti jednotlivých měsíců za poslední tři roky. Nakonec jsem vypočítala i denní hodnoty v roce 2015, které jsem uvedla do tabulky (Příloha 3) a v roce 2016 (Příloha 7).

Tab. 11 – Průměrné rychlosti za jednotlivé měsíce pro výšku 65 m

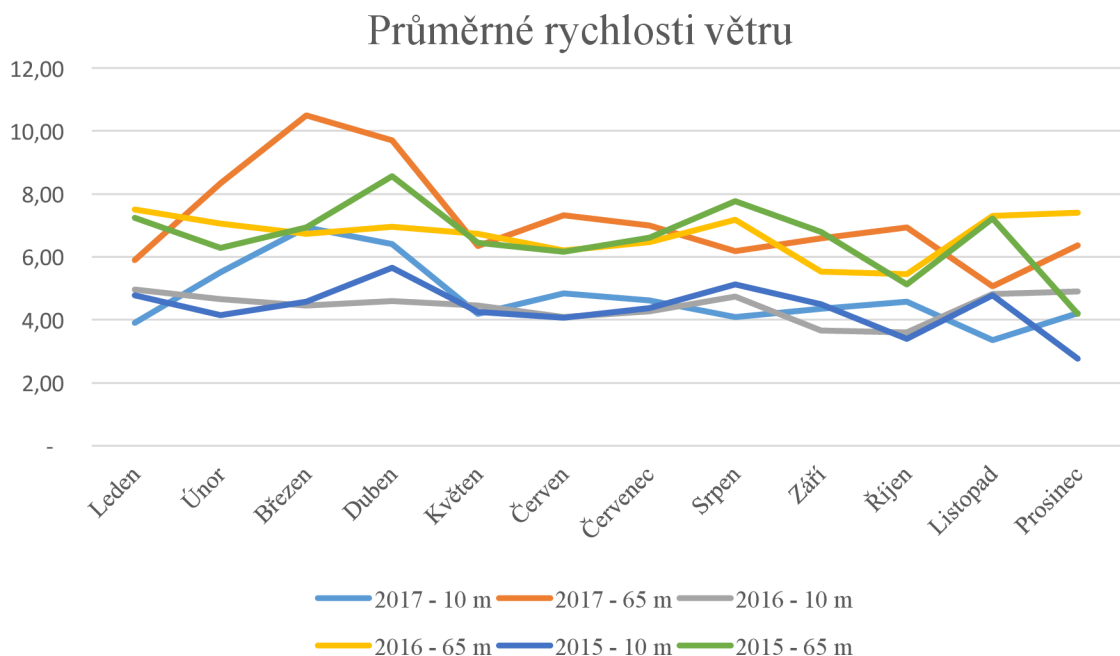
Vypočítaná rychlost ve výšce 65 m												
	Led.	Úno.	Bře.	Dub.	Kvě.	Črv.	Čvc.	Srp.	Zář.	Říj.	Lis.	Pro.
2015	6,70	5,82	6,41	7,93	5,97	5,70	6,11	7,18	6,29	4,75	6,69	3,87
2016	6,95	6,54	6,23	6,44	6,23	5,74	6,00	6,65	5,13	5,04	6,76	6,86
2017	5,46	7,73	9,72	8,98	5,88	6,77	6,47	5,72	6,11	6,42	4,69	5,89

V tabulce s vypočítanými denními hodnotami rychlostí větru jsem vyznačila vysoké rychlosti větru. Turbína dosahuje nominálního výkonu při rychlostech 16 m/s. Hodnoty blízké této rychlosti jsem vyznačila oranžovou barvou. Naopak hodnoty vyšší než 25 m/s, což je maximální rychlost pro provoz elektrárny, jsem vyznačila červenou barvou. Stejně tak hodnoty rychlosti větru, kdy elektrárna není schopna vyrábět, jsem zaznačila zelenou barvou (hodnoty nižší než 4 m/s).

Tab. 12 - Vypočítané rychlosti větru ve výšce 65 m

65 m	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	1,0	1,1	8,3	9,5	7,7	5,5	8,5	8,8	5,2	6,2	4,3	3,5
2	6,3		10,6	3,4	4,3	3,6	7,0	6,9	5,0	8,3	5,2	3,1
3	9,7	4,8	5,5	7,4	4,6	4,1	6,6	6,7	6,6	15,3	4,5	5,2
4	11,6	2,7	11,1	6,7	5,7	10,4	7,4	6,2	4,8	5,3	3,6	7,4
5	10,1	2,4	11,2	6,4	5,6	4,1	5,6	5,0	6,6	11,1	3,2	8,5
6	9,0	3,8	7,0	11,1	4,6	10,4	3,5	3,9	7,7	8,0	2,8	6,4
7	6,0	5,2	41,3	8,5	6,9	13,0	6,9	4,2	7,7	6,4	4,8	3,4
8	2,5	3,5	8,3	8,0	7,4	4,1	8,4	7,4	5,2	7,7	3,2	3,5
9	3,5	5,3	5,6	3,6	5,9	6,9	7,6	5,9	6,0	5,2	1,8	7,3
10	5,3	7,7	9,8	60,9	4,3	7,0	8,5	14,4	3,4	6,0	6,4	5,5
11	2,9	6,2	5,5	10,8	4,1	3,5	8,8	6,7	3,9	5,0	7,3	12,3
12	6,4	4,6	7,0	4,3	4,2	7,1	9,2	7,3	5,2	7,6	6,4	15,4
13	9,9	16,2	4,8	9,5	8,4	7,8	8,4	4,8	6,7	7,3	9,2	3,5
14	8,3	30,5	7,3	5,7	5,5	5,5	3,6	3,1	14,7	4,1	5,6	10,2
15	7,4	2,5	5,9	7,3	7,4	3,8	6,7	4,5	6,3	2,4	2,9	3,1
16	2,9	31,9	6,9	9,5	3,6	8,5	4,2	7,3	2,2	1,7	2,5	2,4
17	5,9	1,5	7,8	6,7	3,1	9,4	3,9	2,7	2,9	1,0	4,5	5,7
18	4,8	5,9	10,1	6,9	7,6	6,3	5,5	4,6	4,6	2,4	5,7	3,4
19	2,0	2,5	6,6	14,0	8,8	4,3	4,9	9,4	4,3	2,2	6,4	4,9
20	2,7	8,4	9,5	8,3	8,8	4,9	9,0	5,3	17,1	2,0	10,4	2,5
21	2,7	8,3	5,6	6,6	7,7	5,5	5,6	4,8	15,3	2,5	4,2	4,9
22	5,7	9,0	6,3	8,0	4,9	4,8	5,2	4,6	4,5	6,6	2,2	6,2
23	5,3	7,6	3,8	10,2	5,3	10,1	8,3	4,1	4,6	7,6	2,4	8,7
24	3,6	12,9	5,9	5,2	9,0	6,0	6,3	4,8	2,7	4,8	2,7	8,8
25	4,3	6,4	4,5	6,0	6,7	6,2	7,8	4,5	3,5	3,4	5,3	4,1
26	4,8	2,9	5,9	4,6	5,7	5,9	7,0	3,6	3,5	3,4	6,6	2,0
27	6,4	6,0	3,4	4,5	5,2	6,6	6,0	7,3	3,4	8,7	6,4	6,4
28	5,6	8,8	2,9	5,0	5,6	9,0	7,6	4,5	5,3	8,0	2,0	8,0
29	2,8		60,9	5,2	2,8	10,8	3,8	3,6	7,1	21,6	2,4	8,1
30	5,0		6,0	5,3	5,2	8,3	4,8	5,2	7,1	11,6	5,6	3,1
31	4,6		6,3		5,5		4,1	5,3		6,2		5,0

Následně jsem vytvořila graf, do kterého jsem zakomponovala jak naměřené hodnoty ve výšce 10 m, tak i vypočtené hodnoty při 65 m v letech 2015 – 2017.



Graf. 5 - Graf naměřených a vypočítaných hodnot průměrných rychlostí větru

9.3. Výpočet výkonu

Při konstantním zrychlení je kinetická energie objektu s hmotností m a rychlostí v rovna práci W , která je z klidového stavu do vzdálenosti s pod působením síly F :

$$E = W = F \cdot s \quad (9.1)$$

Z Newtonova zákona víme, že:

$$F = m \cdot a \quad [\text{N}] \quad (9.2)$$

proto:

$$E = m \cdot a \cdot s \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (9.3)$$

při použití 3. pohybové rovnice získáme vztah

$$v^2 = u^2 + 2 \cdot a \cdot s \quad (9.4)$$

při vyjádření zrychlení a dostaneme rovnici:

$$a = \frac{(v^2 - u^2)}{2 \cdot s} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (9.5)$$

kde u je počáteční rychlost, která je rovna 0, proto

$$a = \frac{v^2}{2 \cdot s} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (9.6)$$

nahrazením v rovnici výše dostaneme vztah:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (9.7)$$

Výkon větru je dán změnou

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} v^2 \cdot \frac{dm}{dt} \quad (9.8)$$

a hmotnostní průtok je dán vztahem

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} \quad (9.9)$$

z čehož rychlost změny vzdálenosti je

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (9.10)$$

dosazením pak získáme vztah

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (9.11)$$

proto pak z rovnice vyplývá, že výkon je roven:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad (9.12)$$

Plocha A je celková oblast turbíny, kterou při otáčení opisují listy vrtule. Jedná se o vzorec pro obsah kruhu, kde r je délka listu rotoru.

$$A = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (9.13)$$

Rotor elektrárny tedy opisuje plochu:

$$A = \frac{\pi \cdot 52^2}{4} = 2\,124 \quad [\text{m}^2]$$

V roce 1919 německý fyzik Albert Betz zjistil, že žádná větrná turbína nedokáže přeměnit více jak 16/27 kinetické energie na mechanickou. To je asi 59,3 %, což je tedy maximální teoretická účinnost větrné turbíny. Tato hodnota je označována jako koeficient výkonu, tedy $c_p = 0,59$. Avšak stejně žádná turbína nedokáže operovat na maximálním limitu. Světově se Betzův limit pohybuje v rozmezí 0,35 – 0,45. Tento koeficient tedy musí být při výpočtu zohledňován. V níže uvedené tabulce (Tab. 13) jsou uvedeny hodnoty Betzova limita pro jednotlivé typy elektráren. Zároveň jsou zde uvedeny i hodnoty rychlostních poměrů λ_{opt} pro optimální hodnoty a λ_{max} pro maximální hodnoty. [9]

Tab. 13 - Hodnoty součinitelů u jednotlivých typů elektráren [9]

Typ elektrárny	$C_{p\,opt}$	λ_{opt}	λ_{max}
Mnoholopátkový rotor (americký)	0,35	1,1	2,0
Třilistý rotor	0,18 - 0,39	2,5 - 6	
Dvoulistý rotor	0,20 - 0,48	6 - 10	
Savonius, dělený	0,23	0,85	1,8
Rotor Darreieus třilistý	0,362	4,66	6,76
Rotor Darreieus jednolistý	0,263	6,1	10,0
Miskový kříž	0,0195	0,14	0,31

Po dosazení koeficientu je rovnice pro výpočet výkonu úplná a má tvar:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \cdot c_p \quad (9.14)$$

kde:

P – výkon turbíny

ρ – hustota vzduchu

r – délka listu rotoru

v – rychlost větru

c_p – koeficient výkonu

Hodnotu c_p jsem zjistila pomocí grafu výkonové křivky dodanou výrobcem (**Error! Reference source not found.**). Zvolila jsem rychlost 10 m/s a z grafu jsem odečetla výkon 500 kW. Pomocí vzorce pro výkon (10.14) jsem si vyjádřila c_p a následně vypočítala hodnotu.

