



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MULTIROTOROVÁ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA PRO ČESKO

MULTIROTOR WIND POWER PLANT FOR THE CZECH REPUBLIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Boršoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík,
Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Adam Boršoš
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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:

Multirotorová větrná elektrárna pro Česko

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Multirotorové větrné elektrárny mají dvě zásadní výhody oproti stejně výkonné jednorotorové větrné elektrárně. Jednak jednotlivé komponenty mají menší rozměr a hmotnost a jednak je lze postavit z menších typů větrných turbín, které byly vyrobeny ve velkých sériích a mají tedy ověřené provozní vlastnosti. Jedná se tedy o alternativu, kterou má smysl zvážit pro použití v rámci Česka.

Cíle diplomové práce:

1. Popis multirotorové větrné elektrárny (konstrukce, teorie, ekonomika, logistika...).
2. Analýza využitelnosti multirotorových větrných turbín v podmínkách ČR–SK.
3. Návrh multirotorové větrné turbíny pro vybranou lokalitu v ČR–SK na základě dostupných komponent jednorotorových elektráren.
4. Výpočet rozměrů jednorotorové větrné turbíny pro parametry v bodě 3.

Seznam doporučené literatury:

HAU, Erich, 2006, Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN-10-3-540-24240-6.

Hexicon, <https://www.hexicongroup.com/about>.

Maarten van der LAAN, M. P., ANDERSEN, S. J., Ramos GARCÍA, N., ANGELOU, N., PIRRUNG, G. R., OTT, S., SJÖHOLM, M., SØRENSEN, K. H., Vianna NETO, J. X., KELLY, M., MIKKELSEN, T. K., LARSEN, G. C., 2019, Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator, Wind Energy Science, 4, 251–271, <https://doi.org/10.5194/wes-4-251-2019>.

ŠKORPÍK, Jiří, 2023, Větrné elektrárny, Transformační technologie, Brno, [online], ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://turbomachinery.education/vetrne-elektrarny.html>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

So zvyšovaním výkonu veterných turbín sa väčšinou zvyšuje aj priemer rotoru. To komplikuje prepravu a manipuláciu. Koncept multirotorovej elektrárne má potenciál tento problém minimalizovať. V tejto práci boli vo všeobecnosti popísané rôzne aspekty multirotorových elektrární. Bolo analyzované územie Českej republiky z hľadiska podmienok pre veterné elektrárne a následne bola vybraná vhodná lokalita pre umiestnenie multirotorovej elektrárne. Nasledoval výber modelu veterných turbín pre multirotorovú konštrukciu. Po vypočítaní výkonov a porovnaní kľúčových parametrov troch modelov, bol vybraný najvhodnejší model. Nasledoval samotný návrh konštrukcie, ktorý bol vytvorený podľa výsledkov pevnostnej analýzy v programe SolidWorks. Taktiež bol vytvorený výpočet rozmerov ekvivalentnej jednorotorovej veternej elektrárne a výber zodpovedajúceho modelu. Nakoniec bola navrhnutá multirotorová elektrárna porovnaná s veternými elektrárnami v okolí vybranej lokality.

Kľúčové slová

Veterná energia, obnoviteľné zdroje, multirotorová veterná elektrárna, Česká republika, veterná turbína

ABSTRACT

As the power of wind turbines increases, the rotor diameter usually increases as well. This complicates transportation and handling. The multirotor power plant concept has the potential to minimise this problem. In this paper, various aspects of multirotor power plants have been described in general terms. The landscape of the Czech Republic has been analysed in terms of conditions for wind power plants and consequently a suitable site for the location of a multirotor power plant has been selected. This was followed by the selection of the wind turbine model for the multirotor design. After calculating the outputs and comparing the key parameters of the three models, the most suitable model was selected. This was followed by the actual design of the structure, which was created according to the results of the strength analysis in SolidWorks. Finally, a calculation of the dimensions of the equivalent single-rotor wind turbine was made and the corresponding model was selected. Also, the designed multi-rotor power plant was compared with the wind power plants surrounding the selected location.

Key words

Wind energy, renewable energy, multirotor wind power plant, Czech Republic, wind turbine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BORŠOŠ, Adam. Multirotorová větrná elektrárna pro Česko. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157905>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Škorpík.

PROHLÁŠENÍ

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Multirotorová elektrárň pre Česko** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Dátum

.....
Meno a priezvisko

POĎAKOVANIE

Ďakujem Ing. Jiřimu Škorpíkovi, Ph.D. za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní záverečnej práce a taktiež mojej rodine za podporu.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Popis multirotorovej veternej elektrárne	10
1.1 Konštrukcia.....	13
1.2 Ekonomika.....	14
1.3 Teória	15
1.4 Logistika.....	18
2 Analýza využiteľnosti multirotorových veterných turbín v Českej republike.....	20
2.1 Podmienky pre umiestnenie multirotorovej elektrárne	21
2.2 Výber lokality	22
2.3 Poveternostné podmienky	24
3 Výber modelu rotoru	28
3.1 Popis situácie veterných elektrární v ČR	28
3.2 Výber a popis turbín.....	29
4 Výpočet energie	33
4.1 Energia vetra.....	33
4.2 Vyrobená energia počas jedného roka	36
4.3 Koeficienty	37
4.4 Porovnanie.....	38
5 Konštrukcia	40
5.1 Materiál	40
5.2 Konštrukčné riešenie.....	40
5.3 Sily pôsobiace na konštrukciu	43
5.4 Simulácia.....	46
6 Porovnanie s jednorotorovou veternou elektrárnou	50
6.1 Výpočet rozmerov veternej turbíny s jedným rotorom	50
6.2 Veterné elektrárne v blízkosti.....	52
DISKUSIA	54
ZÁVER.....	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	64
ZOZNAM OBRÁZKOV.....	66
ZOZNAM TABULIEK.....	68

ÚVOD

Vzhľadom na rastúce obavy o environmentálnu udržateľnosť a potrebu znížiť emisie skleníkových plynov sa energia z obnoviteľných zdrojov stáva kľúčovým prvkom globálnej stratégie na zabezpečenie čistej a bezpečnej energetickej budúcnosti. Jedným z trendov v energetickom sektore sa postupne stáva veterná energia. Jedná sa o odvetvie, ktoré sa považovalo za okrajové a s nízkym potenciálom, no v posledných rokoch zaznamenáva významný nárast v investíciách a pokrok v technológiách, čím sa stáva jedným z hlavných pilierov udržateľného rozvoja energetiky.

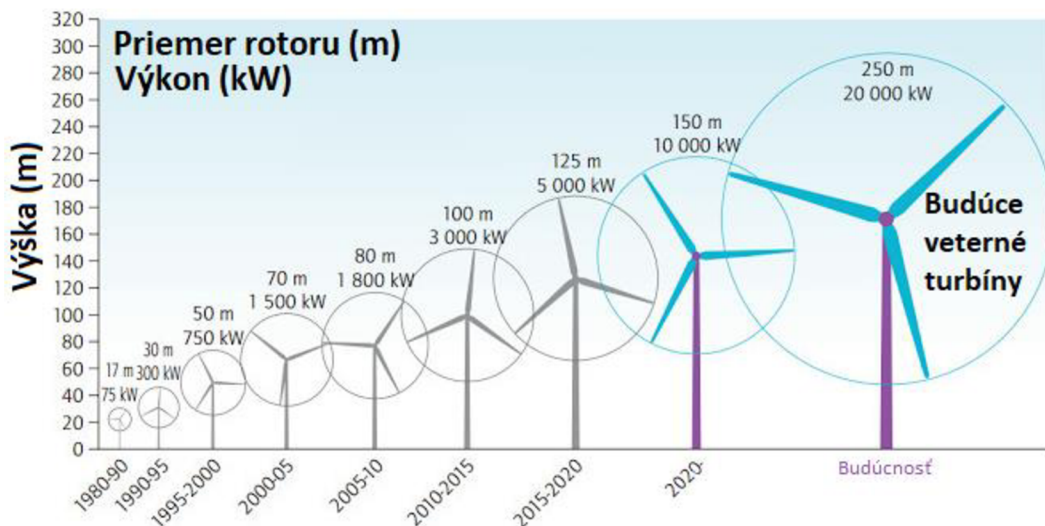
Výkon veterných turbín sa neustále zvyšuje. S rastúcim výkonom sa zväčšujú aj rozmery týchto turbín, čo prináša určité problémy. Konštrukcia aj preprava sa stávajú zložitejšími. Existuje mnoho vylepšení a alternatívnych riešení, ktoré tieto problémy dokážu minimalizovať. Táto práca sa venuje práve jednému z nich – multirotorovej konštrukcii. Jedná sa o koncept, ktorý spočíva v umiestnení viacerých menších rotorov na jednej konštrukcii.

Počet voľných miest na pobrežiach, ktoré sú vhodné pre veterné elektrárne, sa postupne znižuje a tak sa postupne začínajú premiestňovať aj do vnútrozemia. V týchto oblastiach často nie sú pre nich až také vhodné podmienky. Jedným z hlavných problémov je rýchlosť vetra. Miesta s vysokou rýchlosťou vetra sú často ťažšie dostupné. Táto skutočnosť limituje priemer rotoru ktorý je možné do danej lokality dopraviť a teda limituje aj výkon. Použitie viacerých rotorov menších rozmerov má potenciál tento problém odstrániť.

1 Popis multirotorovej veternej elektrárne

Pri hľadaní spôsobov, ako zabezpečiť udržateľnú energiu je jedným z hlavných riešení veterná energia. Tradičné veterné turbíny sa podieľajú na výrobe energie už desaťročia, a s technologickým pokrokom sa zvyšuje aj inovačný potenciál. Od vzniku veterných turbín koncom 19. storočia prešli tieto vysoké stavby významným vývojom. Od klasických horizontálnych konštrukcií až po modernejšie turbíny s vertikálnou osou. Inžinieri hľadali spôsoby, ako optimalizovať účinnosť a minimalizovať vplyv na životné prostredie. Vznik viacrotorových veterných turbín predstavuje najnovšiu kapitolu a ponúka nový pohľad na spôsob zachytávania a využívania veternej energie. Predstavuje novátorský prístup k výrobe veternej energie, ktorý má potenciál priniesť vyššiu účinnosť, všestrannosť a rozšíriteľnosť.

Výkon veternej turbíny je určený rýchlosťou vetra, koeficientom výkonu (C_p) a obtekanou plochou rotora. Výrobcovia v snahe zvýšiť výrobu energie konštruujú tradičné veterné turbíny s väčšími rotormi. Napriek tomu, významné problémy súvisiace s masívnymi rotormi (ako sú rozmery, náklady, hluk atď.) obmedzujú ich použitie pri výrobe veternej energie. Z tohto dôvodu sa pozornosť taktiež presúva aj na multirotorové veterné turbíny s menšími rotormi. [1]



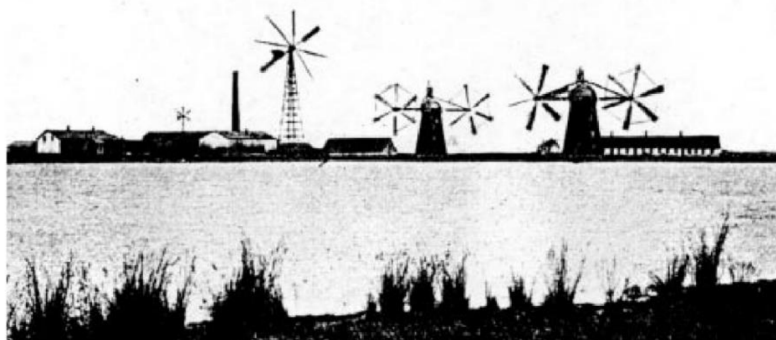
Obr. 1.1 Vývoj veterných turbín [2] (upravené)

Je potrebné zmieniť, že multirotorový koncept nie je nový nápad. Jeho počiatky siahajú do Dánska koncom 19. storočia. [3]



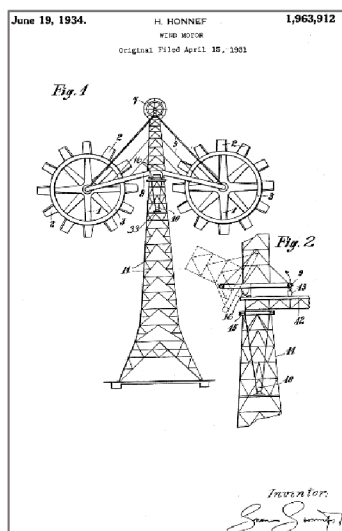
Obr. 1.2 Detail multirotorového mlynu v dánsku 1873 [3]

Veterná energia sa využívala na mnohé projekty priehrad a vysušovanie. Prehradenie rieky Saltbæk Vig pri Kalundborgu sa začalo v roku 1866 a čerpadlá boli spočiatku poháňané parným strojom. V roku 1873 bol parný stroj doplnený o 3 holandské mlyny, ktoré vidno na obrázku nižšie. Jedná sa o jeden jednorotorový mlyn s 8 lopatkami a dva dvojrotorové každý s šiestimi lopatkami.

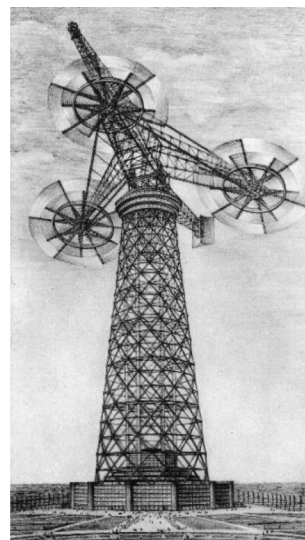


Obr. 1.3 Multirotorové mlyny v Dánsku [3]

V tridsiatych rokoch dvadsiateho storočia na tento koncept na viazal Hermann Honnef. V roku 1934 podal patent na multirotorovú turbínu, vid' obr. 1.4. V tej dobe bola oceľ jediným materiálom ktorý bol pre vetrenú turbínu použiteľný. Tento fakt obmedzoval veľkosť rotoru. Jedným z jeho návrhov bola 500 metrov vysoká multirotorová elektrárň s priemerom rotorov 160 metrov. Tento návrh mal mať údajne výkon 75 MW. Takýto koncept je aj v dnešnej dobe nereálny. [4,5]



Obr. 1.4 Honnefov patent [4]



Obr. 1.5 Honnefov návrh s výkonom
75 MW [5]

Jedným z prvých pokusov o modernú multirotorovú elektrárň vytvoril Henk Lagerweij zo spoločnosti Lagerweij Wind. Postavil niekoľko prevedení a mal rozsiahle znalosti o kľúčových technických otázkach ako je napríklad vychýľovanie a interakcia rotorov. Obrázok 1.6 znázorňuje viacrotorový systém Lagerweij so stromovou štruktúrou, ktorá však bola vystavená problémom s vibráciami. [6] Tie boli výrazné najmä pri veľkých rozmeroch. Konštrukcia nemala dobrý pomer pevnosti k hmotnosti. Táto skutočnosť mala za následok opustenie tohto konceptu.