Z předchozího výpočtu jsem zjistila, že třilistý rotor elektrárny opisuje plochu 2 124 m². Hustotu vzduchu jsem zvolila 1,23 kg/m³.

$$c_p = \frac{2P}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3} = \frac{2P}{\rho \cdot A \cdot v^3} = \frac{2 \cdot 500 \cdot 10^3}{1,23 \cdot 2124 \cdot 10^3} = 0,38 \quad [-]$$

Pro výpočet jsem zvolila rychlost větru v měsíci červnu, dne 31. za rok 2017, tedy 7,7 m/s v naměřené výšce 10 m a vypočítanou rychlost větru pro výšku 65 m – 10,8 m/s, jelikož výška elektrárny je 65 m.

K výpočtu jsem využila vzorec pro výpočet výkonu (10.14), tedy:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 2\,124 \cdot 10,8^3 \cdot 0,38 \quad [\text{W}]$$

$$P = 622\,671 \text{ W} = 622,7 \quad [\text{kW}]$$

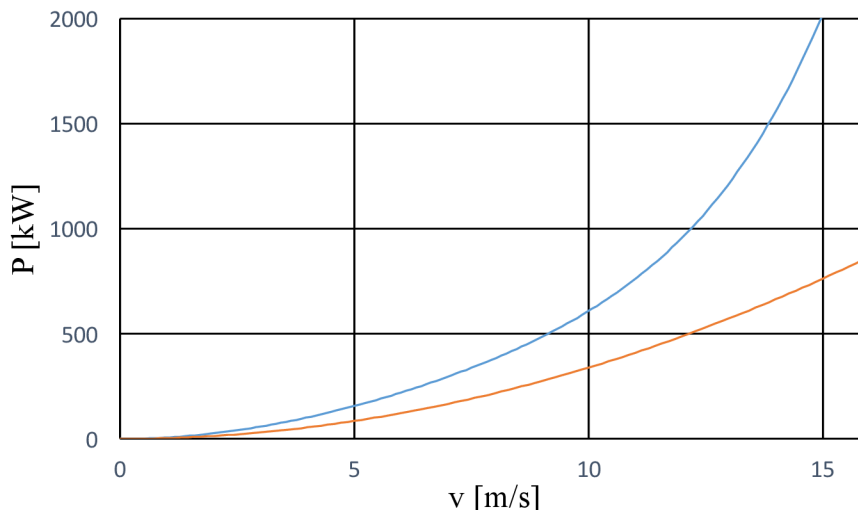
Vypočítané hodnoty jednotlivých dnů z roku 2017 jsem uvedla opět do tabulky (Tab. 13). Opět jsou vyznačeny barevně dny s vyšším výkonem, kvůli vysokým rychlostem větru. Podle výkonové křivky dodané výrobcem (**Error! Reference source not found.**) lze určit, že při rychlostech vyšších než 16 m/s, při kterých elektrárna dosahuje svého jmenovitého výkonu, dochází k ustálení výkonu na nejvyšším možném.

Tab. 14 - Vypočítané hodnoty výkonu pro jednotlivé dny za rok 2017 v kW.

[kW]	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	0,0	0,0	280,1	428,9	226,9	80,9	309,6	341,0	69,1	116,2	40,6	0,0
2	124,3		598,7	0,0	40,6	0,0	170,5	160,5	63,6	280,1	69,1	0,0
3	448,1	53,6	80,9	203,1	49,0	33,3	141,6	150,8	141,6	850,0	44,7	69,1
4	779,9	0,0	672,5	150,8	94,0	552,7	203,1	116,2	53,6	74,8	0,0	203,1
5	509,1	0,0	698,3	132,8	87,3	33,3	87,3	63,6	141,6	672,5	0,0	309,6
6	357,5	26,8	170,5	672,5	49,0	552,7	0,0	29,9	226,9	252,6	0,0	132,8
7	108,4	69,1	0,0	309,6	160,5	850,0	160,5	36,8	226,9	132,8	53,6	0,0
8	0,0	0,0	280,1	252,6	203,1	33,3	294,6	203,1	69,1	226,9	16,6	0,0
9	0,0	74,8	87,3	0,0	101,0	160,5	214,8	101,0	108,4	69,1	0,0	191,8
10	74,8	226,9	467,8	0,0	40,6	170,5	309,6	850,0	0,0	108,4	132,8	80,9
11	0,0	116,2	80,9	622,7	33,3	0,0	341,0	150,8	29,9	63,6	191,8	824,0
12	132,8	49,0	170,5	40,6	36,8	180,9	392,1	191,8	69,1	214,8	132,8	850,0
13	488,2	850,0	53,6	428,9	294,6	239,5	294,6	53,6	150,8	191,8	392,1	0,0
14	280,1	0,0	191,8	94,0	80,9	80,9	24,0	14,5	850,0	33,3	87,3	530,6
15	203,1	0,0	101,0	191,8	203,1	0,0	150,8	44,7	124,3	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	160,5	428,9	0,0	309,6	36,8	191,8	0,0	0,0	0,0	6,7
17	101,0	0,0	239,5	150,8	0,0	410,2	29,9	0,0	0,0	0,0	44,7	94,0
18	53,6	101,0	509,1	160,5	214,8	124,3	80,9	49,0	49,0	0,0	94,0	0,0
19	0,0	0,0	141,6	850,0	341,0	40,6	58,5	410,2	40,6	0,0	132,8	58,5
20	0,0	294,6	428,9	280,1	341,0	58,5	357,5	74,8	850,0	0,0	552,7	0,0
21	0,0	280,1	87,3	141,6	226,9	80,9	87,3	53,6	850,0	0,0	36,8	58,5
22	94,0	357,5	124,3	252,6	58,5	53,6	69,1	49,0	44,7	141,6	0,0	116,2
23	74,8	214,8	0,0	530,6	74,8	509,1	280,1	33,3	49,0	214,8	0,0	325,1
24	0,0	836,0	101,0	69,1	357,5	108,4	124,3	53,6	0,0	53,6	0,0	341,0
25	40,6	132,8	44,7	108,4	150,8	116,2	239,5	44,7	21,3	0,0	74,8	33,3
26	53,6	0,0	101,0	49,0	94,0	101,0	170,5	24,0	21,3	0,0	141,6	0,0
27	132,8	108,4	0,0	44,7	69,1	141,6	108,4	191,8	0,0	325,1	132,8	132,8
28	87,3	341,0	0,0	63,6	87,3	357,5	214,8	44,7	74,8	252,6	0,0	252,6
29	0,0		0,0	69,1	0,0	622,7	26,8	24,0	180,9	0,0	0,0	266,1
30	63,6	108,4	108,4	74,8	69,1	280,1	53,6	69,1	180,9	779,9	87,3	0,0
31	49,0		124,3		80,9		33,3	74,8		116,2		63,6

Jak jsem již zmínila při výpočtu rychlosti větru ve výšce 65 m, do tabulky jsem červenou vyznačila velmi vysoké rychlosti (nad 25 m/s). V těchto rychlostech je již elektrárna kvůli bezpečnosti odstavena, proto tyto hodnoty ve výpočtu nezohledňuji. Dále velmi nízké hodnoty jsem vyznačila zelenou barvou. V tomto případě to jsou hodnoty nižší než 4 m/s. Ve výpočtu jsem dále s těmito hodnotami již nepracovala. Místa s oranžovou barvou jsou hodnoty, kterých elektrárna dle doložené výkonové křivky nemůže dosáhnout, proto jsem ve výpočtu přepsala hodnoty na 850 kW, tedy maximální možný výkon, na kterém může elektrárna pracovat. Ve všech zde uvedených tabulkách jsou hodnoty pouze vyznačené a přepsané.

Výkon vrtule je přímo úměrný 3. mocnině rychlosti větru, což můžeme vidět i na níže uvedeném grafu. energii větru lze zjistit, jestliže známe četnost rychlosti větru. Z dřívějších výzkumů a pozorování byla vytvořena závislost velikosti energie větru protékající ročně plochou 1 m^2 na roční průměrné rychlosti větru. Tato metoda výpočtu však není příliš spolehlivá, jelikož rychlost větru závisí hlavně na dané lokalitě. [9]



Graf. 6 - Závislost výkonu větru na rychlosti vytvořené z výzkumů v porovnání s přibližnou křivkou elektrárny s výkonem 850 kW [9]

9.4. Výpočet otáček

Pro úplnost výpočtu jsem uvedla i výpočet otáček. Ten jsem vypočítala pomocí vzorce [17]:

$$n_j = 30 \cdot \lambda_0 \cdot v^2 \cdot \sqrt{\frac{c_p \cdot \rho \cdot v}{2\pi \cdot P}} \quad [\text{ot/min}] \quad (9.15)$$

Podle tabulky (Tab. 13) jsem zvolila hodnotu rychlostního poměru $\lambda_{\text{opt}} = 4$, kterou jsem opět volila z tabulky č. 12. Zde je zřejmé, že hodnota výkonového součinitele je závislá na λ .

$$n_j = 30 \cdot 4 \cdot 9,72 \cdot \sqrt{\frac{0,35 \cdot 1,23 \cdot 10,8}{2\pi \cdot 622\,671}} \quad [\text{ot/min}]$$

$$n_j = 15,84 \quad [\text{ot/min}]$$

Vypočítané hodnoty jsem zapsala do tabulky (Příloha 1).

9.5. Výpočet energie

Výslednou energii získáme vynásobením výkonu a času.

$$E = P \cdot t \quad (9.16)$$

$$E = 622,7 \cdot 24 = 14\,994,1 \quad [\text{kWh}]$$

Vypočítané hodnoty jsem opět zapsala do tabulky. (Tab. 15). Následně jsem jednotlivé dny v měsíci sečetla a tím jsem získala energii vyrobenou v každém měsíci. Nakonec jsem sečetla i měsíce a získala tak celkovou roční výrobu energie v roce 2017.

$$E_{rok} = \sum_{leden}^{prosinec} E = 1\,391,91 \text{ [MWh]}$$

To znamená, že celková energie vyrobená za rok 2017 je 1 391 MWh.

Tab. 15 – Vyrobená energie v [MWh] v roce 2017

[MWh]	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	0,0	0,0	6,7	10,3	5,4	1,9	7,4	8,2	1,7	2,8	1,0	0,0
2	3,0		14,4	0,0	1,0	0,0	4,1	3,9	1,5	6,7	1,7	0,0
3	10,8	1,3	1,9	4,9	1,2	0,8	3,4	3,6	3,4	20,4	1,1	1,7
4	18,7	0,0	16,1	3,6	2,3	13,3	4,9	2,8	1,3	1,8	0,0	4,9
5	12,2	0,0	16,8	3,2	2,1	0,8	2,1	1,5	3,4	16,1	0,0	7,4
6	8,6	0,6	4,1	16,1	1,2	13,3	0,0	0,7	5,4	6,1	0,0	3,2
7	2,6	1,7	0,0	7,4	3,9	20,4	3,9	0,9	5,4	3,2	1,3	0,0
8	0,0	0,0	6,7	6,1	4,9	0,8	7,1	4,9	1,7	5,4	0,4	0,0
9	0,0	1,8	2,1	0,0	2,4	3,9	5,2	2,4	2,6	1,7	0,0	4,6
10	1,8	5,4	11,2	0,0	1,0	4,1	7,4	20,4	0,0	2,6	3,2	1,9
11	0,0	2,8	1,9	14,9	0,8	0,0	8,2	3,6	0,7	1,5	4,6	19,8
12	3,2	1,2	4,1	1,0	0,9	4,3	9,4	4,6	1,7	5,2	3,2	20,4
13	11,7	20,4	1,3	10,3	7,1	5,7	7,1	1,3	3,6	4,6	9,4	0,0
14	6,7	0,0	4,6	2,3	1,9	1,9	0,6	0,3	20,4	0,8	2,1	12,7
15	4,9	0,0	2,4	4,6	4,9	0,0	3,6	1,1	3,0	0,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	3,9	10,3	0,0	7,4	0,9	4,6	0,0	0,0	0,0	0,2
17	2,4	0,0	5,7	3,6	0,0	9,8	0,7	0,0	0,0	0,0	1,1	2,3
18	1,3	2,4	12,2	3,9	5,2	3,0	1,9	1,2	1,2	0,0	2,3	0,0
19	0,0	0,0	3,4	20,4	8,2	1,0	1,4	9,8	1,0	0,0	3,2	1,4
20	0,0	7,1	10,3	6,7	8,2	1,4	8,6	1,8	20,4	0,0	13,3	0,0
21	0,0	6,7	2,1	3,4	5,4	1,9	2,1	1,3	20,4	0,0	0,9	1,4
22	2,3	8,6	3,0	6,1	1,4	1,3	1,7	1,2	1,1	3,4	0,0	2,8
23	1,8	5,2	0,0	12,7	1,8	12,2	6,7	0,8	1,2	5,2	0,0	7,8
24	0,0	20,1	2,4	1,7	8,6	2,6	3,0	1,3	0,0	1,3	0,0	8,2
25	1,0	3,2	1,1	2,6	3,6	2,8	5,7	1,1	0,5	0,0	1,8	0,8
26	1,3	0,0	2,4	1,2	2,3	2,4	4,1	0,6	0,5	0,0	3,4	0,0
27	3,2	2,6	0,0	1,1	1,7	3,4	2,6	4,6	0,0	7,8	3,2	3,2
28	2,1	8,2	0,0	1,5	2,1	8,6	5,2	1,1	1,8	6,1	0,0	6,1
29	0,0		0,0	1,7	0,0	14,9	0,6	0,6	4,3	0,0	0,0	6,4
30	1,5		2,6	1,8	1,7	6,7	1,3	1,7	4,3	18,7	2,1	0,0
31	1,2		3,0		1,9		0,8	1,8		2,8		1,5

Vypočítané hodnoty vyrobené energie v jednotlivých měsících jsem uvedla do níže uvedené tabulky.

Tab. 16 - Měsíční výroba energie

Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen
102 159,3	104 613,2	146 513,0	163 246,3	92 797,7	150 786,7
Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
121 570,3	93 524,2	112 505,4	124 092,4	59 010,7	121 092,5
SUMA	1 391 911,8	[kWh]			

10. Návratnost

10.1. Prostá návratnost

Prostá návratnost je nejjednodušší možností ekonomického výpočtu. Budeme počítat s momentální výkupní cenou elektřiny podle roku 2018 – tedy 1,93 CZK/kWh. Pro výpočet využijeme vzorec [23]:

$$T_s = \frac{IN}{CF} \quad (10.1)$$

kde IN jsou investiční náklady a CF roční investiční toky.

Pro úplný výpočet návratnosti však nejdříve potřebujeme energii vyrobenou za rok fungování větrné elektrárny, kterou jsem vypočítala v předchozí kapitole za rok 2017. Roční výnos větrné elektrárny se vypočítá jako součin výkupní ceny elektřiny a roční vyrobené energie.

$$Z_1 = 1,93 \cdot 1\,391\,911 = 2\,686\,390 \text{ CZK}$$

Životnost větrné elektrárny počítám na 20 let. Pak tedy čistý zisk z výroby bude:

$$Z_{20} = 2\,686\,390 \cdot 20 = 53\,727\,796 \text{ CZK}$$

Dle ústního sdělení pana Ing. Břetislava Koče (Technologické centrum AV ČR) se cena větrných elektráren momentálně pohybuje okolo 1 000 000 €/MW. Při nynějším kurzu je to tedy cca 25 700 000 CZK. V případě mého výpočtu, kdy výkon elektrárny je 850 kW, by se tedy cena mohla pohybovat kolem 21 845 000 CZK.

Tab. 17 - Výnos větrné elektrárny po jednotlivých letech provozu

Rok	Výnos	Rok	Výnos
1	2 686 390 Kč	11	29 550 288 Kč
2	5 372 780 Kč	12	32 236 678 Kč
3	8 059 169 Kč	13	34 923 067 Kč
4	10 745 559 Kč	14	37 609 457 Kč
5	13 431 949 Kč	15	40 295 847 Kč
6	16 118 339 Kč	16	42 982 237 Kč
7	18 804 729 Kč	17	45 668 627 Kč
8	21 491 118 Kč	18	48 355 016 Kč
9	24 177 508 Kč	19	51 041 406 Kč
10	26 863 898 Kč	20	53 727 796 Kč

V této tabulce (Tab. 17) jsou uvedeny roční výnosy větrné elektrárny v dvacetileté době provozu. Dle tabulky pak vychází, že investice, které se vložily do větrné elektrárny, by se mohly vrátit do devíti let od začátku provozu.

V tomto případě se jedná pouze o čistý zisk, kde nejsou zahrnuty náklady na provoz a údržbu elektrárny.

Dále je potřeba zahrnout do počátečních investic i ostatní položky spojené s výstavbou, jako jsou například náklady při budování základů, projektové práce, komunikace, elektroinstalace, atd.

11. Akumulace

Akumulace je potřeba převážně v místech, kde nelze zajistit plynulou dodávku elektriny do sítě. Z dlouhodobého hlediska by se nejvíce vyplatilo využívat akumulátory v přímořských a horských oblastech, kde dochází k velkým výkyvům rychlostí větru. Existuje několik možností akumulace energie:

11.1. Elektrochemická akumulace

Elektrochemická akumulace je vlastně nejběžnější způsob ukládání vyrobené energie. Elektrická energie je přeměněna na energii chemickou. Je prakticky v každodenním životě, např. při startování auta, nebo jako zdroj energie v elektronických zařízeních. Elektrická energie je tedy přeměněna na chemickou energii.

Základem jsou vzájemně propojené elektrochemické články, které jsou vyrobené z různých materiálů. Nejčastěji využívaným je olovo. Akumulátory však nemusejí být vyrobené pouze z jednoho materiálu, ale mohou být i kombinací materiálů, jako je olovo – kobalt, železo – nikl nebo nikl – kadmium. Každý z těchto akumulátorů má speciální kapacitu, životnost a účinnost. Další možností jsou také akumulátory s rozpuštěnými solemi (sodík – síra, lithium – síra). U těchto akumulátorů, jako je například sodík-síra, je potřeba udržovat teploty elektrolytu vyšší než 250°C. Součástí elektrochemické akumulace je i elektrolyza vody, která ovšem nedosahuje takových účinností jako předchozí akumulátory.

Nevýhodou elektrochemických akumulátorů je především vysoká cena a velmi omezená životnost. Jejich využití je výhodné převážně pro akumulaci menších množství energie. [9]

11.2. Mechanická akumulace

Principem mechanické akumulace je využití akumulace potenciální energie a akumulace kinetické energie. Tento způsob se využívá u vodních elektráren. Účinnost se příliš neliší od elektrochemických akumulátorů.

Kinetická energie se akumuluje pomocí setrvačníků. Rozhodující pro množství akumulované energie je použitý materiál, nejčastější bývají setrvačníky kompozitové. Více výkonné jsou pak setrvačníky ocelové anebo z titanových slitin. Setrvačníky jsou vhodné i pro dlouhodobé uložení energie, bývají však pevně utěsněny a je přiveden podtlak. Proto se využívají i pro akumulaci energie větrných elektráren. [9]

11.3. Tepelná akumulace

U tepelné akumulace se využívá ohřev vhodné látky (v tomto případě velmi kolísá teplota látky) nebo se využívá přeměny skupenství látky (zde zůstává teplota konstantní, avšak je zapotřebí speciálních látek). Stejně tak, jak lze akumulovat teplo, můžeme akumulovat i chlad.

V případě dlouhodobé akumulace není tento způsob příliš vhodný, i přes jeho poměrně nízkou cenu. [9]

11.4. Elektrická akumulace

V případě elektrické akumulace využíváme kondenzátor nebo cívku. Kondenzátor ukládá elektrickou energii formou elektrostatického pole. Nevýhodou kondenzátoru je však příliš malá kapacita na uložení vyrobené energie. U cívky se přeměňuje elektrická energie na magnetickou. Proud procházející cívku indukuje magnetické pole. Výhodou u cívek je především velká kapacita, avšak jsou velmi finančně a prostorově náročné. [9]

Aby byla dodávka do sítě pravidelná, navrhuji použití akumulátoru na noční dobu provozu, tedy 8 hodin a během denních šestnácti hodin by vyrobená energie šla přímo do sítě. Uložením energie by tak vznikla záloha pro méně větrné dny, kdy elektrárna může být odstavena.

Jelikož mnou zvolená větrná elektrárna dosahuje maximálního výkonu 850 kW, zvolila jsem pro výpočet akumulace tento výkon. Tuto hodnotu jsem také zvolila především z důvodu maximálního potřebného množství akumulátorů pro uložení elektrické energie. Předpokládám, že během 24 hodin výroby energie udržuje elektrárna stále konstantní výkon 850 kW. Jak jsem již zmínila, pro uložení do baterií bych volila výrobu během osmi nočních hodin, vyrobená energie se zbytků dne je pak určena na přímý prodej. V případě osmi hodin stálého výkonu, by pak celkový výkon byl:

$$850 \text{ [kW]} \cdot 8 \text{ [h]} = 6\,800 \text{ [kWh]} = 6,8 \text{ [MWh]}$$

Pro uložení této energie volím k výpočtu baterii od firmy VISION třídy Deep Cycle, které jsou dle prodejce vhodné pro akumulaci energie jak z větrných, tak i fotovoltaických elektráren. Zvoleným typem baterie je pak Vision 6FM230D-X, což je baterie s olověným jádrem. Elektrolytem je kyselina sírová. Na kladné desce je oxid olovnatý a na záporné desce je olovo. Tento akumulátor je díky jeho těsnosti minimálně náročný na údržbu, nepropustný a použitelný v jakékoliv poloze. [24], [25]

Tab. 18 - Parametry baterie 6FM230D-X [25]

Parametry baterie	
Napětí	12 V
Životnost	10 let
Kapacita	
20h vybíjení	230 Ah
10h vybíjení	210 Ah
5h vybíjení	201 Ah
1h vybíjení	150 Ah
Délka	520 mm
Šířka	269 mm
Výška	508 mm
Hmotnost	72,6 kg

V případě nabíjení akumulátoru po dobu osmi hodin, bych určila dobu vybíjení 10 h. Tím se mi kapacita akumulátoru sníží z maximálních 230 Ah na 210 Ah, jelikož čím rychleji se mi baterie vybíjí, tím se jeví jako nižší kapacita.