Jednou z multirotorových elektrární ktorá bola funkčná je Vestas 4R-V29. Vyrobená spoločnosťou Vestas Wind Energy Systems A/S na pôde Technical University of Denmark v meste Risø. Pozostávala zo štyroch rotorov V29 o výkone 225 kW. Celkový výkon bol teda 900 kW. Rotory boli uložené vo dvojici vo výške 30 a 60 metrov. Ramená sú pripevnené na objímky s ložiskami, čo umožňuje otáčanie dvojice ramien. Veterná elektrárň bola v prevádzke skoro tri roky, až do roku 2018. [7]

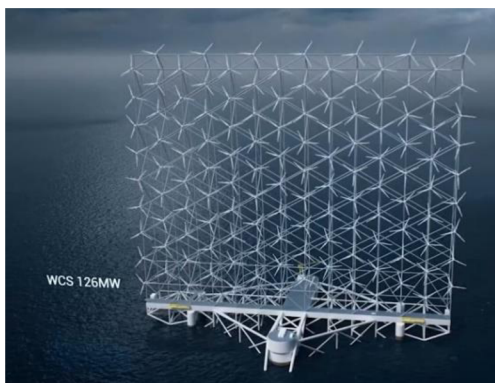


Obr. 1.6 Lagerwey [8]

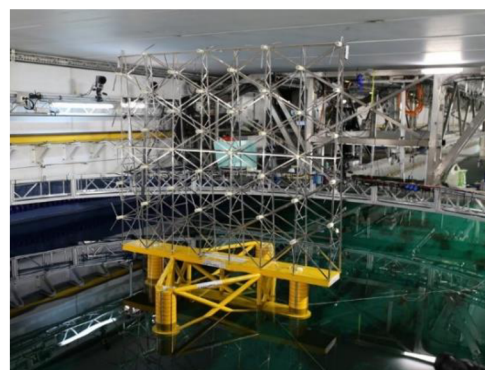


Obr. 1.7 Vestas 4R-V29 [7]

Multirotorový koncept má uplatnenie aj na mori. Nórska spoločnosť Wind Catching Systems už 5 rokov pracuje na návrhu plávajúcej konštrukcie na ktorú by bolo možné umiestniť 40 až 126 veterných turbín. Každá z nich má výkon 1 MW. Pričom takýto návrh má rovnaké výhody ako pri umiestnení na pevnine. Veľké množstvo turbín znamená, že pri poruche alebo údržbe jedného rotoru nedôjde k výraznému poklesu výkonu. Taktiež dochádza k sériovosti jednotlivých dielov. Predpokladaná životnosť takejto konštrukcie je 50 rokov. [9] Nórsko plánuje do roku 2040 inštalovať 30 GW veternej energie na mori, čo by vyžadovalo 1500-2000 jednorotorových elektrární. [10] Generálny riaditeľ spoločnosti Wind Catching Systems tvrdí, že použitím ich multirotorového návrhu by bolo možné znížiť počet týchto elektrární na 400. Takýto projekt má určité výhody, no je predčasné ho považovať za úspech, vzhľadom na to, že ešte stále vo fáze vývoja a testovania. Na prototypoch plávajúcej multirotorovej elektrárne pracujú aj spoločnosti EnerOcean (WIP10+) a EnWB (Nezzy²).



Obr. 1.8 Konštrukcia Wind Catcher system (WCS) [9]



Obr. 1.9 Testovanie modelu v mierke 1:87,5 [11]

Technológia multirotorovej elektrárne má svoje výhody. Ale existujú určité nevýhody, ktoré bránia rozšíreniu daného konceptu.

Výhody[12,13]:

- Hmotnosť zostavy rotor-gondola pre multirotorovú elektrárnu je znížená oproti porovnateľnej jednorotorovej. To má pozitívny vplyv na celkovú hmotnosť a cenu. Taktiež má vplyv aj na zníženie váhy zostavy prevodovka-generátor.
- Inštalácia, oprava, údržba menších rotorov je jednoduchšia.
- Preprava a montáž menších lopatiek je jednoduchšia a lacnejšia.
- Sériovosť súčiastok.
- Možnosť prevádzkovať jednotlivé rotory pri rôznych rýchlostiach.
- Použitím multirotorového riešenia možné zvýšiť ročnú výrobu energie, v prípade štúdie [7] bola zvýšená ročná výroba energie o 1,5%.
- Za podmienky, že je možné mať spustených iba určitý počet turbín z celkového počtu, ak by nastala porucha, nie je potrebné odstaviť celú veternú elektrárnu. Teoreticky by bola možná prevádzka so zníženou výrobou energie. (je potrebné zohľadniť nevyvážené sily)

Nevýhody[12,13]:

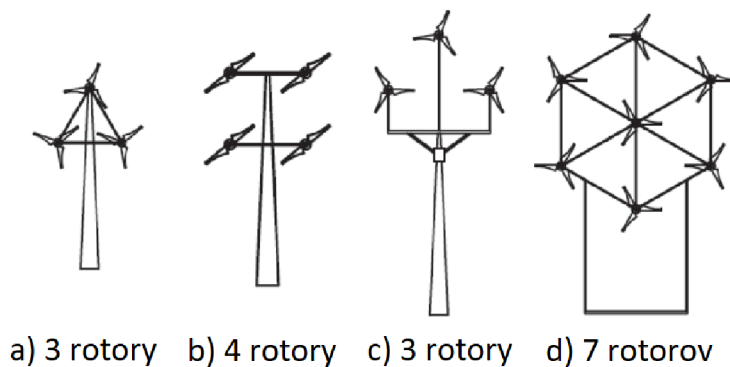
- Celková váha stĺpu a podpornej konštrukcie je porovnateľná resp. väčšia ako u veternej elektrárne s jedným rotorom. Konštrukcia veže multirotorovej elektrárne spolu s podporným rámom spôsobí zvýšenie hmotnosti na vrchole veže.
- Viacrotorový systém je zložitejší.
- Nie je dostatok výskumu a skutočne postavených modelov resp. realizovaných projektov. Tento koncept nie je dostatočne otestovaný v praxi. Na analýzu výkonnosti je potrebný ďalší výskum multirotorových veterných turbín z hľadiska ich použiteľnosti.

1.1 Konštrukcia

Pri návrhu konštrukcie je prvoradé určiť špecifikácie a požiadavky veternej turbíny vrátane požadovaného výkonu, veľkosti rotora a počtu rotorov. Nasleduje výber modelu rotora, vhodných materiálov pre rám a výber ostatných komponentov. Taktiež je potrebné brať do úvahy miesto a podmienky prostredia, kde bude veterná turbína nainštalovaná.

Rotor

Pri návrhu jednorotorovej veternej elektrárne je jedna z najdôležitejších vecí návrh rotora. Pri konštrukcii multirotorovej elektrárne sú použité už existujúce rotory. To znamená, že gondola, hlavné ložisko (prírubové), prevodovka, brzda a generátor sa nenavrhujú nanovo. Je potrebné vybrať typ rotora tak, aby čo najefektívnejšie zachytával veternú energiu. Pri výbere vhodných rotorov je taktiež potrebné dbať na to, aby bol cenovo výhodný, resp. ekonomický.[7,14] Taktiež je dôležité premyslieť počet a rozmiestnenie rotorov, vid' obr. 1.10. Od počtu rotorov závisí celková váha ktorú musí konštrukcia uniesť, zložitosť konštrukcie, cena a rozmiestnenie káblov. Počet ramien taktiež limituje aj uhol náklonu. Čím je konštrukcia ťažšia tým je potrebné vybudovať pevnejšiu základňu.



Obr. 1.10 Počet a umiestnenie [15] (upravené)

Veža

Konštrukcia veterných elektrární s viacerými rotormi zahŕňa návrh a výstavbu konštrukcie veže, ktorá je schopná niesť viacero rotorov a jednotiek na výrobu energie. Taktiež musí byť dostatočne vysoká aby bol dosiahnutý požadovaný výkon. Komplikovanosť konštrukcie závisí prevažne na počte rotorov, vid' obr. 1.10. Návrh takejto veže je oveľa zložitejši než pri jednorotorových elektrárnach. Hlavným problémom je kompenzácia síl ktoré pôsobia na ramená. Taktiež je potrebné vyriešiť zvýšenie hmotnosti na vrchole veže.

Konštrukcia môže mať podobu mriežky, čím sa zníži hmotnosť a náklady a potenciálne sa zvýši stabilita. [16,17] Na obrázku 1.11 je zobrazený jeden z návrhov takejto konštrukcie, s výkonom 12 MW. Takýto návrh je možné považovať za až príliš komplikovaný. Je diskutabilné, či zložitosť takejto veže nepreváži nad jej výhodami ak by sa takýto projekt realizoval.

Každopádne, veža multirotorovej elektrárne vyžaduje viac dielov a je komplikovanejšia ako veža pre jeden rotor. To je jedna z nevýhod tohoto konceptu. Zavedenie bezpečnostných prvkov, ako sú brzdy alebo systémy navijania, ktoré chránia veternú turbínu v podmienkach silného vetra je tiež komplikovanejšie. Je potrebné zabezpečiť, aby bola veterná turbína riadne uzemnená, aby sa predišlo elektrickým rizikám. Taktiež musí byť dostatočne pevná aby odolala nepriaznivým podmienkam.



Obr. 1.11 Mriežková veža s výkonom 12 MW [16]



Obr. 1.12 Konštrukcia veže Vestas 4R-V29 [18]

1.2 Ekonomika

Náklady na multirotorové veterné turbíny ovplyvňuje niekoľko faktorov vrátane konštrukcie veže, počtu a veľkosti rotorov.

- Viacero rotorov môže potenciálne účinnejšie zachytávať veternú energiu pri rôznych rýchlostiach a smeroch vetra. To vedie k vyššej produkcii energie, čím by sa zvýšila ekonomická životaschopnosť tejto technológie.[19]
- Multirotorové turbíny môžu vyžadovať menšiu zastavanú plochu v porovnaní s jednorotorovými turbínami na rovnaké množstvo vyrobenej energie. Vďaka tomu by mohli byť vhodné pre lokality s obmedzenou dostupnou plochou. [19]
- Údržba multirotorových turbín sa môže líšiť od tradičných turbín, čo bude mať vplyv na prevádzkové náklady. Zložitosť údržby viacerých rotorov a súvisiacich komponentov je potrebné dôkladne zvážiť.[17]

Lopatky rotoru, ložiská, prevodovka, systém riadenia sklonu, gondola, stĺp, základy atď. sú časti veternej elektrárne u ktorých môžeme porovnať náklady pri jednorotorovom a viacrotorovom prevedení. Záleží od návrhu, ale je možné skonštatovať že vo väčšine prípadov [1,12] bude cena komponentov (okrem veže) nižšia pri použití viacerých rotorov ako pri porovnateľnej jednorotorovej veternej elektrárni.

Podľa modelov v [20] je možné za optimálnych podmienok znížiť cenu použitím viacerých rotorov. Cena štyroch 5 MW rotorov je približne o 80 % menšia než cena jedného 20 MW rotoru. Teoreticky je možné znížiť túto cenu o 89 % pri použití väčšieho množstva rotorov. Avšak tieto výsledky podliehajú mnohým predpokladom a autor práce uvádza, že je potrebný ďalší výskum v danej oblasti. [20]

K podobným výsledkom sa dopracovali aj autori v práci [21]. Publikácia taktiež tvrdí, že štandardizácia výroby a inštalácie môže viesť k zníženiu nákladov na multirotorové elektrárne. Ďalšie zníženie nákladov je dosiahnuteľné použitím mriežkových veží. Podľa štúdie [1] by cena multirotorovej veternej elektrárne bola 83% z ceny ekvivalentnej jednorotorovej veternej elektrárne. Táto práca sa zameriava na jeden konkrétny prípad a určite je potrebná ďalšia analýza. Hlavne sú potrebné skutočné projekty aby bolo možné s istotou povedať o koľko je multirotorové riešenie lacnejšie, ak vôbec.

Podľa zdroja [22] sa predpokladá, že veľkosť globálneho trhu s viacrotorovými veternými turbínami dosiahne do roku 2026 hodnotu 12,1 miliardy USD a počas prognózovaného obdobia 2021 - 2026 bude zložená ročná miera rastu 6,3 %. Toto tvrdenie môžeme považovať za veľmi optimistický pohľad, keďže v súčasnej dobe nie je o takýto koncept veľký záujem. Pre porovnanie, hodnota investícií do celkovej veternej energie vo svete v roku 2022 bola 174,46 miliardy USD. [23]

V Českej republike sa nenachádza žiaden výrobca rotoru alebo gondoly. Avšak, nachádza sa tu výrobca tubusov pre veterné elektrárne, SIAG CZ. Jedná sa o nemeckú firmu s českou pobočkou v Chrudimi, pri Pardubiciach. [24,25] Ak by došlo k realizácii multirotorového projektu v ČR, je potrebné väčšinu komponentov doviešť zo zahraničia, čo by malo za následok zvýšenie nákladov.

Úspech multirotorových veterných turbín bude ovplyvnený aj konkurenčným prostredím na trhu s obnoviteľnou energiou. Budú konkurovať zavedeným technológiám, ako sú veterné turbíny s jedným rotorom, solárna energia a iné nové riešenia v oblasti obnoviteľných zdrojov energie.

1.3 Teória

Existuje niekoľko parametrov ktoré ovplyvňujú umiestnenie, konštrukciu a výkon veternej elektrárne. Podľa nich vieme vypočítať koľko energie je možné vyrobiť a či je ekonomicky výhodné vybudovať v danej lokalite veternú elektrárň. Tieto parametre platia ako pre vetrené elektrárne s jedným rotorom tak aj pre veterné elektrárne s viacerými rotormi.

Prvým z týchto parametrov je rýchlosť vetra. Pokiaľ je známa rýchlosť vetra v smere osy turbíny je možné vypočítať výkon veternej elektrárne. Pre určenie rýchlosti vetra v určitej

lokalite, je potrebné vykonať meranie pre konkrétnu výšku počas trvania aspoň jeden rok. Ak je to možné, tak sú údaje o rýchlosti vetra získavané z najbližšej meteorostanice. Tie merajú rýchlosť vetra vo výške 10 metrov. Minimálna požadovaná rýchlosť vetra má väčšinou hodnotu 4 m/s.

Elektrárň s viacerými rotormi bude vyžadovať merania v rôznych výškach, resp. vo výškach pre osy jednotlivých rotorov. Počet výšok v ktorých bude meranie vykonané závisí na usporiadaní rotorov vid' obr. 1.10. Tento krok je potrebné vykonať hlavne z toho dôvodu, že rýchlosť vetra je závislá na vzdialenosti od povrchu zeme. Teoreticky, ak je známa rýchlosť aspoň v jednej výške tak je pomocou rovnice 1.1 možné ďalšie rýchlosti s určitou presnosťou vypočítať. Rýchlosť tiež závisí na koeficiente drsnosti zemského povrchu a , ktorý nadobúda hodnoty 0,14-0,48. [1,26]

$$V_{Z2} = V_{Z1} \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^a \quad (1.1)$$

V_{Z2} - rýchlosť vetra v požadovanej výške Z_2 ($m \cdot s^{-1}$)

V_{Z1} - rýchlosť nameraná vo výške Z_1 ($m \cdot s^{-1}$)

a - koeficient drsnosti zemského povrchu (tabuľková hodnota)

Tabuľka 1.1 Koeficient drsnosti povrchu

Druh povrchu	a
Hladký povrch – vodná hladina, piesok	0,14
Lúka s nízkym trávňatým porastom alebo ornice	0,16
Vysoká tráva, nízke obilniny	0,18
Porasty vysokých kultúrnych plodín, nízke lesy	0,21
Lesy	0,28
Dediny, malé mestá	0,48

Ak je známa rýchlosť vetra je možné určiť energiu vetra:

$$E_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (1.2)$$

R - priemer rotoru (m)

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

v - rýchlosť vzduchu v danej výške ($m \cdot s^{-1}$)

Výkonový súčiniteľ C_p vyjadruje pomer výkonu preneseného na turbínu a kinetického výkonu vetra E_v prúdiaceho rovnakou plochou ako je opísaná plocha rotoru. Tento súčiniteľ je odlišný pre jednotlivé modely veterných elektrární.