Ze vzorce pro výpočet elektrické energie si vypočítám energii uloženou v akumulátoru:

$$E = U \cdot I \cdot t \text{ [kWh]} \quad (11.1)$$

pak získám:

$$E = 12 \cdot 210 = 2\,520 \text{ Wh} = 2,520 \text{ [kWh]}$$

Díky těmto hodnotám teď mohu zjistit, kolik bude potřeba akumulátorů pro uložení energie v případě, že by elektrárna dosahovala nominálního výkonu:

$$x = \frac{E_{VtE}}{E_{aku}} = \frac{6\,800}{2,520} [-] = 2\,698,41 \approx 2\,700$$

V tomto případě by tedy bylo potřeba 2 700 akumulátorů pro uložení elektrické energie. Jestliže jeden tento akumulátor váží 72,6 kg, pak celková hmotnost bude:

$$m = 2\,700 \cdot 72,6 [kg] = 196\,020 [kg]$$

Jelikož je potřeba baterie uskladnit, určím vzorcem pro výpočet plochy minimální potřebnou plochu pro uložení.

$$S = a \cdot b = 520 \cdot 269 [mm] = 139\,880 [mm^2] = 0,14 [m^2]$$

Jedna baterie tedy zabírá plochu 0,14 m². Tuto hodnotu vynásobím počtem baterií a získám celkovou potřebnou plochu.

$$S = 2700 \cdot 0,14 [m^2] = 378 [m^2]$$

Plocha pro uložení akumulátorů je tedy téměř 400 m². Samozřejmě se výpočtem zjistila pouze minimální plocha, do které nejsou počítány rozestupy mezi bateriemi. Možností pro uložení akumulátorů by mohlo být více, jako například vybudování podzemního úložiště nebo povrchového (např. hala nebo kontejnery). Avšak nejdůležitějším kritériem je chlazení. Jelikož při nabíjení akumulátorů dochází ke zahřívání, je potřeba stálého chlazení.

Důležitým aspektem je rozhodně samovybití akumulátorů. To se se stářím baterie zhoršuje. Proto není vhodné volit akumulátory s příliš dlouhou životností. K rychlejšímu samovybití akumulátorů dochází zároveň i při zvýšené teplotě v místě uskladnění.

Obvykle se průměrný akumulátor vybití sám cca do devíti měsíců. Aby byla životnost akumulátoru co nejdélejší, je potřeba jej udržovat v nabitěm stavu. Hlubší vybití má pak negativní dopad jak na životnost akumulátoru.[28]

Tímto výpočet jsem zjistila hrubý odhad počtu baterií a plochy potřebné pro uložení. Při nabíjení baterie se nemění 100 % vyrobené energie na chemickou, ale část energie se mění na tepelnou, to způsobuje zahřívání baterií. Tím pak vznikají další ztráty energie při nabíjení. Další ztráty poté vznikají dodávkou uložené energie z akumulátorů do sítě, tedy připojením na měnič. Celkově tyto ztráty mohou dávat více než 30 %. Z toho důvodu není akumulace vyrobené energie z těchto velkých zdrojů zcela výhodná.

O otázce akumulace bych proto spíše přemýšlela u malých větrných elektráren nebo fotovoltaických elektráren, kde vyrobená energie nedosahuje takových hodnot jako u větrné energetiky.

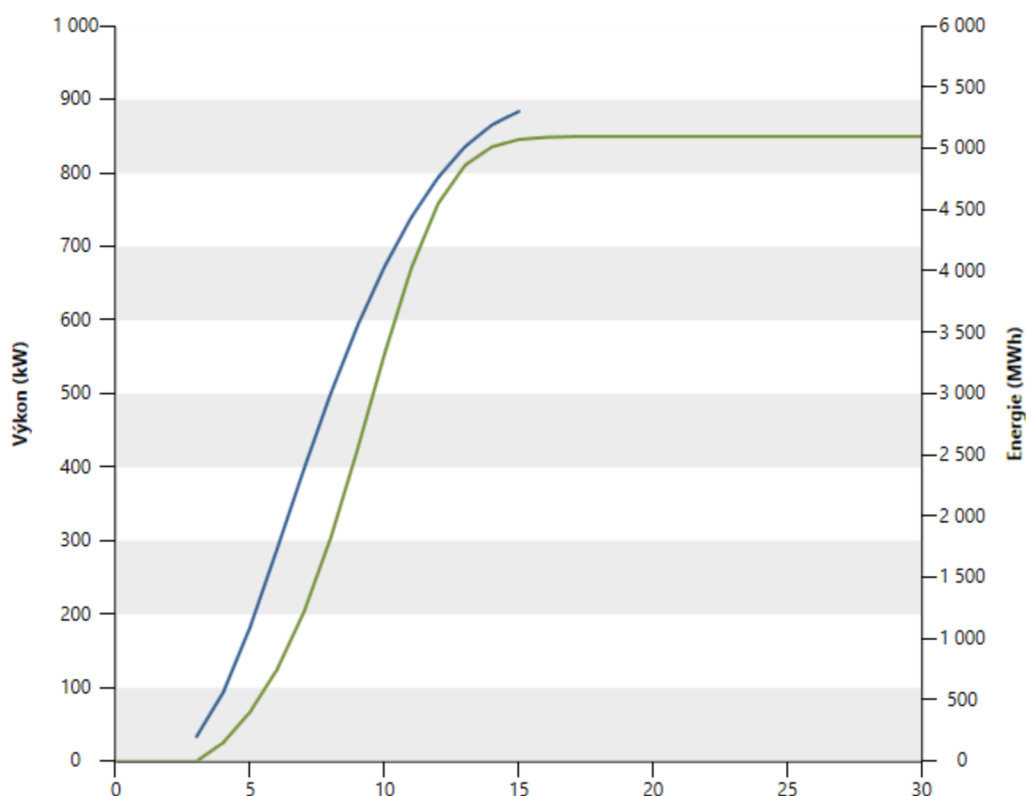
12. Výpočet v programu RETScreen

RETScreen lze využít jako software pro správu energetické účinnosti obnovitelných zdrojů energie a kombinované výroby tepla a elektřiny, nebo energetickou náročnost. Program umožňuje provozovatelům rychle identifikovat nebo posoudit technickou či finanční stránku požadovaného projektu.

Pomocí programu kanadského RETScreen jsem provedla stejný výpočet pro větrnou elektrárnu od firmy Vestas typu V52 – 850 kW. Přímou v programu jsem měla možnost tuto elektrárnu vybrat spolu s jejími přesnějšími parametry.

12.1. Postup výpočtu Vestas V52 – 850 kW

Nejprve jsem vybrala místo výstavby elektrárny, které jsem zvolila stejné, jako měření větru, tedy Prosiměřice nedaleko Znojma. Poté jsem zvolila z jednotlivých možností výroby energií větrné elektrárny s výrobou elektrické energie. Při výběru konkrétního typu větrné elektrárny byla možnost výběru z mnoha jiných firem, u kterých bylo nespočet typů jednotlivých elektráren. Já tedy pro svůj výpočet zvolila od Dánské firmy Vestas typ V52 s instalovaným výkonem 850 kW. Větrná elektrárna má výšku 65 m a pracovní plochu na turbínu 2123,72 m².



Graf. 7 - Výkonová křivka VtE Vestas V52 dle programu RETScreen [27]

V níže uvedené tabulce jsou zapsány data k výkonové křivce, která byla s následným přidáním průměrných hodnot větru za jednotlivé měsíce v programu vytvořena. Průměrné rychlosti větru jsem volila pro rok 2017. Jak můžeme z tabulky vidět, elektrárna začíná vyrábět při rychlostech větru 4 m/s a svého nominálního výkonu dosahuje v rychlostech vyšších než 16 m/s. Od této rychlosti se nadále drží konstantní výkon až do rychlosti 25 m/s. Zároveň byla tato tabulka převedena do grafu.

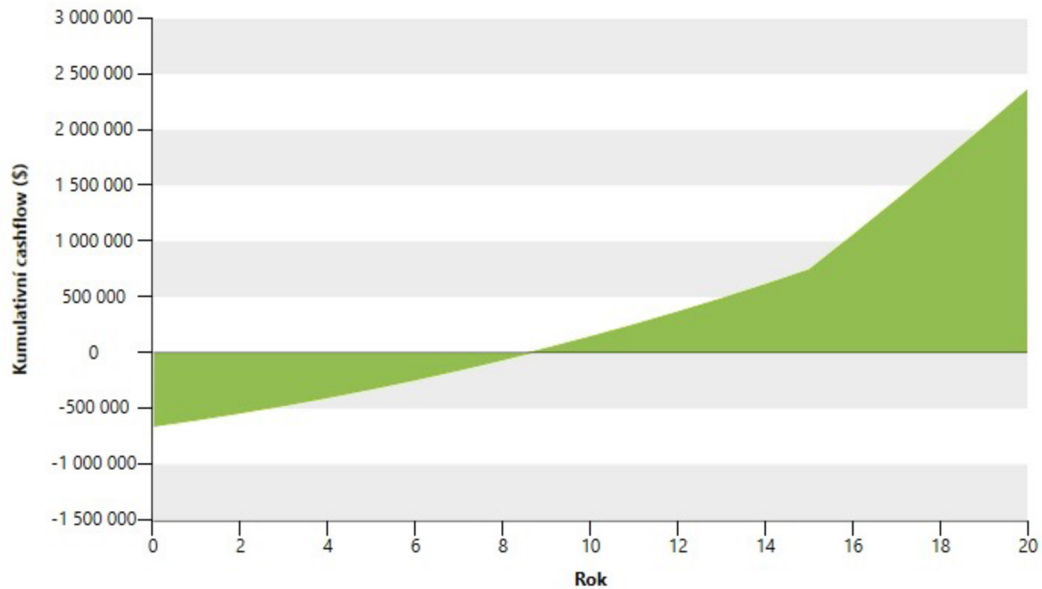
Tab. 19 - Výkony elektrárny Vestas V52 při určitých rychlostech větru dle programu RETScreen [27]

Vestas V52	
Rychlost větru	Výkon elektrárny
[m/s]	[kW]
0	0
1	0
2	0
3	0
4	25,5
5	67,4
6	125
7	203
8	304
9	425
10	554
11	671
12	759
13	811
14	836
15	846
16	849
17	850
18	850
19	850
20	850
21	850
22	850
23	850
24	850
25	850

Díky programu jsem zvolila i finanční částku turbíny, která se pohybuje okolo 2 550 000 USD (amerických dolarů), tj. momentálně tedy v přepočtu cca 54 340 000 CZK (korun českých). Většinou při stavbě turbíny se částka odvíjí především od instalovaného výkonu. V programu bylo uváděno přesněji 3 000 USD/kW. To je při nynějším kurzu v přepočtu necelých 64 mil. CZK/MW.

Další hodnotou nastavenou dle programu byla částka ročních nákladů na provoz větrné elektrárny, která se pohybuje 84 USD/kW-rok. Dle mé zvolené elektrárny tedy 71 400 USD/rok. V přepočtu na českou korunu více než 1,5 mil.

Aby se vrátila investice větrné elektrárny, byla potřeba i výkupní cena vyrobené energie, která podle programu byla 0,10 USD/kWh. Což při současném kurzu je téměř stejná částka jako pro výkup elektřiny v České republice, proto jsem tedy hodnotu zachovala.



Graf. 8 - Doba návratnosti dle výpočtu v programu RETScreen

Budu-li předpokládat životnost projektu na 20 let, podle programu by se mi pravděpodobně měla investice vrátit během necelých devíti let provozu. Do výpočtu jsem zařadila i vstupní zadlužení projektu ze 70 % s dobou splácení 15 let. Roční náklady společně s dluhovými splátkami tak nakonec činily necelých 1,5 mil. USD, což je v přepočtu asi 30 miliónů korun českých. [27]

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo uvést trendy technologie větrných elektráren posledních let. V práci je stručně uvedena historie větrných elektráren a instalace větrných elektráren ve světě a v České republice.

Dále byl v práci popsán princip výroby energie z větru, větrné podmínky v České republice a především výkupní ceny obnovitelných zdrojů v posledních letech. Práce zahrnuje i případné extrémní vlivy na chod větrné elektrárny.

Stručně byly popsány části větrné elektrárny a zároveň typy větrných elektráren instalovaných po celém světě.

Hlavním cílem práce byl výpočet větrné elektrárny na konkrétním území České republiky. Jelikož jsem měla k dispozici data rychlostí větru za jednotlivé dny z amatérské měřicí stanice v Prosiměřicích u Znojma, soustředila jsem výpočet na toto místo. Jelikož obec leží v Dyjsko - svrateckém úvalu, převažují zde nížiny a teploty jsou zde vyšší než v ostatních částech republiky. To má následek i na větrné podmínky. Z toho důvodu jsem volila elektrárnu spíše nižšího výkonu. Vhodnou volbou byla elektrárna firmy Vestas s výkonem 850 kW, která je již instalovaná nedaleko obce – ve větrném parku Břežany na Znojemsku. Výstupem výpočtu byl výpočet množství energie za 20 let provozu elektrárny a návratnost investice. Pro výpočet byl použit hrubý odhad ceny větrných elektráren. Do výpočtu nebyly zahrnuty počáteční investice pro výstavbu elektrárny nebo například i možné dotace od státu.

Další kapitolou byla případná možnost akumulace vyrobené energie. Možností akumulace je mnoho, avšak momentálně dle mého názoru není akumulace příliš výhodná. Z výpočtu bylo zjištěno, že i přes dny, kdy je elektrárna kvůli nedostatečné rychlosti větru odstavena, je s největší pravděpodobností možná návratnost této investice. Pro výpočet akumulace jsem zvolila dle výše uvedeného zdroje baterii olověnou. Akumulací vyrobené energie do baterií však vznikají velké ztráty, které mají negativní vliv na ekonomický chod elektrárny.

Poslední kapitolou v práci byl výpočet v programu RETScreen. Tento výpočet jsem provedla jako zkoušku svého výpočtu větrné elektrárny. Díky velkému rejstříku větrných elektráren jsem měla možnost vybrat stejnou elektrárnu jako u výpočtu.

Téma výroby energie z obnovitelných zdrojů, konkrétně větrných elektráren, je natolik obsáhlé, že nebylo možné popsat podrobně všechny důležité informace k této problematice. Tato práce ovšem může sloužit jako základní zdroj informací pro potenciální investory v oblasti větrné energetiky.

Seznam zdrojů

- [1] CUTLER J. CLEVELAND a Christopher MORRIS. *Handbook of energy*. Burlington: Elsevier Science, 2013. ISBN 978-012-4170-193.
- [2] *Větrné elektrárny včera, dnes a zítra* [online]. OSEL, 2017 [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: http://www.osel.cz/9535-vetrne-elektrarny-vcera-dnes-a-zitra.html?typ=odpoved&id_prispevku=156109
- [3] MATHEW, Sathyajith. *Wind energy: fundamentals, resource analysis, and economics*. New York: Springer, c2006. ISBN 35-403-0905-5.
- [4] *Z historie využívání energie větru v českých zemích* [online]. Praha: Česká společnost pro větrnou energii, 2013 [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>
- [5] 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.
- [6] ČSVE – Větrné elektrárny | Větrná energie. ČSVE – Větrné elektrárny | Větrná energie [online]. Copyright @ 2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 30.01.2018]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/>
- [7] SCHINDLER, Jan. *Rekordní výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů v Německu v roce 2017* [online]. TZB info, 2018 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/16833-rekordni-vyroba-elektřiny-z-obnovitelných-zdroju-v-nemecku-v-roce-2017>
- [8] QUENTIN, Jürgen, Dr. Dirk SUDHAUS a Dr. Marike ENDELL. *Was tun nach 20 Jahren?: Repowering, Weiterbetrieb oder Stilllegung von Windenergieanlagen nach Förderende* [online]. Berlín, 2018 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA_Wind_Was_tun_mit_WEA_nach_20Jahren.pdf
- [9] RYCHETNÍK CSC, Ing. Václav, Prof. Ing. Jiří PAVELKA DRSC. a Doc. Ing. Josef JANOUŠEK CSC. *Větrné motory a elektrárny*. Praha, 1997, 199 s. ČVUT.
- [10] GWEC | Representing the global wind energy industry. GWEC | Representing the global wind energy industry [online]. Copyright © Global Wind Energy Council [cit. 14.05.2018]. Dostupné z: <http://gwec.net>
- [11] Národní energetický mix — OTE, a.s.. *OTE, a.s.* [online]. Copyright © 2010 OTE, a.s. All rights reserved. [cit. 19.05.2018]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [12] HANSLIAN, Mgr. David, Mgr. Jiří HOŠEK, PHD., RNDr. Zuzana CHLÁDOVÁ a PhD., Mgr. Lukáš POP. *Větrné podmínky v České republice ve výšce 10 m nad povrchem I. TZB-info* [online]. 15.4.2013 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/9770-vetrne-podminky-v-ceske-republice-ve-vysce-10-m-nad-povrchem-i>
- [13] *V52-850 kW: The turbine that goes anywhere* [online]. In: . Denmark, s. 6 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_1242006/html/EIA_Report/Annex%20A3.3.pdf

- [14] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2018-01-15]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/04.html>.
- [15] Google [online]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [16] [16] *Prosiměřice - amatérská meteorologická stanice* [online]. Prosiměřice, 2018 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.pocasi.knoflicek.eu>
- [17] Wind Turbine Power Calculations: RWE npower renewables. *The Royal Academy of Engineering* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine>
- [18] *Amatérská měřicí stanice v Děčíně* [online]. Děčín, 2018 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.pocasi-decin.cz/beufortova_stupnice.php
- [19] What is a wind class?. *We are LM Wind Power - the leading rotor blade supplier to the wind industry* [online]. Dostupné z: <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/learn-about-wind/what-is-a-wind-class>
- [20] Windchallenge — The Windleaf, a small and reliable wind turbine. [online]. Dostupné z: <https://windchallenge.com/2017/01/25/lift-versus-drag-wind-turbine/><https://windchallenge.com/2017/01/25/lift-versus-drag-wind-turbine/>
- [21] Wind Turbine Design for a Wind Turbine System. *Alternative Energy Tutorials is Clean and Green Energy* [online]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-design.html>
- [22] Pose d'éoliennes verticales en Bretagne & Normandie - DIWATT. *Diwatt : Installation photovoltaïque et éolienne Bretagne* [online]. Copyright © [cit. 20.05.2018]. Dostupné z: <https://www.diwatt.fr/eolienne-verticale.php>
- [23] CHADIM, Mgr. Tomáš. Výpočtová pomůcka EKONOMICKÁ EFEKTIVNOST INVESTIC (II): Příklad použití. *TZB - info* [online]. © Copyright Topinfo, 2018, 17.10.2005 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/2786-vypoctova-pomucka-ekonomicka-efektivnost-investic-ii>
- [24] VINOBRANÍ V RETZU. In: *CA Regio* [online]. © 2018 RÉGIO [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.ckregio.cz/vinobrani-v-retzu-Z201192.html>
- [25] informace ze světa průmyslu a elektrotechniky - ElektroPrůmysl.cz. informace ze světa průmyslu a elektrotechniky - ElektroPrůmysl.cz [online]. Copyright © 2018 ElektroPrůmysl.cz [cit. 24.05.2018]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz>
- [26] Vision Europe. Vision Europe [online]. Dostupné z: <http://www.vision-batt.eu>
- [27] RETScreen | Natural Resources Canada. Language selection - Natural Resources Canada / Sélection de la langue - Ressources naturelles Canada [online]. Dostupné z: <http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>
- [28] *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení: aneb letem světem startovacích olověných akumulátorů* [online]. In: . 20.12.2008, s. 58 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf

Příloha 1 - Vypočítané otáčky turbíny pro rok 2017

otáčky	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
1	1,44	1,65	12,14	13,99	11,32	8,02	12,55	12,96	7,61	9,05	6,38	5,14
2	9,26		15,64	4,94	6,38	5,35	10,29	10,08	7,41	12,14	7,61	4,53
3	14,20	7,00	8,02	10,91	6,79	5,97	9,67	9,88	9,67	22,43	6,58	7,61
4	17,08	3,91	16,25	9,88	8,44	15,23	10,91	9,05	7,00	7,82	5,35	10,91
5	14,81	3,50	16,46	9,46	8,23	5,97	8,23	7,41	9,67	16,25	4,73	12,55
6	13,17	5,56	10,29	16,25	6,79	15,23	5,14	5,76	11,32	11,73	4,12	9,46
7	8,85	7,61	60,70	12,55	10,08	19,14	10,08	6,17	11,32	9,46	7,00	4,94
8	3,70	5,14	12,14	11,73	10,91	5,97	12,35	10,91	7,61	11,32	4,73	5,14
9	5,14	7,82	8,23	5,35	8,64	10,08	11,11	8,64	8,85	7,61	2,67	10,70
10	7,82	11,32	14,40	89,50	6,38	10,29	12,55	21,19	4,94	8,85	9,46	8,02
11	4,32	9,05	8,02	15,84	5,97	5,14	12,96	9,88	5,76	7,41	10,70	18,11
12	9,46	6,79	10,29	6,38	6,17	10,49	13,58	10,70	7,61	11,11	9,46	22,63
13	14,61	23,87	7,00	13,99	12,35	11,52	12,35	7,00	9,88	10,70	13,58	5,14
14	12,14	44,85	10,70	8,44	8,02	8,02	5,35	4,53	21,60	5,97	8,23	15,02
15	10,91	3,70	8,64	10,70	10,91	5,56	9,88	6,58	9,26	3,50	4,32	4,53
16	4,32	46,91	10,08	13,99	5,35	12,55	6,17	10,70	3,29	2,47	3,70	3,50
17	8,64	2,26	11,52	9,88	4,53	13,79	5,76	3,91	4,32	1,44	6,58	8,44
18	7,00	8,64	14,81	10,08	11,11	9,26	8,02	6,79	6,79	3,50	8,44	4,94
19	2,88	3,70	9,67	20,58	12,96	6,38	7,20	13,79	6,38	3,29	9,46	7,20
20	3,91	12,35	13,99	12,14	12,96	7,20	13,17	7,82	25,10	2,88	15,23	3,70
21	3,91	12,14	8,23	9,67	11,32	8,02	8,23	7,00	22,43	3,70	6,17	7,20
22	8,44	13,17	9,26	11,73	7,20	7,00	7,61	6,79	6,58	9,67	3,29	9,05
23	7,82	11,11	5,56	15,02	7,82	14,81	12,14	5,97	6,79	11,11	3,50	12,76
24	5,35	18,93	8,64	7,61	13,17	8,85	9,26	7,00	3,91	7,00	3,91	12,96
25	6,38	9,46	6,58	8,85	9,88	9,05	11,52	6,58	5,14	4,94	7,82	5,97
26	7,00	4,32	8,64	6,79	8,44	8,64	10,29	5,35	5,14	4,94	9,67	2,88
27	9,46	8,85	4,94	6,58	7,61	9,67	8,85	10,70	4,94	12,76	9,46	9,46
28	8,23	12,96	4,32	7,41	8,23	13,17	11,11	6,58	7,82	11,73	2,88	11,73
29	4,12		89,50	7,61	4,12	15,84	5,56	5,35	10,49	31,69	3,50	11,93
30	7,41		8,85	7,82	7,61	12,14	7,00	7,61	10,49	17,08	8,23	4,53
31	6,79		9,26		8,02		5,97	7,82		9,05		7,41
Průměrné	8,02	11,35	14,28	13,19	8,64	9,94	9,51	8,40	8,97	9,44	6,89	8,65