Betzovo pravidlo udáva aké maximálne množstvo elektrickej energie je možné získať z energie vetra. Jeho hodnota je vyjadrená pomocou C_p , ktorý nadobúda maximálnej hodnoty 16/27. Pomocou veterného motoru je teda možné odobrať maximálne 59,3% energie vetra. [27]

$$C_p = \frac{P_i}{E_v} \quad (1.3)$$

P_i - výkon prenesený na turbínu (kWh)

E_v - kinetický výkon vetra (kWh)

Taktiež je potrebné započítať celkovú účinnosť η , ktorá predstavuje kombinovanú účinnosť hnacieho ústrojenstva a generátora. Výkon veternej elektrárne je potom:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \eta \quad (1.4)$$

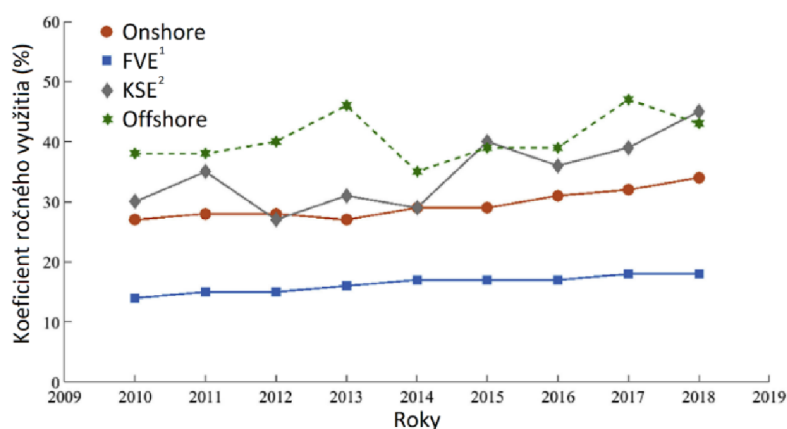
Náporový súčiniteľ C_T (-) vyjadruje pomer sily pôsobiacej na rotor v smere osy otáčania T (N) a súčinu dynamického tlaku vetru p_d (Pa) a opísanej plochy rotoru A_s (m²).

$$C_T = \frac{T}{p_d A_s} \quad (1.5)$$

Ďalším dôležitým parametrom pre návrh veternej elektrárne je koeficient ročného využitia. Udáva koľko percent z inštalovaného výkonu je vyžité počas celého roku. Tento koeficient je veľmi závislý na geografických podmienkach. Jeho priemerná globálna hodnota sa na pevnine pohybuje okolo 30 %. Avšak na jednotlivých kontinentoch je tento koeficient odlišný, a to z dôvodu rozdielných poveternostných podmienok. Pre veterné elektrárne v USA dosahuje hodnoty od 21 % do 52 % a v priemere dosahuje 35 % na pevnine.[28] Pri hodnotách nad 40 % sa považujú za veľmi účinné. Pre veterné elektrárne nachádzajúce sa v mori je táto hodnota ešte vyššia, ale je vyššia aj jej fluktuácia, vid' graf nižšie. Ten znázorňuje globálny koeficient pre jednotlivé obnoviteľné zdroje v rokoch 2009 až 2019. Je možné dosiahnuť koeficient ročného využitia s hodnotou až 65 % (elektrárneň Hywind, Škótsko). [29] Avšak, táto hodnota je ojedinelý prípad.

$$C_f = \frac{E_e}{P_{inst} \cdot t_r} \quad (1.6)$$

E_e - množstvo energie vyrobenej za rok (kWh), P_{inst} - inštalovaný výkon (kW), t_r - počet hodín v roku (8760 hodín)

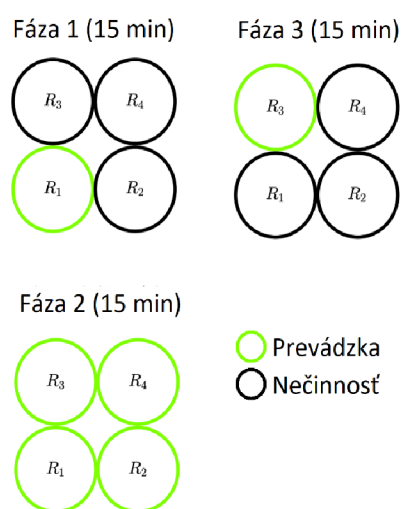


Obr. 1.13 Koeficient ročného využitia [30] (upravené)

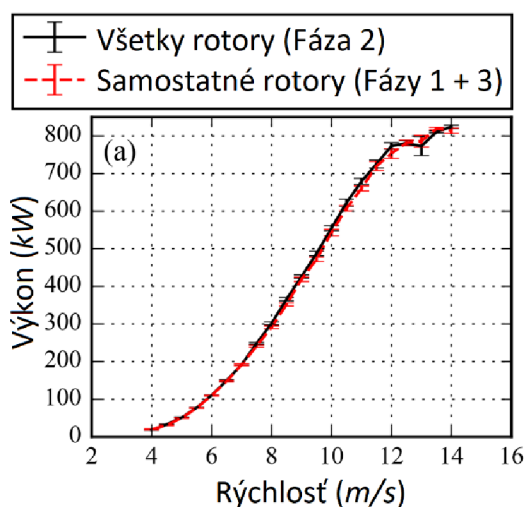
1-Fotovoltaické solárne elektrárne

2-Koncentrovaná solárna energia - Zrkadlový zberač slnečnej energie

Výkonová krivka popisuje aký výkon dosahuje veterná elektrárň pri rôznych rýchlostiach vetra. Ako ukazuje práca [7], pre viac rotorov je táto krivka podobná ako pri jednom rotore. Práca popisuje výkonovú krivku práve pre Vestas 4R-V29 v Dánsku. Meranie prebiehalo tak že sa najprv meral výkon na rotoroch v rôznych výškach samostatne, teda ako je vidno vo fáze 1 a 3, a následne sa sčítal a vynásobil dvoma. V ďalšom meraní pracovali všetky rotory súčasne, teda fáza 2. Dĺžka jednotlivých fáz merania bola 15 minút. Následne bol tento interval upravený na 10 minút, odstránením doby nábehu a odstávky medzi jednotlivými fázami. Merania, trvajúce 92 hodín, ukazujú že interakcia rotorov vo fáze 2 má za následok zvýšenie výkonu o 1,8 %, čo môže mať za následok zvýšenie ročnej výroby energie o 1,5 %. Nejedná sa teda o drastický nárast výkonu ale 1,5 % nie je v energetike zanedbateľný výsledok. Práca bola vypracovaná dôkladne, ale na overenie nameraných hodnôt je potrebné vypracovať ďalšie štúdie skúmajúce parametre multirotorových elektrární.



Obr. 1.14 Fázy [7] (upravené)



Obr. 1.15 Výkonová krivka [7] (upravené)

1.4 Logistika

Preprava veterných turbín je jedným z kľúčových aspektov odvetvia veternej energie. S rastúcim priemerom rotorov a zväčšovaním stĺpu nastáva niekoľko problémov ktoré je možné minimalizovať použitím multirotorového konceptu. Pri veľkých rozmeroch je preprava zložitá a vyžaduje intenzívne plánovanie a prípravu. Sú potrebné povolenia, sprievodné vozidlá atď. [31]

Použitím menších komponentov sme schopný vybudovať veterné elektrárne na miestach, kde by to inak nebolo možné. Dostupnosť týchto miest je obmedzená úzkymi cestami, tunelmi, prípadne častými zákrutami. Hmotnostné limity na cestách, taktiež, predstavujú problém. Tieto obmedzenia limitujú maximálnu dĺžku lopatiek, ktoré možno prepravovať po cestách na 53 až 62 m v závislosti od konštrukčných vlastností lopatky, ako napr. veľkosť natočenia a profil lopatky. Avšak, mnohé cesty umožňujú prevoz len značne menších lopatiek. Transport jednotlivých častí veže s veľkým priemerom predstavuje rovnaký problém. [32]

Ďalším problémom je to, že nie všetky spoločnosti prepravujúce nadrozmerné náklady majú dostatočné vybavenie. Lopatky nie je možné prepravovať na bežných prívesoch, je potrebné použiť špecializované prívesy. [31] Na prepravu tubusu sa používajú prívesy typu Schnabel. [33]



Obr. 1.16 Schnabel prives [33]



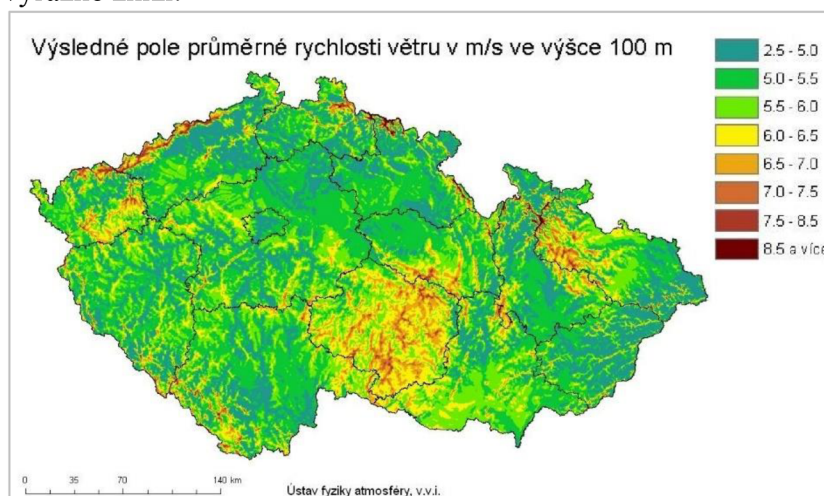
Obr. 1.17 Preprava lopatiek [34]

Multirotorové veterné elektrárne sú zložené z komponentov, ktoré sú väčšinou rozmerovo menšie ako pri jednorotorových elektrárňach s porovnateľným výkonom. Niekoľkonásobne sa zmenší dĺžka lopatiek avšak ich počet vzrastie. Navýšený počet dielov často nepredstavuje problém a to z dôvodu, že je jednoduchšie prepraviť viac menších častí ako menej veľkých častí. Pre transport predstavujú rozmery väčší problém ako počet dielov. Avšak, táto skutočnosť môže negatívne ovplyvniť dobu, ktorá je potrebná na prepravu všetkých komponentov.[31]

2 Analýza využitelnosti multirotorových větrných turbín v České republice

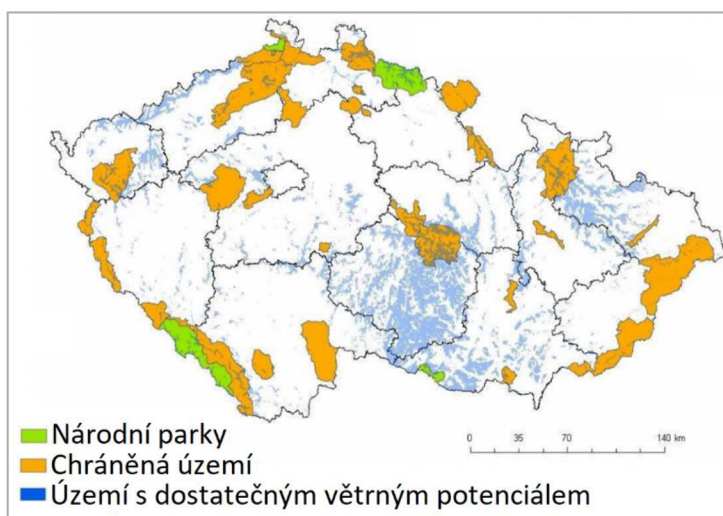
Základem pro návrh větrné elektrárny, s jedním nebo více rotory, je výběr správné lokality. Nejvhodnější místa na jejich umístění jsou přímořské a horské oblasti, resp. oblasti s dostatečnou rychlostí větru. Když v ČR nejsou přímořské oblasti tak oblastí zájmu této kapitoly budou horské lokality.

Merania rychlosti větru, kterých výsledky jsou vyznačeny na mapě níže, jsou z roku 2009. Je diskutabilné, na kolik jsou stále aktuální. Novší verze mapy k dnešnímu dni neexistuje. Pro ilustračné účely je ale tato mapa dostačující. Z mapy se zdá, že ČR má velkou lokalit, které disponují požadovanou rychlostí větru (≥ 4 m/s). Avšak, tato mapa je vytvořena pro výšku 100 metrů a ne všechny větrné elektrárny mohou dosahovat takové výšky. Tím se počet vhodných lokalit výrazně sníží.



Obr. 2.1 Větrná mapa ČR v 100 metroch [35]

Horské oblasti často patří pod národní parky nebo chráněná území s různými úrovněmi ochrany vid' obr. 2.2. Taktéž je potřebné zohlednit letecké koridory a vojenské oblasti. Právě tato skutečnost, spolu s dostatečnou rychlostí větru, je značným limitujícím faktorem. Toto jsou jen omezení týkající se polohy.



Obr. 2.2 Mapa NP a CHO [36] (upravené)

Āalšie problémy sŭ spojené s vyvedením elektrického výkonu, vzdialenosťou od obytných častí (hluĀnosť) a prístup k vybraným lokalitám. Práve tento posledný problém je možné aspoň čiastoĀne vyriešiť použitím multirotorového konceptu viď kapitola 1.4. Keď vezmeme do ũvahy všetky tieto obmedzenia zostane len urĀitě množstvo miest kde je možné takŭto elektrárne postaviť.

2.1 Podmienky pre umiestnenie multirotorovej elektrárne

Pri výbere lokality postupujeme rovnako ako u veternej elektrárne (VtE) s jedným rotorom len s menšími rozdielmi. Faktory ovplyvňujúce voľbu lokality sŭ: dostatoĀná rýĀlosť vetra, dostupnosť resp. nedostupnosť lokality, pripojenie do rozvodnej siete (Āi sŭ v danej oblasti ũ VtE postavené).

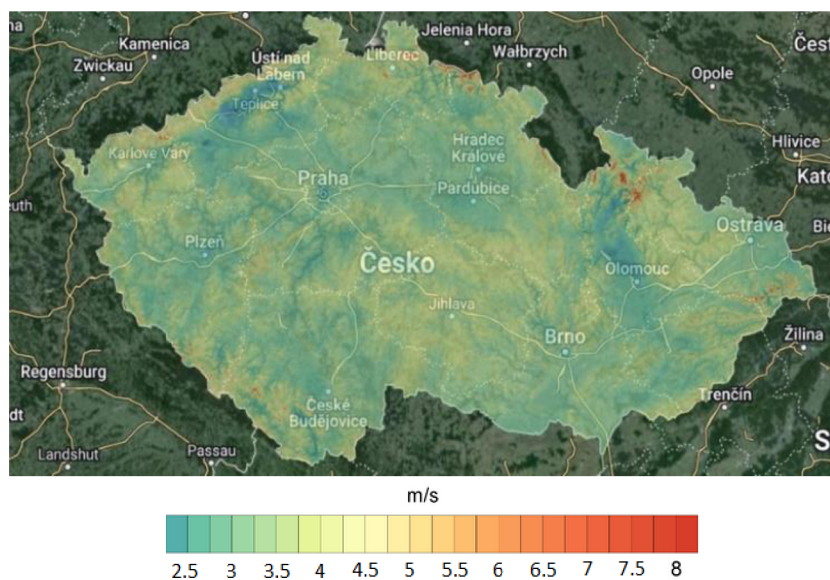
Cieľom tejto práce je hlavne predstaviť viacrotorový koncept v ĀR. Preto sa niektorým kritériám venuje do menšej miery ako iným. Ak by sa jednalo o skutoĀný stavebný zámern, bolo by potrebné vziať do ũvahy všetky nasledujúce poŭiadavky, resp. posŭdiť jednotlivě kritériá.