Příloha 2 - Naměřená rychlost v roce 2016

10 m	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	1,8	2,4	7,6	4,8	4,5	3,9	3,1	4,0	1,7	3,6	2,2	6,1
2	38,1	3,3	3,3	6,5	5,0	4,1	4,3	4,2	2,1	4,6	4,2	12,9
3	3,6	5,0	5,1	4,2	5,2	1,6	4,2	3,0	3,9	4,3	7,9	3,2
4	12,2	6,3	5,0	1,9	6,6	3,3	3,4	3,7	4,4	6,3	2,9	1,5
5	2,4	4,5	3,5	5,5	3,7	3,7	6,2	4,9	6,2	5,9	3,3	2,0
6	1,7	3,3	5,3	4,2	3,0	3,4	7,0	3,7	4,7	4,7	4,1	4,1
7	1,8	3,3	3,0	2,7	4,1	3,1	3,5	3,7	2,9	3,5	4,1	1,5
8	2,3	6,7	4,4	8,9	4,0	2,6	3,1	3,3	5,0	2,1	1,6	22,4
9	1,4	6,5	2,5	4,5	4,1	3,9	6,7	6,3	2,3	2,6	2,6	4,7
10	1,4	6,6	4,3	5,2	6,1	5,5	3,4	3,7	2,8	2,0	5,2	6,2
11	1,9	6,1	4,1	3,0	5,0	3,0	5,6	3,6	2,6	3,3	2,9	6,0
12	4,7	2,0	3,4	2,9	4,2	3,0	5,3	2,4	2,5	3,6	4,0	7,7
13	8,3	2,3	6,8	5,7	3,0	3,8	2,5	3,1	3,4	3,4	4,0	1,3
14	4,1	4,3	4,0	6,4	6,4	4,5	5,8	3,1	3,0	5,6	3,5	2,6
15	5,3	3,8	5,7	3,0	6,0	4,3	5,0	2,9	4,8	4,4	1,9	2,7
16	5,1	4,4	4,3	3,2	5,1	6,9	5,2	2,4	1,9	2,4	1,2	10,1
17	3,4	4,8	2,6	4,8	4,9	8,0	5,2	2,6	5,1	2,3	43,5	2,8
18	2,4	3,2	4,7	3,3	3,2	3,5	4,8	3,4	2,4	3,3	2,4	1,4
19	1,7	6,5	3,2	8,1	4,5	5,3	3,9	2,0	4,9	9,9	3,3	2,6
20	3,7	6,3	5,7	4,9	5,4	2,9	3,1	2,7	3,9	1,7	1,7	3,1
21	4,7	5,8	5,6	2,1	3,7	3,0	5,4	45,6	10,7	1,2	5,1	3,6
22		6,3	5,6	3,6	4,9	2,1	2,7	3,9	6,3	2,4	3,0	2,7
23		5,4	3,1	3,6	4,8	2,6	2,4	2,8	3,0	3,1	2,1	1,2
24		5,9	5,2	7,1	4,1	4,3	3,0	2,7	1,6	1,9	2,0	3,0
25		4,0	2,4	6,4	5,3	7,3	2,8	2,7	2,1	2,1	3,7	5,3
26	1,0	2,5	5,0	7,5	3,2	4,7	4,9	4,0	1,7	3,1	2,2	6,2
27	2,5	5,6	4,2	3,8	2,8	4,3	3,2	3,3	2,3	4,3	5,5	9,3
28	4,4	3,6	4,2	4,9	3,8	2,8	3,8	2,7	3,9	2,7	5,4	10,1
29	3,8	5,5	7,4	2,2	3,9	4,3	5,1	4,0	4,3	4,4	4,0	2,7
30	4,2		2,5	3,1	3,8	7,2	4,0	3,7	3,4	4,8	5,3	1,5
31	6,0		4,1		3,6		4,1	3,0		2,1		1,3

Příloha 3 - Vypočítaná rychlost v roce 2016

65 m	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	2,5	3,4	10,6	6,7	6,3	5,5	4,3	5,6	2,4	5,0	3,1	8,5
2	53,4	4,6	4,6	9,1	7,0	5,7	6,0	5,9	2,9	6,4	5,9	18,1
3	5,0	7,0	7,1	5,9	7,3	2,2	5,9	4,2	5,5	6,0	11,1	4,5
4	17,1	8,8	7,0	2,7	9,2	4,6	4,8	5,2	6,2	8,8	4,1	2,1
5	3,4	6,3	4,9	7,7	5,2	5,2	8,7	6,9	8,7	8,3	4,6	2,8
6	2,4	4,6	7,4	5,9	4,2	4,8	9,8	5,2	6,6	6,6	5,7	5,7
7	2,5	4,6	4,2	3,8	5,7	4,3	4,9	5,2	4,1	4,9	5,7	2,1
8	3,2	9,4	6,2	12,5	5,6	3,6	4,3	4,6	7,0	2,9	2,2	31,4
9	2,0	9,1	3,5	6,3	5,7	5,5	9,4	8,8	3,2	3,6	3,6	6,6
10	2,0	9,2	6,0	7,3	8,5	7,7	4,8	5,2	3,9	2,8	7,3	8,7
11	2,7	8,5	5,7	4,2	7,0	4,2	7,8	5,0	3,6	4,6	4,1	8,4
12	6,6	2,8	4,8	4,1	5,9	4,2	7,4	3,4	3,5	5,0	5,6	10,8
13	11,6	3,2	9,5	8,0	4,2	5,3	3,5	4,3	4,8	4,8	5,6	1,8
14	5,7	6,0	5,6	9,0	9,0	6,3	8,1	4,3	4,2	7,8	4,9	3,6
15	7,4	5,3	8,0	4,2	8,4	6,0	7,0	4,1	6,7	6,2	2,7	3,8
16	7,1	6,2	6,0	4,5	7,1	9,7	7,3	3,4	2,7	3,4	1,7	14,1
17	4,8	6,7	3,6	6,7	6,9	11,2	7,3	3,6	7,1	3,2	60,9	3,9
18	3,4	4,5	6,6	4,6	4,5	4,9	6,7	4,8	3,4	4,6	3,4	2,0
19	2,4	9,1	4,5	11,3	6,3	7,4	5,5	2,8	6,9	13,9	4,6	3,6
20	5,2	8,8	8,0	6,9	7,6	4,1	4,3	3,8	5,5	2,4	2,4	4,3
21	6,6	8,1	7,8	2,9	5,2	4,2	7,6	63,9	15,0	1,7	7,1	5,0
22		8,8	7,8	5,0	6,9	2,9	3,8	5,5	8,8	3,4	4,2	3,8
23		7,6	4,3	5,0	6,7	3,6	3,4	3,9	4,2	4,3	2,9	1,7
24		8,3	7,3	9,9	5,7	6,0	4,2	3,8	2,2	2,7	2,8	4,2
25		5,6	3,4	9,0	7,4	10,2	3,9	3,8	2,9	2,9	5,2	7,4
26	1,4	3,5	7,0	10,5	4,5	6,6	6,9	5,6	2,4	4,3	3,1	8,7
27	3,5	7,8	5,9	5,3	3,9	6,0	4,5	4,6	3,2	6,0	7,7	13,0
28	6,2	5,0	5,9	6,9	5,3	3,9	5,3	3,8	5,5	3,8	7,6	14,1
29	5,3	7,7	10,4	3,1	5,5	6,0	7,1	5,6	6,0	6,2	5,6	3,8
30	5,9		3,5	4,3	5,3	10,1	5,6	5,2	4,8	6,7	7,4	2,1
31	8,4		5,7		5,0		5,7	4,2		2,9		1,8

Příloha 4 - Výkon jednotlivých dnů v roce 2016

[kW]	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
1	0,0	0,0	598,7	150,8	124,3	80,9	40,6	87,3	0,0	63,6	0,0	309,6
2	0,0	49,0	49,0	374,6	170,5	94,0	108,4	101,0	0,0	132,8	101,0	850,0
3	63,6	170,5	180,9	101,0	191,8	0,0	101,0	36,8	80,9	108,4	672,5	44,7
4	850,0	341,0	170,5	0,0	392,1	49,0	53,6	69,1	116,2	341,0	33,3	0,0
5	0,0	124,3	58,5	226,9	69,1	69,1	325,1	160,5	325,1	280,1	49,0	0,0
6	0,0	49,0	203,1	101,0	36,8	53,6	467,8	69,1	141,6	141,6	94,0	94,0
7	0,0	49,0	36,8	0,0	94,0	40,6	58,5	69,1	33,3	58,5	94,0	0,0
8	0,0	410,2	116,2	961,5	87,3	0,0	40,6	49,0	170,5	0,0	0,0	0,0
9	0,0	374,6	0,0	124,3	94,0	80,9	410,2	341,0	0,0	0,0	0,0	141,6
10	0,0	392,1	108,4	191,8	309,6	226,9	53,6	69,1	29,9	0,0	191,8	325,1
11	0,0	309,6	94,0	36,8	170,5	36,8	239,5	63,6	24,0	49,0	33,3	294,6
12	141,6	0,0	53,6	33,3	101,0	36,8	203,1	0,0	21,3	63,6	87,3	622,7
13	779,9	0,0	428,9	252,6	36,8	74,8	0,0	40,6	53,6	53,6	87,3	0,0
14	94,0	108,4	87,3	357,5	357,5	124,3	266,1	40,6	36,8	239,5	58,5	24,0
15	203,1	74,8	252,6	36,8	294,6	108,4	170,5	33,3	150,8	116,2	0,0	26,8
16	180,9	116,2	108,4	44,7	180,9	448,1	191,8	0,0	9,4	0,0	0,0	850,0
17	53,6	150,8	0,0	150,8	160,5	698,3	191,8	0,0	180,9	0,0	0,0	29,9
18	0,0	44,7	141,6	49,0	44,7	58,5	150,8	53,6	18,9	49,0	0,0	0,0
19	0,0	374,6	44,7	724,8	124,3	203,1	80,9	0,0	160,5	810,4	49,0	24,0
20	69,1	341,0	252,6	160,5	214,8	33,3	40,6	0,0	80,9	0,0	0,0	40,6
21	141,6	266,1	239,5	0,0	69,1	36,8	214,8	0,0	850,0	0,0	180,9	63,6
22		341,0	239,5	63,6	160,5	0,0	0,0	80,9	341,0	0,0	36,8	26,8
23		214,8	40,6	63,6	150,8	0,0	0,0	0,0	36,8	40,6	12,6	0,0
24		280,1	191,8	488,2	94,0	108,4	36,8	0,0	0,0	0,0	0,0	36,8
25		87,3	0,0	357,5	203,1	530,6	0,0	0,0	0,0	0,0	69,1	203,1
26	0,0	0,0	170,5	575,4	44,7	141,6	160,5	87,3	0,0	40,6	0,0	325,1
27	0,0	239,5	101,0	74,8	0,0	108,4	44,7	49,0	0,0	108,4	226,9	823,1
28	116,2	63,6	101,0	160,5	74,8	0,0	74,8	0,0	80,9	26,8	214,8	850,0
29	74,8	226,9	552,7	0,0	80,9	108,4	180,9	87,3	108,4	116,2	87,3	0,0
30	101,0		0,0	40,6	74,8	509,1	87,3	69,1	53,6	150,8	203,1	0,0
31	294,6		94,0		63,6		94,0	36,8		0,0		0,0

Příloha 5 - Energie jednotlivých dnů v roce 2016

[MWh]	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
1	0,0	0,0	14,4	3,6	3,0	1,9	1,0	2,1	0,0	1,5	0,0	7,4
2	0,0	1,2	1,2	9,0	4,1	2,3	2,6	2,4	0,0	3,2	2,4	20,4
3	1,5	4,1	4,3	2,4	4,6	0,0	2,4	0,9	1,9	2,6	16,1	1,1
4	20,4	8,2	4,1	0,0	9,4	1,2	1,3	1,7	2,8	8,2	0,8	0,0
5	0,0	3,0	1,4	5,4	1,7	1,7	7,8	3,9	7,8	6,7	1,2	0,0
6	0,0	1,2	4,9	2,4	0,9	1,3	11,2	1,7	3,4	3,4	2,3	2,3
7	0,0	1,2	0,9	0,0	2,3	1,0	1,4	1,7	0,8	1,4	2,3	0,0
8	0,0	9,8	2,8	23,1	2,1	0,0	1,0	1,2	4,1	0,0	0,0	0,0
9	0,0	9,0	0,0	3,0	2,3	1,9	9,8	8,2	0,0	0,0	0,0	3,4
10	0,0	9,4	2,6	4,6	7,4	5,4	1,3	1,7	0,7	0,0	4,6	7,8
11	0,0	7,4	2,3	0,9	4,1	0,9	5,7	1,5	0,6	1,2	0,8	7,1
12	3,4	0,0	1,3	0,8	2,4	0,9	4,9	0,0	0,5	1,5	2,1	14,9
13	18,7	0,0	10,3	6,1	0,9	1,8	0,0	1,0	1,3	1,3	2,1	0,0
14	2,3	2,6	2,1	8,6	8,6	3,0	6,4	1,0	0,9	5,7	1,4	0,6
15	4,9	1,8	6,1	0,9	7,1	2,6	4,1	0,8	3,6	2,8	0,0	0,6
16	4,3	2,8	2,6	1,1	4,3	10,8	4,6	0,0	0,2	0,0	0,0	20,4
17	1,3	3,6	0,0	3,6	3,9	16,8	4,6	0,0	4,3	0,0	0,0	0,7
18	0,0	1,1	3,4	1,2	1,1	1,4	3,6	1,3	0,5	1,2	0,0	0,0
19	0,0	9,0	1,1	17,4	3,0	4,9	1,9	0,0	3,9	19,5	1,2	0,6
20	1,7	8,2	6,1	3,9	5,2	0,8	1,0	0,0	1,9	0,0	0,0	1,0
21	3,4	6,4	5,7	0,0	1,7	0,9	5,2	0,0	20,4	0,0	4,3	1,5
22		8,2	5,7	1,5	3,9	0,0	0,0	1,9	8,2	0,0	0,9	0,6
23		5,2	1,0	1,5	3,6	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0	0,3	0,0
24		6,7	4,6	11,7	2,3	2,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9
25		2,1	0,0	8,6	4,9	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	4,9
26	0,0	0,0	4,1	13,8	1,1	3,4	3,9	2,1	0,0	1,0	0,0	7,8
27	0,0	5,7	2,4	1,8	0,0	2,6	1,1	1,2	0,0	2,6	5,4	19,7
28	2,8	1,5	2,4	3,9	1,8	0,0	1,8	0,0	1,9	0,6	5,2	20,4
29	1,8	5,4	13,3	0,0	1,9	2,6	4,3	2,1	2,6	2,8	2,1	0,0
30	2,4		0,0	1,0	1,8	12,2	2,1	1,7	1,3	3,6	4,9	0,0
31	7,1		2,3		1,5		2,3	0,9		0,0		0,0

Příloha 6 - Naměřená rychlost v roce 2015

10 m	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	1,2	1,7	2,3	9,7	2,4	2,5	3,3	5,7	3,7	3,1	5,9	6,6
2	11,6	4,2	7,6	9,2	3,3	3,6	3,6	3,1	4,9	4,2	3,4	5,0
3	6,9	3,2	7,9	8,8	3,2	3,3	2,9	3,0	3,4	4,9	4,1	2,3
4	7,7	3,1	5,4	4,2	2,6	3,6	2,7	3,6	3,3	1,7	1,2	2,3
5	7,1	5,2	4,8	5,8	4,0	4,6	3,0	3,5	4,6	2,7	1,2	1,7
6	3,7	7,2	4,3	5,6	6,0	5,3	5,0	2,3	8,2	3,0	1,0	2,7
7	2,6	3,9	2,0	5,8	5,1	2,6	3,7	3,2	5,3	1,9	3,0	3,1
8	2,6	9,1	3,8	8,1	3,5	5,6	5,0	5,5	3,7	2,6	4,4	3,1
9	8,3	7,1	3,0	3,2	4,6	4,1	5,8	3,7	2,0	2,4	5,9	4,5
10	9,0	6,2	1,7	2,5	6,6	3,4	5,1	4,5	2,5	2,5	7,8	5,3
11	9,8	3,0	5,9	5,3	2,8	3,1	2,6	3,7	2,9	4,0	4,6	1,6
12	8,1	4,0	4,8	4,5	3,2	4,4	4,5	4,6	2,6	3,0	4,7	3,5
13	1,4	4,5	4,0	9,6	3,9	7,2	4,8	3,8	6,8	2,1	2,1	6,2
14	4,4	3,9	2,3	5,4	5,9	7,5	4,9	6,3	5,5	3,4	7,3	1,3
15	5,6	5,3	4,5	7,0	2,6	4,1	3,6	4,6	1,9	2,9	5,4	1,8
16	2,0	4,0	6,6	6,2	3,9	3,2	2,5	3,3	1,6	2,7	6,0	2,1
17	3,3	4,4	4,0	3,9	4,7	3,5	8,5	3,7	9,9	4,1	3,9	1,9
18	2,0	1,5	3,2	6,2	4,0	3,2	7,6	3,4	4,2	1,6	10,2	1,3
19	1,6	1,9	2,5	3,8	5,6	4,9	3,8	43,4	2,9	11,9	6,3	1,5
20	2,9	1,5	2,1	6,9	6,2	4,3	4,6	3,8	6,6	3,5	6,8	2,9
21	2,0	2,2	2,1	9,7	4,2	4,6	3,8	2,0	4,1	4,0	4,3	2,3
22	3,6	4,8	4,3	3,4	6,5	6,0	3,1	3,8	4,2	2,2	4,3	1,8
23	3,6	3,9	2,0	3,5	4,9	3,8	4,1	5,7	5,0	4,7	6,1	1,7
24	5,5	4,0	4,2	2,6	2,5	3,9	3,5	5,3	3,8	2,6	2,6	2,0
25	5,2	4,8	5,6	3,2	3,5	3,4	5,9	4,9	5,1	1,5	1,7	2,6
26	3,1	2,9	4,0	4,0	4,9	2,7	4,2	2,1	4,7	2,8	3,8	1,2
27	5,8	4,6	6,6	4,4	5,3	3,6	6,3	3,5	5,0	6,1	3,6	1,0
28	4,9	4,3	6,0	9,6	3,0	4,8	5,3	2,6	5,1	4,6	5,2	1,3
29	3,8		4,1	4,3	4,1	2,6	4,2	2,4	6,0	3,5	5,3	2,8
30	5,6		10,0	3,4	6,4	2,6	4,4	3,5	5,3	1,4	11,2	3,7
31	3,5		10,3		2,7		3,0	4,5		3,5		4,6

Příloha 7 - Vypočítaná rychlost v roce 2015

65 m	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Črv	Čvc	Srp	Zář	Říj	Lis	Pro
1	1,7	2,4	3,2	13,6	3,4	3,5	4,6	8,0	5,2	4,3	8,3	9,2
2	16,2	5,9	10,6	12,9	4,6	5,0	5,0	4,3	6,9	5,9	4,8	7,0
3	9,7	4,5	11,1	12,3	4,5	4,6	4,1	4,2	4,8	6,9	5,7	3,2
4	10,8	4,3	7,6	5,9	3,6	5,0	3,8	5,0	4,6	2,4	1,7	3,2
5	9,9	7,3	6,7	8,1	5,6	6,4	4,2	4,9	6,4	3,8	1,7	2,4
6	5,2	10,1	6,0	7,8	8,4	7,4	7,0	3,2	11,5	4,2	1,4	3,8
7	3,6	5,5	2,8	8,1	7,1	3,6	5,2	4,5	7,4	2,7	4,2	4,3
8	3,6	12,7	5,3	11,3	4,9	7,8	7,0	7,7	5,2	3,6	6,2	4,3
9	11,6	9,9	4,2	4,5	6,4	5,7	8,1	5,2	2,8	3,4	8,3	6,3
10	12,6	8,7	2,4	3,5	9,2	4,8	7,1	6,3	3,5	3,5	10,9	7,4
11	13,7	4,2	8,3	7,4	3,9	4,3	3,6	5,2	4,1	5,6	6,4	2,2
12	11,3	5,6	6,7	6,3	4,5	6,2	6,3	6,4	3,6	4,2	6,6	4,9
13	2,0	6,3	5,6	13,4	5,5	10,1	6,7	5,3	9,5	2,9	2,9	8,7
14	6,2	5,5	3,2	7,6	8,3	10,5	6,9	8,8	7,7	4,8	10,2	1,8
15	7,8	7,4	6,3	9,8	3,6	5,7	5,0	6,4	2,7	4,1	7,6	2,5
16	2,8	5,6	9,2	8,7	5,5	4,5	3,5	4,6	2,2	3,8	8,4	2,9
17	4,6	6,2	5,6	5,5	6,6	4,9	11,9	5,2	13,9	5,7	5,5	2,7
18	2,8	2,1	4,5	8,7	5,6	4,5	10,6	4,8	5,9	2,2	14,3	1,8
19	2,2	2,7	3,5	5,3	7,8	6,9	5,3	60,8	4,1	16,7	8,8	2,1
20	4,1	2,1	2,9	9,7	8,7	6,0	6,4	5,3	9,2	4,9	9,5	4,1
21	2,8	3,1	2,9	13,6	5,9	6,4	5,3	2,8	5,7	5,6	6,0	3,2
22	5,0	6,7	6,0	4,8	9,1	8,4	4,3	5,3	5,9	3,1	6,0	2,5
23	5,0	5,5	2,8	4,9	6,9	5,3	5,7	8,0	7,0	6,6	8,5	2,4
24	7,7	5,6	5,9	3,6	3,5	5,5	4,9	7,4	5,3	3,6	3,6	2,8
25	7,3	6,7	7,8	4,5	4,9	4,8	8,3	6,9	7,1	2,1	2,4	3,6
26	4,3	4,1	5,6	5,6	6,9	3,8	5,9	2,9	6,6	3,9	5,3	1,7
27	8,1	6,4	9,2	6,2	7,4	5,0	8,8	4,9	7,0	8,5	5,0	1,4
28	6,9	6,0	8,4	13,4	4,2	6,7	7,4	3,6	7,1	6,4	7,3	1,8
29	5,3		5,7	6,0	5,7	3,6	5,9	3,4	8,4	4,9	7,4	3,9
30	7,8		14,0	4,8	9,0	3,6	6,2	4,9	7,4	2,0	15,7	5,2
31	4,9		14,4		3,8		4,2	6,3		4,9		6,4