- **RýĀlosť vetra:** Hlavným kritériom je nájsť takŭ lokalitu v ktorej bude rýĀlosť vetra dostaĀujúca. Obvykle sa za minimálnu hranicu považuje rýĀlosť 4 m/s. Zatiaľ Āo rýĀlosť odstavenia býva 25 m/s. RýĀlosť priamo ovplyvňuje výkon elektrárne, viď kapitola 1.3. NajĀastejšie je tento vplyv znázornený výkonovou krivkou. V prípade viacerých rotorov je potrebné merať rýĀlosti vo všetkých výškach v ktorých sa nachádzajú rotory.
- **Pozemok:** Bude hľadaná taká lokalita ktorá je ŀaĀie dostupná. Práve také lokality by najviac benefitovali z toho, Źe sa multirotorová elektrárne skladá z viacerých menších častí. Cieľom je maximalizovanie vyrobenej energie bez nutnosti prenášať veľmi veľké sŭĀiastky. Vo vybranej lokalite je potrebné zaistiť:
 - odvod vyrobenej energie resp. pripojenie do rozvodnej siete
 - dostatoĀnú vzdialenosť od ciest a obydľi
 - vhodné podloŹie
 - sŭhlas majiteľa pozemku.
 - prístup k pozemku z dôvodu stavby ale aj pre beŹnú ũdržbu a prípadné opravyTaktieŹ je potrebné vyberať pozemok s ohľadom na NP, ĀHKO.
- **Schvalovaci proces:** Zaistenie poŹadovaných povolení je jedným z hlavných problémov pre výstavbu veternej elektrárne pretože celý proces je zdľhavý. Doba od zámernu stavby cez vybavovanie povolení, stavbu a skŭšobnú prevádzku (v dobe písania) práce trvá 4 až 8 rokov, v závislosti na lokalite a zriadení všetkých povolení. [37] Je ale iniciatíva tento proces znaĀne urýĀliť. [38]
KeďŹe multirotorová elektrárne je len koncept, v súčasnosti neexistuje dokument ktorý by túto problematiku na takŭto konštrukciu aplikoval. Ale je možné predpokladať, Źe proces by sa veľmi nelíšil od procesu ako pri jednom rotore.
- **Ekonomika:** Multirotorová elektrárne má potenciálne nižšiu cenu ako v porovnaní s jednorotorovou. Avšak, stále je potrebné brať do ũvahy dobu návratnosti, poĀiatocné náklady, cenu ũdržby a prenosu komponentov. V skratke, je potrebné zaistiť aby bol projekt výnosný. Všetky tieto faktory sŭ ovplyvniteľné výberom lokality.

- **Vplyv na životné prostredie:** Jednou s hlavných výhod veternej energie je absencia odpadných látok pri samotnej výrobe energie. Hlavnou emisiou je hluk ktorý vzniká obtekaním vzduchu okolo lopatiek, gondoly a stĺpu. Jedná sa o aerodynamický hluk. Mechanické časti veternej elektrárne taktiež produkujú hluk. Táto skutočnosť ovplyvňuje vzdialenosť od obydľí. Hluk je možné minimalizovať metódami odstraňovania hluku. [39] Ďalším parametrom je vizuálny vplyv na krajinu. A taktiež vplyv na zvieratá. Je oveľa lepšie ak sa veterná elektrárň postaví na mieste kde nie je potrebné odlesňovanie, ktoré má negatívny vplyv na krajinu a taktiež na cenu projektu.[40]

2.2 Výber lokality

Výborový proces vhodnej lokality započal skúmaním interaktívnej veternej mapy vo výške 10 metrov, ktorá bola vytvorená Ústavom fyziky atmosféry AV ČR [41]. Umožňuje zobrazíť priemernú rýchlosť a smer vetra pre celú oblasť ČR. Je potrebné povedať, že táto mapa neslúži na určenie konečnej rýchlosti vetra keďže poveternostné podmienky sa značne líšia oproti tým v ktorých budú umiestnené rotory.



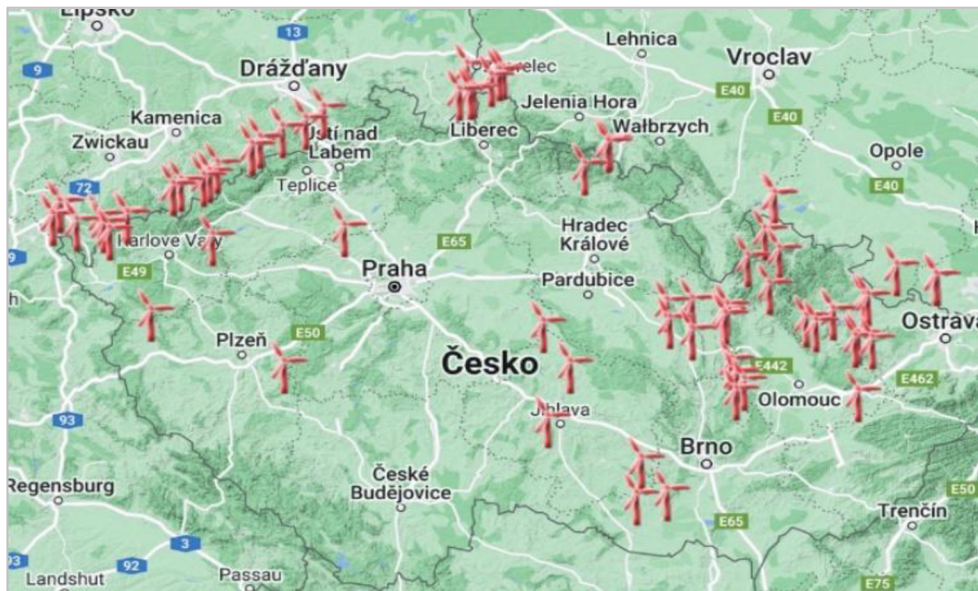
Obr. 2.3 Veterná mapa ČR v 10 metroch [41]

Táto mapa bola použitá pre približné identifikovanie vhodných lokalít. Nasledovalo eliminovanie miest ktoré patria pod národné parky alebo chránené oblasti, viď obr. 30. Sú to väčšinou miesta s vyššou nadmorskou výškou (vyššou rýchlosťou vetra) a horšou dostupnosťou. To robí tieto miesta ideálnym kandidátom pre multirotorové elektrárne. Avšak, nie je možné ich použiť.

Taktiež bola braná do úvahy doprava jednotlivých komponentov do vybranej lokality. Cieľom bolo nájsť takú lokalitu, do ktorej by bolo možné dopraviť lopatky rotora o predpokladanej dĺžke približne 20 metrov. Zároveň aby do tejto lokality nebolo možné dopraviť dlhšie lopatky napr. 25 metrov. Nedávalo by zmysel budovať multirotorovú elektrárň ak je v danej lokalite možné vybudovať elektrárň s jedným rotorom s rovnakým výkonom.

V miestach kde je vysoká rýchlosť vetra sú už veterné elektrárne často postavené. Táto skutočnosť eliminovala niektoré miesta s veľkou rýchlosťou vetra.

Pre zúženie možností bola použitá mapa ĀSVE zobrazujúca aktuálne inštalované vetrené elektrárne [42]. Na nej boli hľadané už zastaralé veterné elektrárne (s výkonom do 500 kW) v oblastiach kde nie je možné postaviť veterné elektrárne s väčším rotorom resp. s väčším výkonom. Tento krok nám zúžil výber na pár lokalít.



Obr. 2.4 Mapa inštalovaných VtE [43]

Nakoniec bola vybraná lokalita pri hore Klínovec. Fakt, že 3 kilometre od danej lokality už existujú VtE (Loučná, Boží Dar) nám taktiež pomáha v tom že je tam zavedená distribučná sieť pre zapojenie elektrárne a taktiež môžeme predpokladať že obyvatelia sú už zvyknutí na prítomnosť VtE. Vybraná lokalita však vyžaduje čiastočné odlesnenie.



 Meteorologická stanica Klínovec  Lokalita multirotorovej veternej elektarne

Obr. 2.5 Poloha navrhovanej multirotorovej VtE [44] (upravené)

Tabuľka 2.1 Základné informácie o pozemku z katastra nehmuteľností [45]

Číslo parcely	943
Obec	Loučná pod Klínovcem
Katastrálne územie	Háj u Loučné pod Klínovcem
Výmera [m ²]	604223
Vlastník	Česká republika

2.3 Poveternostné podmienky

Pre získanie čo najpresnejších hodnôt poveternostných podmienok v danej lokalite je potrebné vykonať stožiarové meteorologické meranie. Aby sa zamedzil negatívny dopad blízkych prekážok a neistota pri prepočte rýchlosti vetra z výšky merania na výšku rotoru resp. rotorov, je žiadúce aby sa meranie vykonalo v čo najvyššej výške od povrchu. [46] Takéto meranie je potrebné vykonať v dĺžke aspoň jeden rok. Pre potreby tejto práce je takéto meranie finančne a časovo náročné. Keďže táto práca predstavuje koncept a nie projekt ktorý sa bude skutočne realizovať, bolo rozhodnuté že potrebné dáta budú získané inou formou. Bol kontaktovaný Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), so žiadosťou o zaslanie modelových dát.

ČHMÚ používa pre modelovanie poveternostných podmienok určitej lokality počítačový program WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) resp. program WEng (WAsP Engineering). WAsP sa používa prevažne na výpočty predpokladaných poveternostných údajov a dosiahnuteľnej energie vetra. Tato metóda spočíva v meraní rýchlosti a smeru vetra na meteorologickej stanici po dobu aspoň jedného roku. Namerané údaje sú základné s ktorými metóda pracuje. Následne sú extrapolované do blízkeho okolia podľa drsnosti terénu, štruktúry krajiny alebo pôsobenia prekážok. S rastúcou vzdialenosťou sa zvyšuje chyba výpočtu. [47] K predpokladanému vývoju extrémnych hodnôt priemernej rýchlosti vetra, turbulencií a vertikálnych profilov vetra sa používa program WEng, ktorý je samostatný doplnok programu WAsP.

Avšak, po komunikácii so zamestnancami ČHMÚ bolo dôjdené k záveru, že pre potreby tejto práce je vytvorenie daných modelových podmienok drahé a taktiež momentálne (27.1.2024) nemal ústav z dôvodu vyťaženia dostatok času na spracovanie takejto požiadavky. Boli sme zamestnancami odkázaní na verejne dostupné dáta na webovej stránke ČHMÚ. [48] Nachádzajú sa tam dáta z meteorologických staníc v ČR. Je možné získať informácie o priemernej rýchlosti vetra za deň, ktorá je meraná vo výške 10 metrov nad zemou. Merania prebiehajú v 7, 14 a 21 hodín a z nich je robený denný priemer. Keďže momentálne nie sú dostupné dáta lepšej kvality, budú použité tieto. Nasledovalo hľadanie najbližšej meteorologickej stanice k vybranej lokalite, čo predstavuje stanica Klínovec, vid' obr. 2.5. Tá je od vybranej lokality vzdialená približne 700 metrov.

Ako už bolo spomenuté, ideálne by sa počítalo s rýchlosťami vetra za celý rok meraných každú hodinu. Pri takomto meraní sa teda spracúva 8760 hodnôt. Keďže tieto dáta nie sú dostupné, bude sa pracovať s priemernými dennými rýchlosťami vetra. Aby sa zvýšila presnosť merania budú spracované rýchlosti, ktoré boli merané za posledných 10 rokov (1.1.2014 – 31.12.2023). To zvýši počet dát z 365 na 3652. Rýchlosti sú určené na jedno desatinné miesto, vid' tabuľka 2.2.

Tabulka 2.2 Ukázka dat od ČHMÚ a prepočítané rýchlosti

Rok	Mesiac	Deň	Rýchlosť	Rýchlosť	Rýchlosť
			v 10 m (m/s)	v 40 m (m/s)	v 70 m (m/s)
2014	1	1	5,7	8,4	9,8
2014	1	2	6,0	8,8	10,3
2014	1	3	9,3	13,7	16,0
2014	1	4	5,0	7,4	8,6
2014	1	5	5,3	7,8	9,1
2014	1	6	8,0	11,8	13,8
2014	1	7	8,0	11,8	13,8
2014	1	8	7,0	10,3	12,1

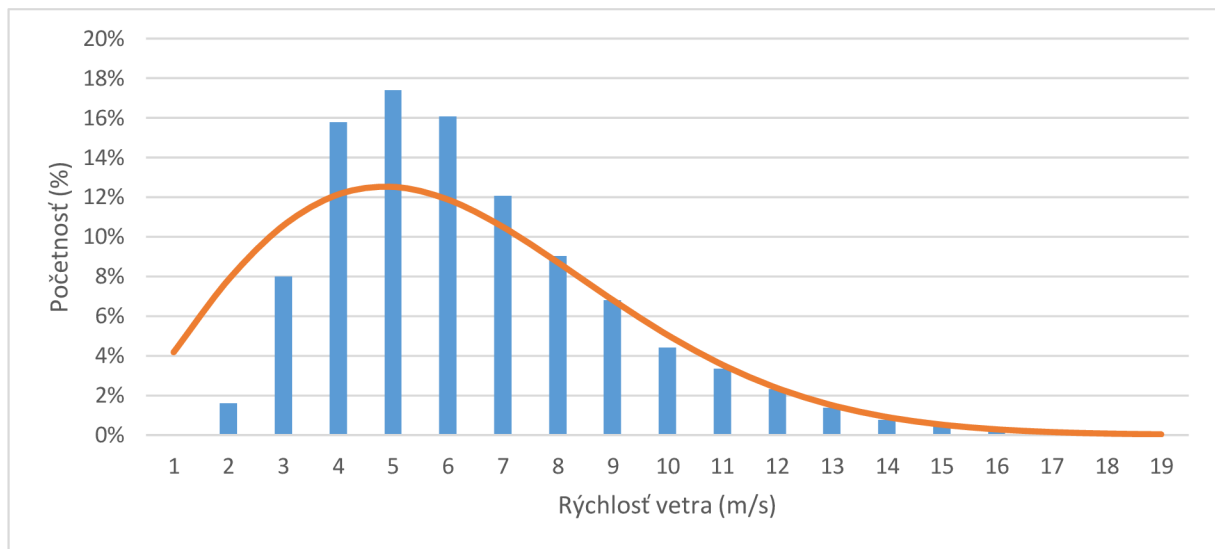
Rýchlosti vetra boli podľa vzorca 1.1 prepočítané do výšok v ktorých budú umiestnené rotory, teda 40 a 70 metrov. Pre koeficient drsnosti zemského povrchu α bola vybraná hodnota 0,28, teda hodnota pre lesy z tabuľky 1.1. Následne bola urobená početnosť rýchlostí pre jednotlivé výšky, viď tabuľky 2.3 a 2.4. Tieto dáta boli spracované do grafov.

Tabulka. 2.3 Početnosť rýchlostí v 40 metroch

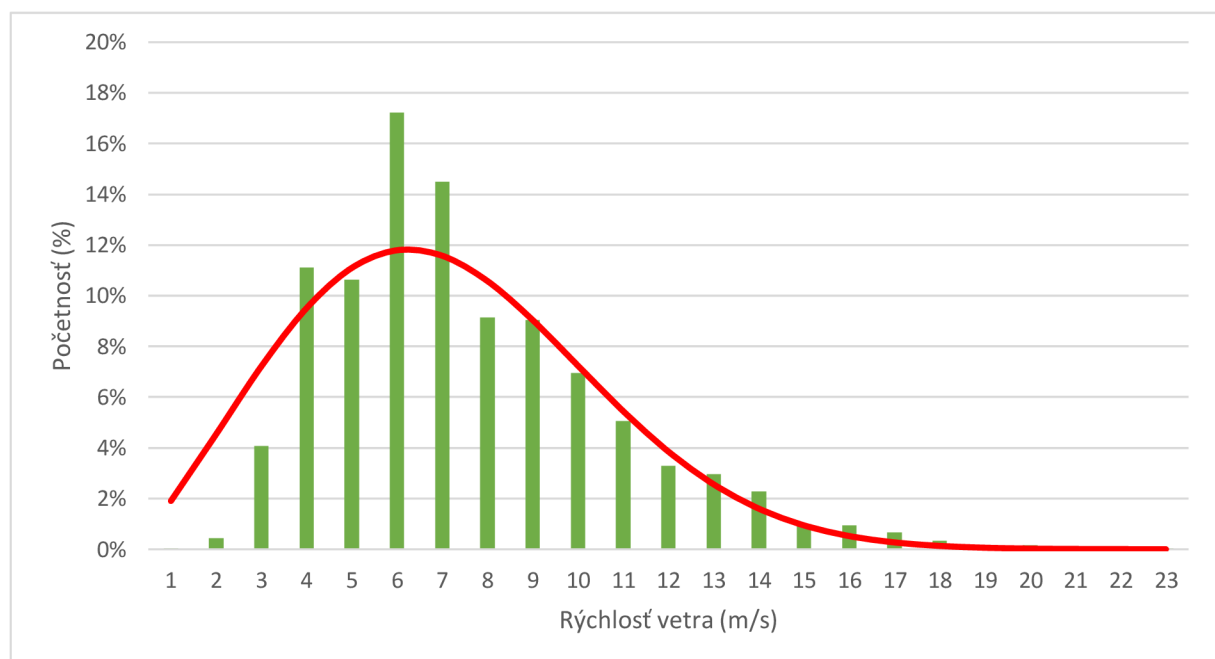
Rýchlosti (m/s)	Početnosť (-)	Početnosť (%)	Weibull (%)
1	1	0	4
2	57	2	8
3	285	8	11
4	562	16	12
5	620	17	13
6	572	16	12
7	430	12	11
8	322	9	9
9	242	7	7
10	157	4	5
11	119	3	4
12	83	2	2
13	49	1	2
14	27	1	1
15 \geq	36	1	1
Súčet	3652	100	100

Tabulka. 2.4 Početnosť rýchlostí v 70 metroch

Rýchlosti (m/s)	Početnosť (-)	Početnosť (%)	Weibull (%)
1	1	0	2
2	16	0	5
3	149	4	7
4	406	11	10
5	388	11	11
6	629	17	12
7	529	14	12
8	334	9	11
9	330	9	9
10	254	7	7
11	185	5	5
12	120	3	4
13	108	3	3
14	83	2	2
15	36	1	1
16	34	1	1
17	24	1	0
18 \geq	26	1	0
Súčet	3652	100	100



Obr. 2.6 Početnosť rýchlostí v 40 metroch



Obr. 2.7 Početnosť rýchlostí v 70 metroch

Pre overenie správneho spracovania údajov bola početnosť rýchlostí overená pomocou distribučnej funkcie. Pokiaľ je známa iba priemerná rýchlosť vetra za dlhší časový úsek, je tieto grafy možné nahradiť distribučnou funkciou. Bola vypracovaná distribučná funkcia pre priemernú rýchlosť za rok 2023, ale v tom prípade sa funkcia veľmi líšila od grafov. Preto bola použitá priemerná rýchlosť za 10 rokov. Ako distribučná funkcia bolo vybrané Weibullovo rozdelenie [49,50]:

$$f(x; k; \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (2.1)$$

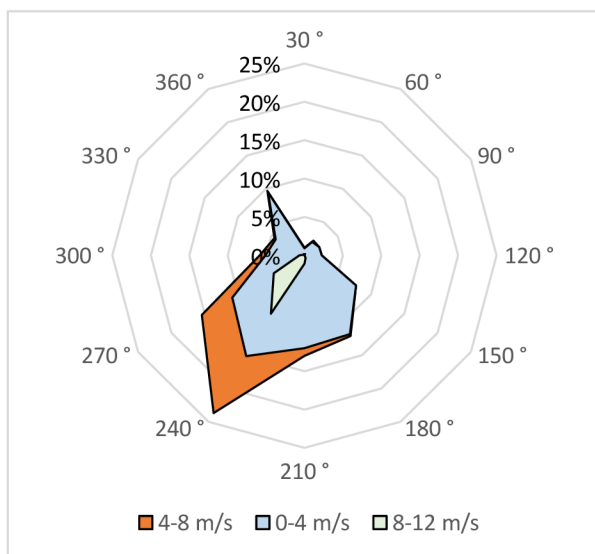
Pričom k (-) je parameter tvaru a musí platiť $k > 0$. Operátor λ (-) je mierka distribúcie a taktiež musí platiť $\lambda > 0$. Za operátor x (m/s) dosadzujeme priemernú rýchlosť.

Weibullova distribúcia súvisí s Rayleighovým rozdelením pravdepodobnosti, ktoré je veľmi podobné krivke početnosti rýchlostí. Pre toto rozdelenie platí $k = 2$ a operátor λ sa určí zo vzorca[49,50] :

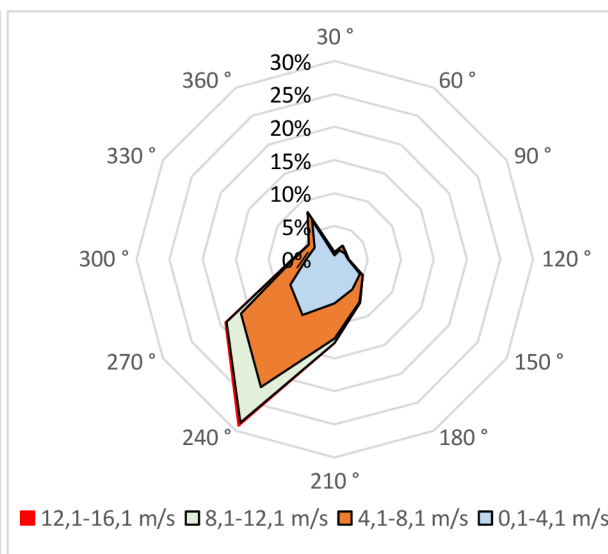
$$\lambda = \frac{x}{0,88} \quad (2.2)$$

Krivka Rayleighovho rozdelenia pre priemernú rýchlosť vetra pre vybranú lokalitu vo vybraných výškach je znázornená na obrázkoch 2.6 a 2.7. prípadne v tabuľkách 2.3 a 2.4.

V ďalšom kroku bol určený smer vetra pre vybranú lokalitu z dát získaných pomocou programu history+. Jedná sa o program ktorý ponúka okamžitý prístup do archívu globálnych simulácií počasia meteoblue [51]. Je voľne dostupný. Dáta predstavovali smer vetra v danej lokalite v hodinových intervaloch počas roka 2023 vo výškach 10 a 100 metrov. Nasledovalo spracovanie týchto údajov v programe Excel do kontingenčnej tabuľky. Následne boli vytvorené radové grafy resp. veterné ružice lokality. Tie znázorňujú početnosť jednotlivých smerov vetra. Pre lepšiu prehľadnosť boli uhly rozdelené do intervalov po 30°. Je vidieť, že v oboch výškach najväčšie množstvo vetra prúdi pod uhlom 240. Jedná sa teda o prevládajúci smer vetra. Táto informácia je kľúčová pre správne umiestnenie veternej elektrárne.



Obr. 2.8 Veterná ružica pre 10 m



Obr. 2.9 Veterná ružica pre 100 m

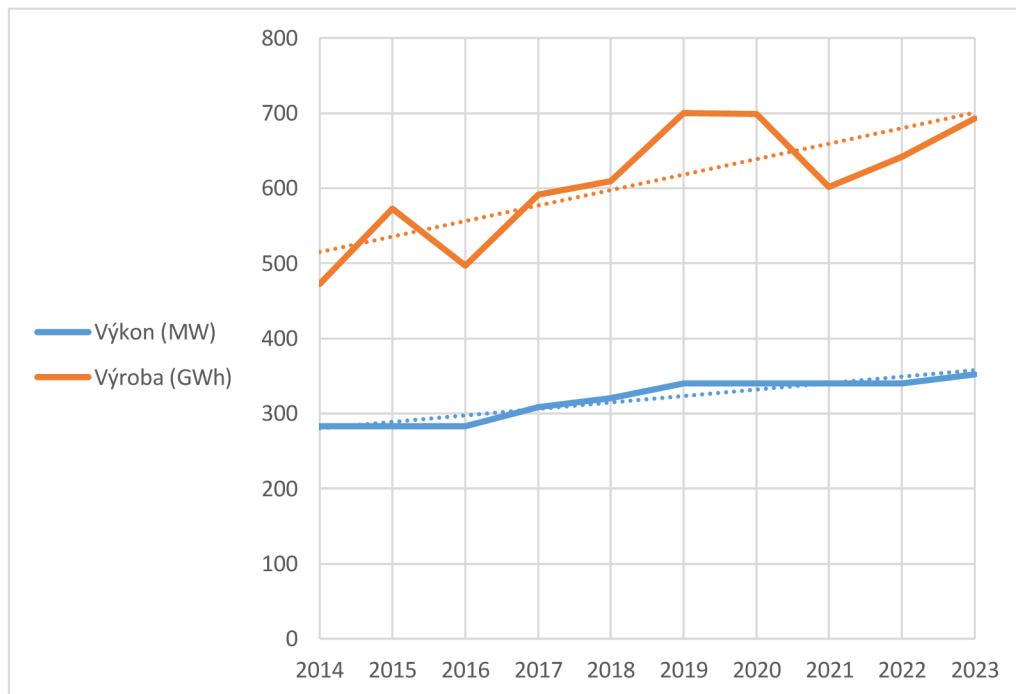
Po porovnaní dát rýchlosti vetra z iných meteorologických staníc je možné skonštatovať, že vybraná lokalita má jednu z najvyšších rýchlostí vetra v ČR. Teda ak sa neuvažujú miesta v chránených oblastiach. Pre výšku 40 metrov je najčastejšia rýchlosť 5 m/s a množstvo rýchlostí nad 4 m/s predstavuje 75 %. Pre výšku 70 metrov je najčastejšia rýchlosť 6 m/s a množstvo rýchlostí nad 4 m/s predstavuje 86 %.

3 Výber modelu rotoru

Ďalším krokom bude hľadanie vhodných modelov turbín. Bude popísaná situácia s veternými elektrárnami v ČR, uvedenie kritérií výberu jednotlivých modelov turbín a následný popis vybraných modelov. Jedná sa o prvý krok pri návrhu viacrotorovej veternej turbíny na základe dostupných komponentov jednorotorových elektrární.

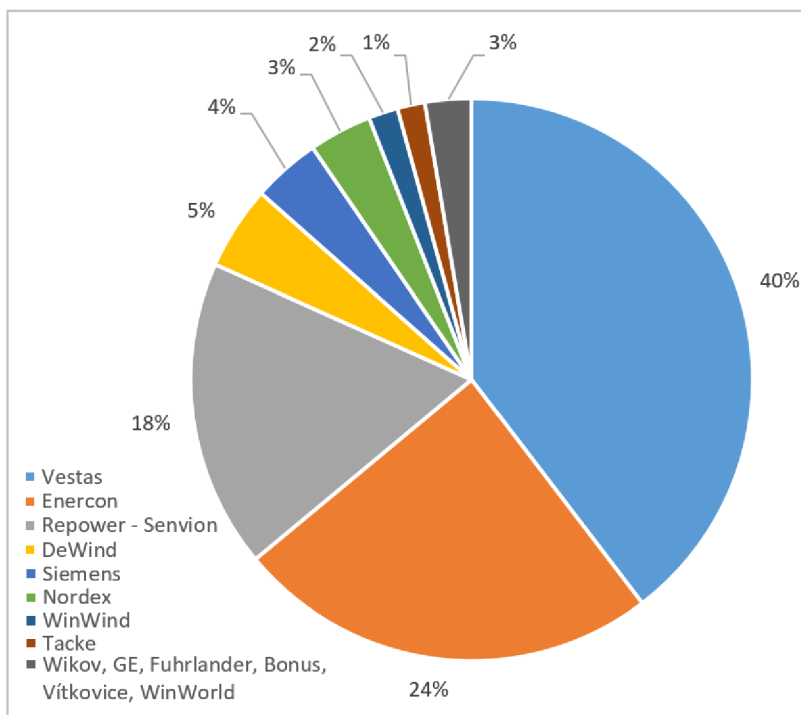
3.1 Popis situácie veterných elektrární v ČR

Podľa Českého štatistického úradu bolo v roku 2022 v ČR vyrobených 84848 GWh z čoho VtE vyprodukovali 641 GWh. To predstavuje 0,8 %. Oproti solárnym alebo vodným elektrárnam to predstavuje asi štvrtinu. [52] V posledných rokoch sa obnoviteľné zdroje stávajú jedným z hlavných trendov v energetike. S tým je spojené aj zvyšovanie množstva VtE. Z obrázku 3.1 je vidieť, že trendová spojnica pre výkon aj pre výrobu energie v rokoch narastá a je možné predpokladať, že tento trend bude pokračovať aj v nasledujúcich rokoch.



Obr. 3.1 Inštalovaný výkon a výroba v rokoch 2014-2023 [53]

Z grafu na obrázku 3.2 vyplýva že najviac energie z vetra produkujú VtE od značky Vestas. Tá ponúka rozsiahlu škálu turbín s rôznymi výkonmi. [54] V ČR sa nachádza Vestas V25 s výkonom 225 kW a taktiež Vestas V112 s výkonom 3000 kW. Z toho dôvodu bude Vestas jednou zo značiek z ktorých sa bude voliť vhodná turbína. Druhou najčastejšou značkou je Enercon. Od tejto značky bude taktiež vybraná turbína keďže chceme vidieť ako bude multirotorový koncept fungovať pre značky odlišné od Vestas. Je potrebné povedať že výber modelu turbíny nie je až tak dôležitý keďže tento koncept je uplatniteľný pre širokú škálu modelov. V súčasnej dobe neexistujú nariadenia alebo príručka ktorá by obmedzovala výber turbín pre takýto účel. Budú vybrané 3 modely v rôznych cenových kategóriách. Teda aj s rozdielnymi výkonmi.



Obr. 3.2 Mnořstvo veterných elektrárneň v ĀR podľa výrobcov v MW (31.12.2023) [53]

3.2 Výber a popis turbín

Cieľom bolo vybrať také veterné turbíny, ktoré sú už v dnešnej dobe považované za zastaralé. V takom prípade by bolo možné zobrať už existujúce zastaralé modely v ĀR a vytvoriť z nich multirotorové elektrárne.