Příloha 8 - Výkon jednotlivých dnů v roce 2016

[kW]	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Července	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
1	0,0	0,0	0,0	825,0	0,0	0,0	49,0	252,6	69,1	40,6	280,1	392,1
2	850,0	101,0	598,7	819,0	49,0	63,6	63,6	40,6	160,5	101,0	53,6	170,5
3	448,1	44,7	672,5	812,0	44,7	49,0	33,3	36,8	53,6	160,5	94,0	0,0
4	622,7	40,6	214,8	101,0	0,0	63,6	0,0	63,6	49,0	0,0	0,0	0,0
5	488,2	191,8	150,8	266,1	87,3	132,8	36,8	58,5	132,8	0,0	0,0	0,0
6	69,1	509,1	108,4	239,5	294,6	203,1	170,5	0,0	752,0	36,8	0,0	0,0
7	0,0	80,9	0,0	266,1	180,9	0,0	69,1	44,7	203,1	0,0	36,8	40,6
8	0,0	826,0	74,8	724,8	58,5	239,5	170,5	226,9	69,1	0,0	116,2	40,6
9	779,9	488,2	36,8	44,7	132,8	94,0	266,1	69,1	0,0	0,0	280,1	124,3
10	842,0	325,1	0,0	0,0	392,1	53,6	180,9	124,3	0,0	0,0	647,2	203,1
11	823,0	36,8	280,1	203,1	0,0	40,6	0,0	69,1	33,3	87,3	132,8	0,0
12	724,8	87,3	150,8	124,3	44,7	116,2	124,3	132,8	0,0	36,8	141,6	58,5
13	0,0	124,3	87,3	824,0	80,9	509,1	150,8	74,8	428,9	0,0	0,0	325,1
14	116,2	80,9	0,0	214,8	280,1	575,4	160,5	341,0	226,9	53,6	530,6	0,0
15	239,5	203,1	124,3	467,8	0,0	94,0	63,6	132,8	0,0	33,3	214,8	0,0
16	0,0	87,3	392,1	325,1	80,9	44,7	0,0	49,0	0,0	0,0	294,6	0,0
17	49,0	116,2	87,3	80,9	141,6	58,5	837,6	69,1	834,0	94,0	80,9	0,0
18	0,0	0,0	44,7	325,1	87,3	44,7	598,7	53,6	101,0	0,0	850,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0	74,8	239,5	160,5	74,8	0,0	33,3	850,0	341,0	0,0
20	33,3	0,0	0,0	448,1	325,1	108,4	132,8	74,8	392,1	58,5	428,9	33,3
21	0,0	0,0	0,0	825,0	101,0	132,8	74,8	0,0	94,0	87,3	108,4	0,0
22	63,6	150,8	108,4	53,6	374,6	294,6	40,6	74,8	101,0	0,0	108,4	0,0
23	63,6	80,9	0,0	58,5	160,5	74,8	94,0	252,6	170,5	141,6	309,6	0,0
24	226,9	87,3	101,0	0,0	0,0	80,9	58,5	203,1	74,8	0,0	0,0	0,0
25	191,8	150,8	239,5	44,7	58,5	53,6	280,1	160,5	180,9	0,0	0,0	0,0
26	40,6	33,3	87,3	87,3	160,5	0,0	101,0	0,0	141,6	0,0	74,8	0,0
27	266,1	132,8	392,1	116,2	203,1	63,6	341,0	58,5	170,5	309,6	63,6	0,0
28	160,5	108,4	294,6	824,0	36,8	150,8	203,1	0,0	180,9	132,8	191,8	0,0
29	74,8	94,0	108,4	94,0	94,0	0,0	101,0	0,0	294,6	58,5	203,1	0,0
30	239,5	850,0	53,6	357,5	0,0	116,2	58,5	203,1	0,0	850,0	69,1	0,0
31	58,5	850,0	0,0	0,0	0,0	36,8	124,3	58,5	0,0	0,0	132,8	0,0

Příloha 9 - Energie jednotlivých dnů v roce 2015

[MWh]	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Července	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec
1	0,00	0,00	0,00	19,80	0,00	0,00	1,18	6,06	1,66	0,98	6,72	9,41
2	20,40	2,43	14,37	19,66	1,18	1,53	1,53	0,98	3,85	2,43	1,29	4,09
3	10,75	1,07	16,14	19,49	1,07	1,18	0,80	0,88	1,29	3,85	2,26	0,00
4	14,94	0,98	5,15	2,43	0,00	1,53	0,00	1,53	1,18	0,00	0,00	0,00
5	11,72	4,60	3,62	6,39	2,09	3,19	0,88	1,40	3,19	0,00	0,00	0,00
6	1,66	12,22	2,60	5,75	7,07	4,87	4,09	0,00	18,05	0,88	0,00	0,00
7	0,00	1,94	0,00	6,39	4,34	0,00	1,66	1,07	4,87	0,00	0,88	0,98
8	0,00	19,82	1,80	17,40	1,40	5,75	4,09	5,45	1,66	0,00	2,79	0,98
9	18,72	11,72	0,88	1,07	3,19	2,26	6,39	1,66	0,00	0,00	6,72	2,98
10	20,21	7,80	0,00	0,00	9,41	1,29	4,34	2,98	0,00	0,00	15,53	4,87
11	19,75	0,88	6,72	4,87	0,00	0,98	0,00	1,66	0,80	2,09	3,19	0,00
12	17,40	2,09	3,62	2,98	1,07	2,79	2,98	3,19	0,00	0,88	3,40	1,40
13	0,00	2,98	2,09	19,78	1,94	12,22	3,62	1,80	10,29	0,00	0,00	7,80
14	2,79	1,94	0,00	5,15	6,72	13,81	3,85	8,19	5,45	1,29	12,73	0,00
15	5,75	4,87	2,98	11,23	0,00	2,26	1,53	3,19	0,00	0,80	5,15	0,00
16	0,00	2,09	9,41	7,80	1,94	1,07	0,00	1,18	0,00	0,00	7,07	0,00
17	1,18	2,79	2,09	1,94	3,40	1,40	20,10	1,66	20,02	2,26	1,94	0,00
18	0,00	0,00	1,07	7,80	2,09	1,07	14,37	1,29	2,43	0,00	20,40	0,00
19	0,00	0,00	0,00	1,80	5,75	3,85	1,80	0,00	0,80	20,40	8,19	0,00
20	0,80	0,00	0,00	10,75	7,80	2,60	3,19	1,80	9,41	1,40	10,29	0,80
21	0,00	0,00	0,00	19,80	2,43	3,19	1,80	0,00	2,26	2,09	2,60	0,00
22	1,53	3,62	2,60	1,29	8,99	7,07	0,98	1,80	2,43	0,00	2,60	0,00
23	1,53	1,94	0,00	1,40	3,85	1,80	2,26	6,06	4,09	3,40	7,43	0,00
24	5,45	2,09	2,43	0,00	0,00	1,94	1,40	4,87	1,80	0,00	0,00	0,00
25	4,60	3,62	5,75	1,07	1,40	1,29	6,72	3,85	4,34	0,00	0,00	0,00
26	0,98	0,80	2,09	2,09	3,85	0,00	2,43	0,00	3,40	0,00	1,80	0,00
27	6,39	3,19	9,41	2,79	4,87	1,53	8,19	1,40	4,09	7,43	1,53	0,00
28	3,85	2,60	7,07	19,78	0,88	3,62	4,87	0,00	4,34	3,19	4,60	0,00
29	1,80	0,00	2,26	2,60	2,26	0,00	2,43	0,00	7,07	1,40	4,87	0,00
30	5,75	0,00	20,40	1,29	8,58	0,00	2,79	1,40	4,87	0,00	20,40	1,66
31	1,40	0,00	20,40	0,00	0,00	0,00	0,88	2,98	0,00	1,40	0,00	3,19

Seznam obrázků

Obr. 1 - Větrný mlýn z 18. století v Retzu	11
Obr. 2 - Rozmístění větrných elektráren v ČR	17
Obr. 3 - Vývoj výšky stožáru a průměru rotoru VtE.....	18
Obr. 4 - Odporová turbína	19
Obr. 5 - Vztlaková turbína	19
Obr. 6 - Jednolistý, dvoulistý a třílistý typ	20
Obr. 7 - Typy vertikálních turbín	20
Obr. 8 - Průměrná rychlost větru ve výšce 10 m	21
Obr. 9 - Území vhodná pro umístění větrných elektráren	23
Obr. 10 - Části větrné elektrárny Vestas V52	26
Obr. 11 - Prstenec mnohápólového prstence VtE	27
Obr. 12 - Poloha obce Prosiměřice.....	31

Seznam tabulek

Tab. 1 - Celkový instalovaný výkon ve světě	13
Tab. 2 - Deset zemí s nejvyšším výkonem	13
Tab. 3 - Srovnání výkupních cen 2007 – 2018.....	15
Tab. 4 - Instalace větrných elektráren v České republice.....	17
Tab. 5 - Závislost exponentu n na druhu povrchu.....	22
Tab. 6 - Beufartova stupnice	28
Tab. 7 - Jednotlivé třídy	29
Tab. 8 - Parametry větrné elektrárny Vestas V52 - 65 m.....	30
Tab. 9 - Naměřené rychlosti větru ve výšce 10 m v roce 2017.....	31
Tab. 10 – Průměrné rychlosti za jednotlivé měsíce pro výšku 10 m.....	32
Tab. 11 – Průměrné rychlosti za jednotlivé měsíce pro výšku 65 m.....	32
Tab. 12 - Vypočítané rychlosti větru ve výšce 65 m.....	32
Tab. 13 - Hodnoty součinitelů u jednotlivých typů elektráren.....	35
Tab. 14 - Vypočítané hodnoty výkonu pro jednotlivé dny za rok 2017 v kW. ...	36
Tab. 15 – Vyrobená energie v [MWh] v roce 2017	38
Tab. 16 - Měsíční výroba energie.....	38
Tab. 17 - Výnos větrné elektrárny po jednotlivých letech provozu	39
Tab. 18 - Parametry baterie 6FM230D-X	41
Tab. 19 - Výkony elektrárny Vestas V52 při určitých rychlostech větru dle programu RETScreen	44

Seznam grafů

Graf. 1 - Celkový instalovaný výkon ve světě	12
Graf. 2 - Deset zemí s největším výkonem	14
Graf. 3 - Podíl energetických složek v ČR (2016).....	16
Graf. 4 - Výkonová křivka elektrárny Vestas V52 - 850 kW.....	26
Graf. 5 - Graf naměřených a vypočítaných hodnot průměrných rychlostí větru	33
Graf. 6 - Závislost výkonu větru na rychlosti vytvořené z výzkumů v porovnání s přibližnou křivkou elektrárny s výkonem 850 kW	37
Graf. 7 - Výkonový křivka VtE Vestas V52 dle programu RETScree	43
Graf. 8 - Doba návratnosti dle výpočtu v programu RETScreen	45

Seznam příloh

Příloha 1 - Vypočítané otáčky turbíny pro rok 2017.....	49
Příloha 2 - Naměřená rychlost v roce 2016.....	50
Příloha 3 - Vypočítaná rychlost v roce 2016.....	50
Příloha 4 - Výkon jednotlivých dnů v roce 2016.....	51
Příloha 5 - Energie jednotlivých dnů v roce 2016.....	51
Příloha 6 - Naměřená rychlost v roce 2015.....	52
Příloha 7 - Vypočítaná rychlost v roce 2015.....	52
Příloha 8 - Výkon jednotlivých dnů v roce 2016.....	53
Příloha 9 - Energie jednotlivých dnů v roce 2015.....	53