Hlavným kritériom pri hľadaní vhodných modelov je výkon. Inšpiráciou bola Vestas 4R-V29 s celkovým výkonom 900 kW. Táto multirotorová elektrárneň bola postavená na voľnom poli, teda na ľahko dostupnom mieste. Rozmerovo je ale vhodná aj do ťažšie dostupných lokalít keďže V29 má dĺžkou lopatiek 14,5 m. Vestas 4R-V29 sa skladá z turbín Vestas V29 s výkonom 225 kW, čo je považované za stredný výkon. Preto bude výber modelov prebiehať z kategórie malých a stredných turbín.

Tabuľka 3.1 Kategorizácia veterných elektrární podľa Endera (2006) [55]

Veterné elektrárne								
Malé			Stredné			Veľké		
Rotor		Výkon do (kW)	Rotor		Výkon do (kW)	Rotor		Výkon do (kW)
Priemer (m)	Plocha (m ²)		Priemer (m)	Plocha (m ²)		Priemer (m)	Plocha (m ²)	
≤ 8	≤ 50	10	16,1–22	200,1–400	130	45,1–64	1600,1–3200	1500
8,1–11	50,1–100	25	22,1–32	400,1–800	310	64,1–90	3200,1–6400	3100
11,1–16	100,1–200	60	32,1–45	800,1–1600	750	90,1–128	6400,1–12800	6400

Āalšie parametre ktoré ovplyvnili výber modelov sú ťartovacia a menovitá rýchlosť vetra, pričom ich hodnoty mali byť čo najnižšie aby bolo možné vyrobiť čo najväčšie množstvo energie aj pri nízkych rýchlostiach.

Po spracovaní dát poskytnutých od ĀHMÚ je priemerná rýchlosť vetra za rok 2023 pre výšku 40 metrov je 6,8 m/s a pre výšku 70 metrov je 7,9 m/s. Pre výšku 40 metrov je teda doporučené vybrať modely turbín z kategórie IEC IV a pre výšku 70 metrov z kategórie IEC III.

Tabuľka 3.2 kategorizácia IEC [56,57]

IEC	I (silný vietor)	II (stredný vietor)	III (slabý vietor)	IV (veľmi slabý vietor)
Priemerná ročná rýchlosť vetra (m/s)	10	8,5	7,5	6
Referenčná rýchlosť vetra (m/s)	50	42,5	37,5	30
Maximálna rýchlosť vetra za 50 rokov (m/s)	70	59,5	52,5	42
Maximálna rýchlosť vetra za 1 rok (m/s)	52,5	44,6	39,4	31,5

Enercon E-18

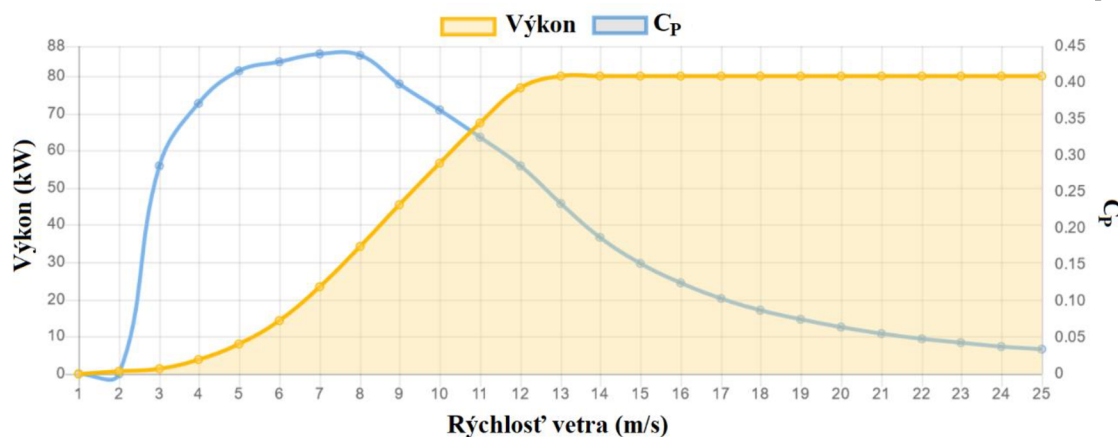
Vetrená turbína navrhnutá nemeckou firmou Enercon, ktorá bola založená v roku 1984.[58] Produkcia prebiehala hlavne v 90-tych rokoch. Tento model uprednostňuje cenu, ktorá sa pre použitú turbínu pohybuje v rozmedzí 10000 – 20000 €. [59,60] Je z troch vybraných modelov najlacnejší. V súčasnosti sa jedná o zastaralý model čo vyhovuje multirotorovému konceptu. S priemerom rotora 18 metrov je vhodná do veľmi ťažko dostupných miest. Jej nevýhodou je pomerne malý výkon. Aj pri použití 4 rotorov je menovitý výkon len 320kW.

Tabuľka 3.3 Základné parametre Enercon E-18 [61]

Menovitý výkon (kW)	80
Štartovacia rýchlosť vetra (m/s)	2,5
Menovitá rýchlosť vetra (m/s)	12,0
Vypínacia rýchlosť vetra (m/s)	25,0
Zvládnuteľná rýchlosť vetra (m/s)	67,0
Priemer rotora (m)	18
Váha – rotor, náboj rotora, gondola (t)	10
Plocha rotora (m²)	254



Obr. 3.3 Enercon E-18 [61]



Obr. 3.4 Výkonová krivka pre Enercon E-18 [61]

Vestas V25/200

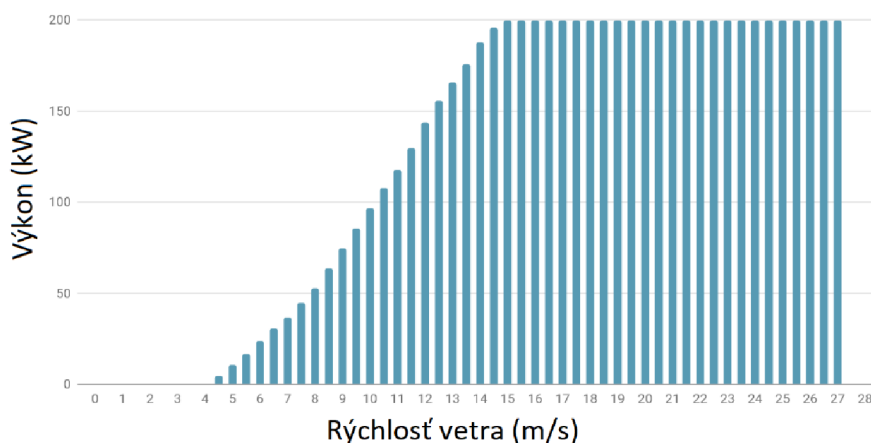
Vetrená turbína navrhnutá dánskou firmou Vestas. Tento model sa vyrába od roku 1988. [62] Ako bolo spomenuté, bol vybraný jeden model od výrobcu Vestas, keďže najviac vetrených elektrární v ĀR je práve od tejto značky a taktiež táto firma postavila multirotorovú elektrárneň 4R-V29. Pričom tento model má o 25 kW menší výkon ako turbíny V29. Cena použitej turbíny sa pohybuje v rozmedzí 22 000 – 59 000 €. [63,64] Oproti turbíne Enercon E-18 sa výkon zvýši 2,5-krát pričom hmotnosť sa zvýši len o 0,3 t. Aj keď štartovacia rýchlosť pomerne nízka, z vybraných modelov je najvyššia. Táto možnosť je kompromisom medzi výkonom a cenou.

Tabuľka 3.4 Základné parametre Vestas V25/200 [65]

Menovitý výkon (kW)	200
Štartovacia rýchlosť vetra (m/s)	3,5
Menovitá rýchlosť vetra (m/s)	11,5
Vypínacia rýchlosť vetra (m/s)	25,0
Zvládnuteľná rýchlosť vetra (m/s)	52,5
Priemer rotoru (m)	25
Váha – rotor, náboj rotoru, gondola (t)	10,3
Plocha rotoru (m²)	491



Obr. 3.5 Vestas V25/200[65]



Obr. 3.6 Výkonová krivka Vestas V25/200 [65]

Enercon E-30

Z modelov ktoré sú v tejto kapitole predstavené má tento najvyšší výkon. Tento model je taktiež od výrobcu Enercon. Ako je vidieť na obrázku 3.2, veterné elektrárne od tejto firmy vyrábajú 24 % vyrobenej veternej energie. Cena takejto použitej turbíny sa pohybuje v rozmedzí 35 000 – 44 000 €. [60,66] Jedná sa teda o najdrahší vybraný model. Tento model nemá prevodovku a má synchronný generátor. Bol vybraný preto, aby bolo možné preskúmať použiteľnosť multirotorového konceptu pre turbíny s výkonom väčším ako má Vestas V29, teda nad 225

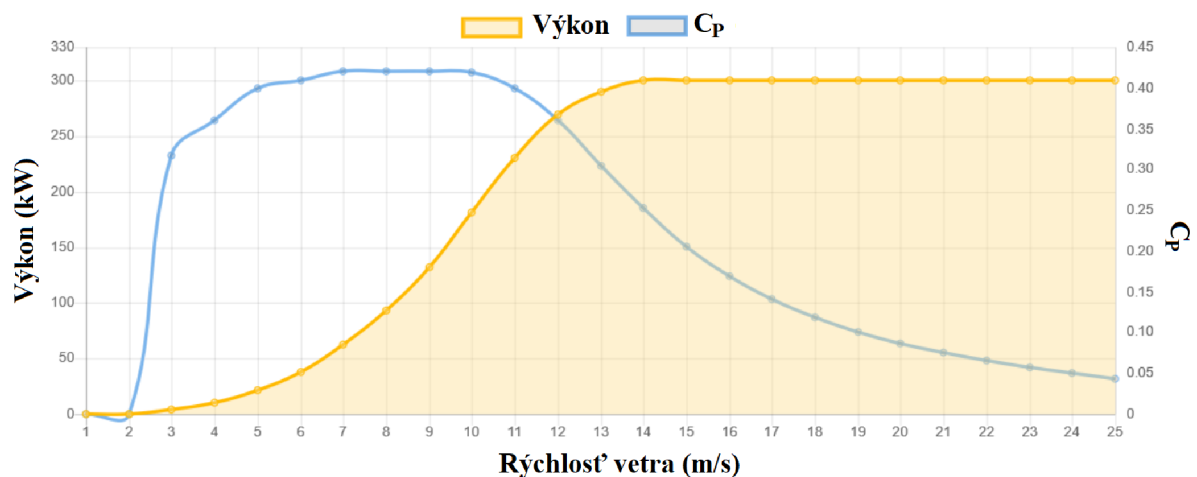
kW. Výhodou je štartovacia rýchlosť 2,5 m/s. Na druhú stranu, jedná sa o najťažší vybraný model, čo môže komplikovať konštrukciu veže.

Tabuľka 3.5 Základné parametre Enercon E-30 [67]

Menovitý výkon (kW)	300
Štartovacia rýchlosť vetra (m/s)	2,5
Menovitá rýchlosť vetra (m/s)	13,5
Vypínacia rýchlosť vetra (m/s)	25,0
Zvládnuteľná rýchlosť vetra (m/s)	70
Priemer rotoru (m)	29,6
Váha – rotor, náboj rotoru, gondola (t)	16,7
Plocha rotoru (m²)	707



Obr. 3.7 Enercon E-30 [67]



Obr. 3.8 Výkonová krivka pre Enercon E-30 [67]

4 Výpočet energie

Teraz bude vypočítaná energia vetra, vyrobená elektrická energia a využitie veternej elektrárne pre vybranú lokalitu za rok 2023. Výpočet bude urobený pre všetky modely veterných turbín z kapitoly 3. Ukázkový výpočet bude vytvorený pre model Enercon E-30. Pre ostatné modely má výpočet rovnaký postup. Výsledky pre všetky tri modely sú zobrazené v tabuľke 4.3.

4.1 Energia vetra

V tejto podkapitole bude vypočítaná energia vetra pre vybranú lokalitu za rok 2023. Pre jej výpočet je potrebné vedieť hodnotu hustoty vzduchu. Tá je závislá na niekoľkých parametroch vrátane tlaku, ktorý sa mení v závislosti na ročnom období a nadmorskej výške. ČHMÚ ponúka dáta o tlaku v hodinových intervaloch v priebehu niekoľkých rokov. Avšak stanice kde sa tento tlak meria nie sú v blízkosti vybranej lokality. Preto bude nutné považovať tlak za konštantný. Následne bol tlak vypočítaný z nadmorskej výšky pomocou vzorca [68]:

$$p_b(h) = p_b(0) \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} \cdot h + 0,5291 \cdot 10^{-8} \cdot h^2) \quad (4.1)$$

$p_b(h)$ - barometrický tlak v danej nadmorskej výške (Pa)

$p_b(0)$ - barometrický tlak na hladine mora (Pa), ktorý má hodnotu 1013,25 hPa.

h - požadovaná nadmorská výška (m)

Vybraná lokalita sa podľa [69] nachádza v nadmorskej výške 1115 m nad morom. K tejto výške sa pripočíta výška veže, teda 40 metrov resp. 70 metrov.

$$p_{b40}(h) = 101325 \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} \cdot (1115 + 40) + 0,5291 \cdot 10^{-8} \cdot (1115 + 40)^2)$$

$$p_{b40}(h) = 88188,70 \text{ Pa} = 881,89 \text{ hPa}$$

$$p_{b70}(h) = 101325 \cdot (1 - 0,118358 \cdot 10^{-3} \cdot (1115 + 70) + 0,5291 \cdot 10^{-8} \cdot (1115 + 70)^2)$$

$$p_{b70}(h) = 87866,56 \text{ Pa} = 878,67 \text{ hPa}$$

Barometrické tlaky pre vybranú lokalitu sú teda 881,89 hPa a 878,67 hPa.

Ďalším parametrom na ktorom je hustota závislá je teplota vzduchu, ktorú je možné získať z dát od ČHMÚ. Stanica, na ktorej boli namerané rýchlosti vzduchu použité v kapitole 2, meria taktiež teplotu vzduchu. Bol vypracovaný výpočet priemernej teploty vzduchu za rok 2023, ktorej hodnota je 5,05 °C.

Po výpočte týchto parametrov je možné vypočítať samotnú hustotu vzduchu, podľa vzorca [68]:

$$\rho = \frac{p_b}{r \cdot T} \quad (4.2)$$

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

p_b - barometrický tlak pre určenú výšku (Pa)

r - plynová konštanta pre vzduch ($287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T - termodynamická teplota vzduchu (K)

$$\rho_{40} = \frac{p_{b40}}{r \cdot T} = \frac{88188,70}{287 \cdot (273,15 + 5,05)} = 1,10452 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\rho_{70} = \frac{p_{b70}}{r \cdot T} = \frac{87866,56}{287 \cdot (273,15 + 5,05)} = 1,10049 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hustota vzduchu pre výšku 40 metrov je $1,10452 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a pre výšku 70 metrov je $1,10049 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Po výpočte hustoty vzduchu je možné pristúpiť k výpočtu energie vetra. Pri určovaní početnosti rýchlostí vetra sa uvažovalo obdobie 10 rokov aby sa zvýšila vzorka údajov. Pri výpočte ročnej energie sú spracované iba údaje z roku 2023. Teda 365 priemerných denných rýchlostí. Keďže sa jedná o denný priemer, tak medzi nameranými rýchlosťami je 24 hodinový interval. Z toho vyplýva, že časový interval Δ_t má hodnotu $24 \cdot 60 \cdot 60 = 86400 \text{ s}$.

Keďže bude energia vetra počítaná pre rok 2023, bola vypracovaná početnosť rýchlostí len pre tento rok v oboch výškach, vid' tabuľky 4.1 a 4.2

Tabuľka 4.1 Početnosť rýchlostí v 40 metroch

Rýchlosti v 40 m (m/s)	Početnosť (-)
1	0
2	1
3	15
4	45
5	51
6	58
7	52
8	37
9	30
10	21
11	20
12	18
13	3
14	7
15	6
Súčet	365

Tabuľka 4.2 Početnosť rýchlostí v 70 metroch

Rýchlosti v 70 m (m/s)	Početnosť (-)
1	0
2	0
3	6
4	21
5	41
6	50
7	52
8	48
9	28
10	30
11	21
12	17
13	18
14	16
15	1
16	8
17	4
18	3
19	1
Súčet	365

Energia vetra vzťahnutá na jednotku plochy sa vypočíta podľa vzorca [68]:

$$E_v = \sum_0^i E_i = \frac{1}{2} \sum_0^i \rho_i \cdot v_i^3 \cdot \Delta_t \quad (4.3)$$

Ak je hustota považovaná za konštantný člen, rovnica bude mať tvar:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \sum_0^i v_i^3 \cdot \Delta_t \quad (4.4)$$

E_v - energia vetra (J)

E_i - energia za určitý časový interval (J)

ρ_i - hustota vzduchu pre určitý časový interval ($kg \cdot m^{-3}$)

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

v_i - priemerná rýchlosť vzduchu za určitý interval ($m \cdot s^{-1}$)

Δ_t - časový interval medzi jednotlivými meraniami (s)

Energia vetra pre rotory vo výške 40 metrov je:

$$E_{v40} = \frac{\rho_{40}}{2} \sum_0^i v_{i40}^3 \cdot \Delta_t = \frac{1,10452 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{2} \sum_0^i v_{i40}^3 \cdot 86400 \text{ s} = 8\,555\,091\,985 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

Energia vetra pre rotory vo výške 70 metrov je:

$$E_{v70} = \frac{\rho_{70}}{2} \sum_0^i v_{i70}^3 \cdot \Delta_t = \frac{1,10452 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{2} \sum_0^i v_{i70}^3 \cdot 86400 \text{ s} = 13\,639\,208\,257 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

Tieto hodnoty je potrebné previesť na kWh, keďže výkony elektrární sa väčšinou udávajú práve v kWh. Pričom 3,6 MJ sa rovná 1 kWh.

$$E_{v40} = 8\,555,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} = 2\,376,4 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$E_{v70} = 13\,639,2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} = 3\,788,7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$$

Následne sa energia vetra vynásobí opísanou plochou štyroch rotorov Enercon E-30 s priemerom 29,6 m:

$$E_v \text{ celková} = 2 \cdot A_s \cdot E_{v40} + 2 \cdot A_s \cdot E_{v70} \quad (4.5)$$

$$E_v \text{ celková} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 29,6^2}{4} \text{ m}^2 \cdot 2\,376,4 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} + 2 \cdot \frac{\pi \cdot 29,6^2}{4} \text{ m}^2 \cdot 3\,788,7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$E_v \text{ celková} = 8\,484\,835 \text{ kWh}$$

4.2 Vyrobená energia počas jedného roka

Jeden z najdôležitejších parametrov elektrárne je množstvo energie ktoré dokáže reálne vyrobiť. Od toho závisí finančná úspešnosť celého projektu. Preto bude v ďalšom kroku vypočítaná vyrobená energia za rok 2023. Pri tomto výpočte sa vychádza z počestnosti rýchlostí v danej lokalite ktoré boli získané od ČHMÚ a výkonovej krivky vybraného modelu veternej turbíny. Použije sa vzorec [68]:

$$E_e = \sum E_{e_i} = \sum_{v_{min}}^{v_{max}} P_{e_i} \cdot t_{e_i} \quad (4.6)$$

E_e - vyrobená energia (kWh)

E_{e_i} - energia pre určitú rýchlosť vetra (kWh)

P_{e_i} - výkon VtE pre určitú rýchlosť vetra (kW)

t_{e_i} - časový interval pre jednotlivé rýchlosti vetra (h). Napríklad, ak sa priemerná rýchlosť 18 m/s vyskytuje za rok 3 dni, bude t_{e_i} pre danú rýchlosť nadobúdať hodnotu: $3 \cdot 24 h = 72 h$.

Pre výšku 40 m:

$$E_{e40} = \sum_1^{16} P_{e40_i} \cdot t_{e40_i} = 788\,124 kWh$$

Pre výšku 70 m:

$$E_{e70} = \sum_1^{19} P_{e70_i} \cdot t_{e70_i} = 1\,066\,915 kWh$$

Celková energia pre všetky rotory v jednej výške je:

$$E_{e_i \text{ celková}} = 2 \cdot E_{e_i} \quad (4.7)$$

$$E_{e40 \text{ celková}} = 2 \cdot E_{e40} = 2 \cdot 788\,124 kWh = 1\,576\,248 kWh$$

$$E_{e70 \text{ celková}} = 2 \cdot E_{e70} = 2 \cdot 1\,066\,915 kWh = 2\,133\,830,4 kWh$$

Celková elektrická energia vyrobená za rok všetkými rotormi je teda:

$$E_e^I = E_{e40 \text{ celková}} + E_{e70 \text{ celková}} \quad (4.8)$$

$$E_e^I = 1\,576\,248 kWh + 2\,133\,830,4 kWh = 3\,710\,078,4 kWh$$

Ako bolo spomenuté v kapitole 1, použitie multirotorovej konštrukcie zvýši množstvo vyrobenej energie za rok o 1,5 %. Preto je potrebné tieto percentá pripočítať.

$$E_e = E_e^I \cdot 1,015 = 3\,710\,078,4 \cdot 1,015 = 3\,765\,729,6 kWh$$

Podrobnejří výpočet je zobrazený v tabuľke 4.3.

Tabuľka 4.3 Celková elektrická energia vyrobená turbínou Enercon E-30 za rok 2023

Enercon E-30		40 metrov		70 metrov	
Rýchlosť (m/s)	Výkon P_{ei} (kW)	Āasový interval rýchlostí t_{ei} (h)	ĀiastoĀná energia (kWh)	Āasový interval rýchlostí t_{ei} (h)	ĀiastoĀná energia (kWh)
1	0	0	0,0	0	0,0
2	0	24	0,0	0	0,0
3	3,7	360	1332,0	144	532,8
4	10	1080	10800,0	504	5040,0
5	21,6	1224	26438,4	984	21254,4
6	38,3	1392	53313,6	1200	45960,0
7	62,4	1248	77875,2	1248	77875,2
8	93,1	888	82672,8	1152	107251,2
9	132,6	720	95472,0	672	89107,2
10	181,6	504	91526,4	720	130752,0
11	230,5	480	110640,0	504	116172,0
12	269,3	432	116337,6	408	109874,4
13	290,5	72	20916,0	432	125496,0
14	300,0	168	50400,0	384	115200,0
15	300,0	144	43200,0	24	7200,0
16	300,0	24	7200,0	192	57600,0
17	300,0	0	0,0	96	28800,0
18	300,0	0	0,0	72	21600,0
19	300,0	0	0,0	24	7200,0
		Elektrická energia vyrobená 1 rotorom (kWh):	788124,0	Elektrická energia vyrobená 1 rotorom (kWh):	1066915,2
		Elektrická energia vyrobená 2 rotormi (kWh):	1576248,0	Elektrická energia vyrobená 2 rotormi (kWh):	2133830,4
		Vyrobená elektrická energia (kWh):		3710078,4	
		Celková vyrobená elektrická energia (kWh):	3765729,6 (+1,5%)		

4.3 Koeficienty

Keďže je známa celková energia vetra aj vyrobená elektrická energia, je možné vypoĀítať výkonový súĀiniteľ C_p . Ten udáva úĀinnosť získavania energie z vetra veternej elektrárne. Poskytuje prostriedok na porovnanie rôznych turbín bez ohľadu na ich veľkosť alebo veterné podmienky. Je teda významný pre porovnanie modelov turbín z kapitoly 3.

$$C_p = \frac{E_e}{E_{v \text{ celková}}} = \frac{3\,765\,729,6 \text{ kWh}}{8\,484\,835 \text{ kWh}} = 0,444 \quad (4.9)$$

Koeficient využitia veternej elektrárne sa vypočíta podľa vzorca 1.6. Kde E_e je celková elektrická energia vyrobená za rok (kWh), P_{inst} je maximálny výkon elektrárne (kW), t_r prevádzka za rok teda 8760 hodín.

$$C_f = \frac{E_e}{P_{inst} \cdot t_r} = \frac{3\,765\,729,6 \text{ kWh}}{4 \cdot 300 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h}} = 0,358 = 35,8 \%$$

V Česku bola v rokoch 2015 - 2020 priemerná hodnota koeficientu využitia veterných elektrární 23 % [70]. Jedná sa o priemernú hodnotu, takže s určitosťou je možné tvrdiť že v Česku existujú veterné elektrárne ktoré túto hodnotu prekračujú. Navrhnutá multirotorová elektrárň dosahuje koeficient využitia 35,8 % čo je možné považovať za veľmi dobrú hodnotu. Je predpoklad, že táto vysoká hodnota je spôsobená vybranou lokalitou, ktorá má jednu z najvyšších priemerných rýchlostí vetra na území Českej republiky. Z tohoto dôvodu je možné tvrdiť že vypočítaná hodnota je reálna.

Avšak, je možné že došlo k nadhodnoteniu rýchlosti vetra zo strany ČHMÚ. Ďalšou vecou je fakt že pri výpočtoch sa pracovalo s priemernou rýchlosťou za deň a nie za hodinu. Ak by boli tieto dáta pre túto prácu dostupné, je možné že koeficient využitia ako aj energia vetra a vyrobená elektrická energia by mali odlišné hodnoty od tých ktoré boli vypočítané v tejto práci. Taktiež, výkonové krivky poskytovali dáta o výkone len pre rýchlosti v celých číslach. Ak by boli tieto dáta uvedené pre menšie intervaly medzi rýchlosťami, zvýšila by sa presnosť výpočtu.

4.4 Porovnanie

Ako bolo napísané na začiatku kapitoly, hodnoty energie vetra, vyrobenej energie počas jedného roka, výkonového súčiniteľa a využitia výkonu boli rovnakými vzorcami vypočítané aj pre modely Enercon E-18 a Vestas V25/200. V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené výsledky pre tieto modely.

Tabuľka 4.4 Porovnanie veterných turbín

	D (m)	P_{inst} (kW)	E_v celková (kWh)	E_e (kWh)	C_P (-)	C_f (-)
Enercon E-18	18,0	4 x 80	3 137 653,7	1 184 746,2	0,378	0,423
Vestas V25/200	25,0	4 x 200	6 052 572,8	1 943 928,0	0,321	0,277
Enercon E-30	29,6	4 x 300	8 484 835,5	3 765 729,6	0,444	0,358

Ako je možné vidieť, s rastúcim priemerom rotora rastie celková energia vetra aj množstvo vyrobenej elektrickej energie. Práve priemer lopatky, čo by najdlhšieho dielu VtE, určuje v akých lokalitách je ešte možné daný model použiť. Čím menší priemer, tým menej dostupnejšie miesto môže byť vybrané pre výstavbu projektu. Každý s týchto modelov je možné použiť pri navrhovaní multirotorovej elektrárne ale v rôznych lokalitách.

Keďže model Vestas dosahuje najnižšie hodnoty C_P aj C_f nebude vybraný pre pokračovanie práce. Enercon E-18 dosahuje najvyššej využiteľnosti veternej elektrárne, ale disponuje najnižším množstvom vyrobenej energie. Pre lokalitu vybranú v kapitole 2, je možné použiť rotor s väčším priemerom a teda aj s väčším výkonom. Po zohľadnení technických a energetických parametrov bol vybraný model Enercon E-30. Dosahuje lepších hodnôt

výkonového součinitele aj využitia veternej elektrárne ako Vestas V25/200 a zároveň má najvyšší výkon zo všetkých modelov. Jeho hlavnou nevýhodou je vysoká hmotnosť. Bude teda vyžadovať pevnejšiu konštrukciu veže, čo môže spôsobiť zvýšenie jej hmotnosti. To sa prejaví na množstve materiálu potrebného na výstavbu veže a tým aj na stavebných nákladoch. Tento model predstavuje príležitosť navrhnuť multirotorovú elektrárnu s vyšším výkonom ako Vestas 4R-V29.

5 Konštrukcia

V nasledujúcej kapitole bude vypracovaný návrh konštrukcie multitorovej elektrárne.

5.1 Materiál

Pre konštrukciu veže bola vybraná oceľ S355J2G3, teda ČSN EN 10025-2. Jedná sa o konštrukčnú oceľ vyššej kvality so zaručenou zväratelnosťou pri zvýšenej medzi klzu. Je vhodná na konštrukciu tlakových nádob, mostov, hál a nosných konštrukcií. [71,72] Jedná sa o najpoužívanejšiu oceľ pri stavbe veží VtE. Je možné použiť aj oceľ S460 alebo S690, ktoré majú vyššiu pevnosť. Ich hlavnou výhodou je zníženie hmotnosti. Nevýhodou je ich cena. Oceľ S690 je o 67 % drahšia ako S355. [73] Pre potreby tejto konštrukcie postačí oceľ S355. Dáta o vlastnostiach materiálu boli získané s databázy SolidWorks 2020, keďže pevnostná analýza bola vykonaná v tomto programe.

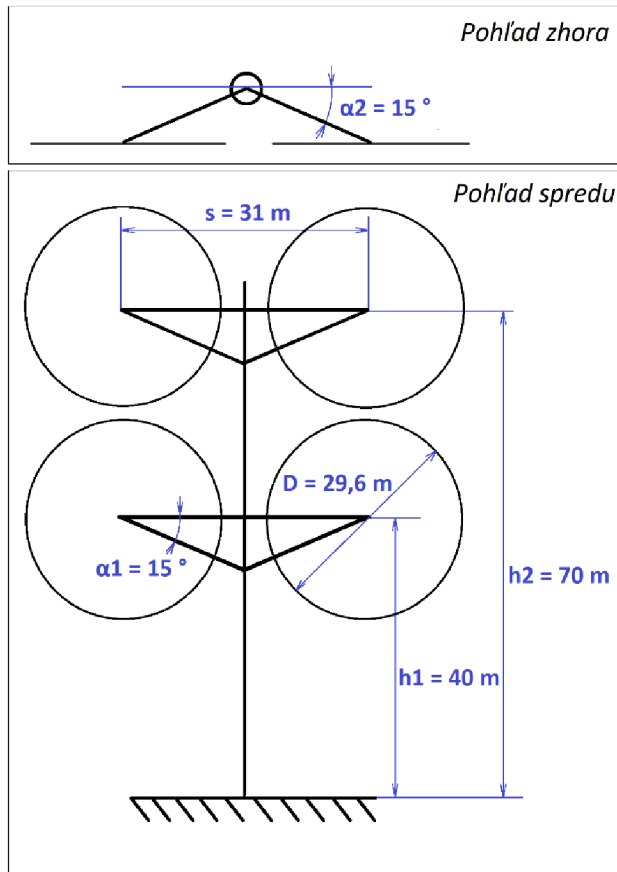
Tabuľka 5.1 Vlastnosti vybraného materiálu

Medza klzu ($N \cdot m^{-2}$)	3,15e+08
Pevnosť v ťahu ($N \cdot m^{-2}$)	4,9e+08
Modul pružnosti ($N \cdot m^{-2}$)	2,1e+11
Poissonova konštanta (-)	0,28
Hustota ($kg \cdot m^{-3}$)	7 800
Modul pružnosti v šmyku ($N \cdot m^{-2}$)	7,9e+10
Koeficient tepelnej rozťažnosti (K^{-1})	1,1e-05

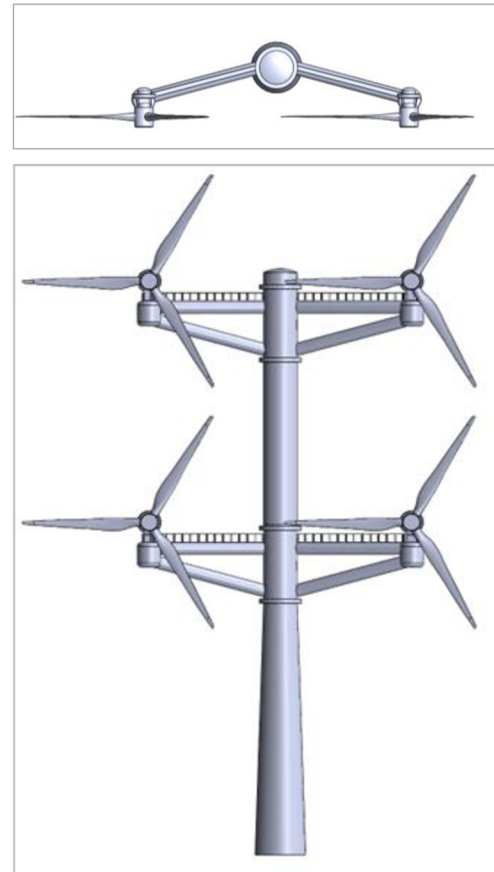
Firma SIAG, ktorá bola spomenutá v kapitole 1.2 sa zaoberá výrobou veží pre vetrené elektrárne. Na výrobu používa práve materiál S355J2G3. Vyrába stožiare s výškou 40 až 105 metrov. Tie sú delené kratšie segmenty aby bolo možné ich prepraviť. Majú hrúbku plechu 12 – 45 mm). [74] Pri voľbe hrúbky častí veže sa bude dbať na to, aby bola približne v tomto intervale. Využitie výrobcu v ČR by znížilo náklady na prepravu. Taktiež by sa znížila doba prepravy, v porovnaní s dovozom so zahraničia.

5.2 Konštrukčné riešenie

Na obrázku 5.1 sú znázornené základné rozmery konštrukcie. Hlavnou inšpiráciou pre túto konštrukciu bol Vestas 4-V29. Keďže riešenie v tejto práci pracuje s vyšším výkonom, bolo potrebné danú konštrukciu upraviť. Ako je možné vidieť, ramená sú zhotovené z dvoch trubíc. Jedna je vodorovná voči zemi a druhá je pod uhlom 15° voči vodorovnej trubici. Obe sú predklonené voči hlavnej veži o 15° . Toto riešenie umožňuje použiť väčší priemer rotoru a zväčšiť uhol otáčania. Vestas 4-V29 má takto naklonené ramená tiež. Rotory sú vo výškach 40 a 70 metrov ako už bolo spomenuté. Rozteč medzi rotormi v jednej výške je 31 metrov tak aby vodorovná medzera medzi lopatkami jednotlivých rotorov bola v najužšom mieste 1,4 metra. Zvislá medzera medzi rotormi je 0,4 m. Tento obrázok má slúžiť na lepšie pochopenie rozmerov. Kompletný model sa nachádza na obrázku 5.2. Do hlavnej konštrukcie boli pridané chodníky so zábradliami pre obsluhu. Tie je však možné v simuláciách zanedbať. Taktiež bola pridaná kupola na vrchu veže. Ďalšie konštrukčné prvky sú predstavené v ďalších odstavcoch.



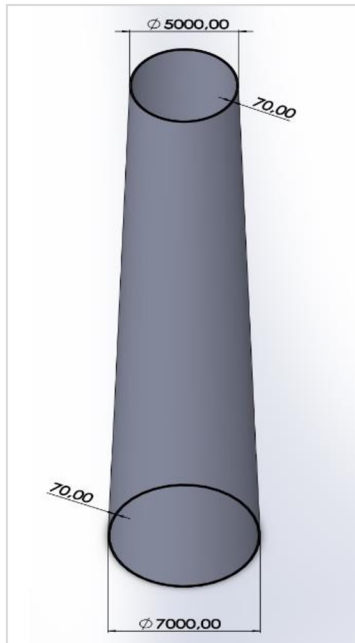
Obr. 5.1



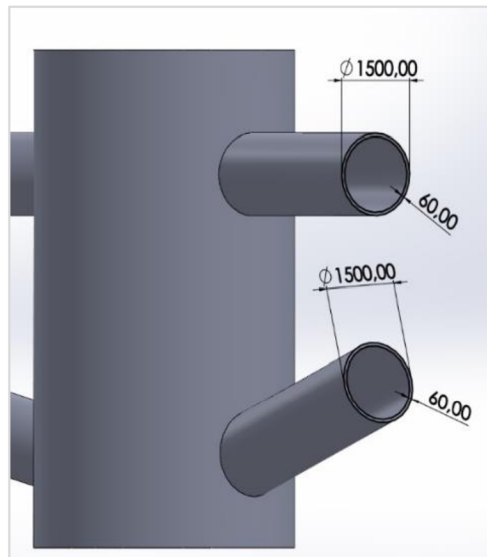
Obr. 5.2

Na obrázkoch 5.4 a 5.5 sú zobrazené rozmery hlavnej veže a ramien, ktoré vychádzajú z pevnostnej analýzy, pričom kóty sú v milimetroch. Interakčným procesom sa dospelo k záveru, že hrúbka steny resp. plechu použitého na stavbu konštrukcie musí byť minimálne 70 mm pre hlavnú vežu a 60 mm pre ramená. Ako bolo spomenuté už skôr, SIAG pracuje s hrúbkami plechov 12 – 45 mm. Ale výnimočne sú schopný pracovať aj s hrúbkou až 70 mm. [74] To znamená že vybraná hrúbka je neštandardná ale reálna. Pri päte veže je vonkajší priemer 7 metrov. Ten sa so zvyšovaním výšky znižuje až dosiahne priemer 5 metrov vo výške 31 metrov. Po dosiahnutí tejto výšky sa už priemer veže nemení. Všetky ramená majú vonkajší priemer 1500 mm. Podľa pevnostnej analýzy v nasledujúcej kapitole je pri tejto hrúbke a rozmeroch konštrukcia bezpečná.

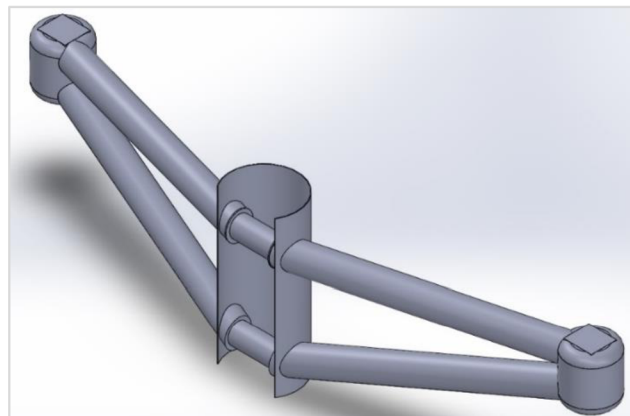
Vo vnútri hlavnej veže sú ramená vodorovne spojené. Toto konštrukčné riešenie umožňuje niekoľkonásobne zvýšiť pevnosť ramien bez nutnosti použitia nadmerného množstva materiálu v mieste kontaktu ramien a hlavnej veže. Vonkajší priemer týchto vnútorných spojovacích trubíc je 1200 mm, ich hrúbka je 130 mm a dĺžka 2480 mm. Hrúbka 130 mm je mimo interval 12 – 45 mm (max. 70 mm). Ale tento konštrukčný prvok je kľúčový pre pevnosť celej konštrukcie a taktiež sa jedná o odlišné riešenie ako pri jednorotorovej elektrárni. Na základe týchto skutočností bolo rozhodnuté danú hrúbku ponechať. Tieto rozmery sú rovnaké ako pre ramená v 40 metroch tak aj pre ramená v 70 metroch.



Obr. 5.3 Rozmery hlavnej veže

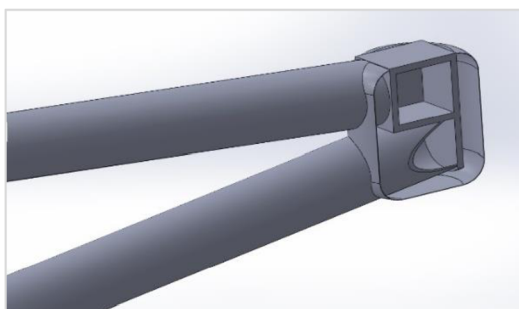


Obr. 5.4 Rozmery ramien

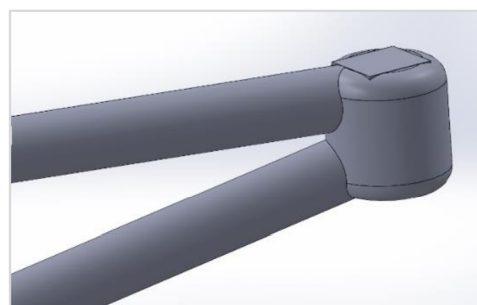


Obr. 5.5 Konštrukčné riešenie ramien

Nasledovala ešte jedna úprava. Okolo časti konštrukcie priamo pod rotorom bol pridaný valec o hrúbke 10 mm, z dôvodu zlepšenia aerodynamiky. Toto konštrukčné rozhodnutie zanedbateľne zvyšuje pevnosť. Nejedná sa o nosnú časť konštrukcie. Ak by sa aerodynamika zanedbala, tento krok by bolo možné vynechať.



Obr. 5.6

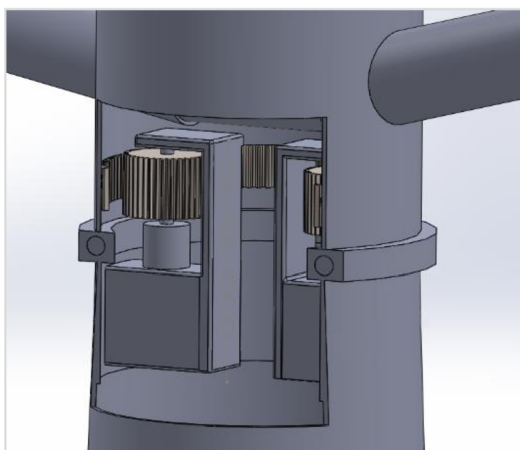


Obr. 5.7

Āalřím problém ktorý je potrebné vyrieřit' je otáčanie koňštrukcie. Vietor vo vybranej lokalite prúdi prevažne jedným smerom, vid' obr. 2.8, 2.9. Preto bolo rozhodnuté, že multirotorová veterná elektrárna bude navrhnutá bez možnosti otáčania koňštrukcie. Správne nasmerovanie koňštrukcie počas stavby je teda kľúčové. Samotné rotory sa dokážu natáčať ale celá koňštrukcia nie.

Bol vypracovaný čiastočný návrh mechanizmu, ktorý by umožnil otáčať ramená, resp. väčšiu časť koňštrukcie v závislosti na smere vetra. Mechanizmus sa nachádza pod ramenami v prvej výške (40 metrov). To zaisť otáčanie všetkých ramien v oboch výškach zároveň. Pohyb je zaisťený ozubenými kolesami poháňanými elektromotormi a axiálnym ložiskom po obode veže.

Táto práca nie je konkrétne zameraná na problematiku takéhoto otáčania. Preto bolo rozhodnuté navrhnuť mechanizmus iba koncepčne. Tento mechanizmus nie je vypracovaný dostatočne, jedná sa iba o približný návrh a pre budúci vývoj je potrebné podrobnejšie vypracovanie k získaniu vhodného koňštrukčného riešenia.



Obr. 5.8 Mechanizmus otáčania

5.3 Sily pôsobiace na koňštrukciu

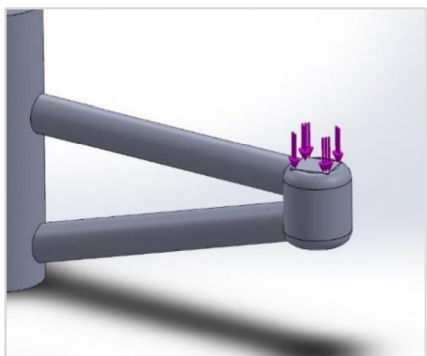
Jedným zo zjednodušení ktoré bolo urobené je nahradenie rotorov tiažovými silami. Zámerom bolo zistiť záťaž na ramená pôsobením váhy sústavy rotora, bez nutnosti dokonale vymodelovať celý rotor aj prislúchajúcimi zariadeniami. Vid' obr. 5.9. Výpočet je zobrazený v rovnici 5.1.

Váha zostavy (rotor, náboj rotoru, gondola) je 16,7 t. Veľkosť gravitačného zrýchlenia je 9,82 m/s². Výsledná sila pôsobí na koňštrukciu na štyroch miestach, keďže sú štyri rotory.

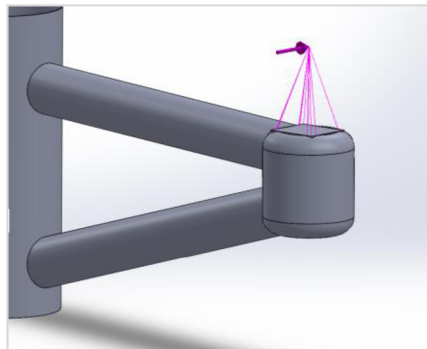
$$F_g = m \cdot g = 16700 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 163\,994 \text{ N} \quad (5.1)$$

Taktiež bola urobená náhrada náporovej sily pôsobiacej na rotor v axiálnom smere. Cieľom je zistiť záťaž na ramená pôsobením tejto sily. Rotor bol teda nahradený nedeformovateľným telesom, aby sa celá sila preniesla na rameno. Je potrebné zvlášť vypočítať tieto sily pre obe výšky v ktorých sú umiestnené rotory. Keďže už sú vypočítané aj hustoty vzduchu v týchto výškach, nebude teda hustota považovaná za rovnakú pre obe výšky. Obe hodnoty sa pohybujú

okolo $1,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, bolo by teda možné tento krok zanedbať. Rozdiel v hustote len do malej miery ovplyvňuje výsledok keďže ten je hlavne závislý na ploche a druhej mocnine rýchlosti vetra v danej výške.



Obr. 5.9 Tiažová sila rotoru



Obr. 5.10 Náporová sila rotoru

Pre výpočet náporovej sily bola vyhľadaná najväčšia rýchlosť v 10 metroch počas rokov 2010-2023. Táto rýchlosť bola hľadaná v dátach poskytnutých zo stránok ČHMÚ. Okrem priemernej dennej rýchlosti, poskytuje ČHMÚ aj dáta o maximálnej dennej rýchlosti. Bola nameraná na stanici Klínovec rovnako ako priemerná rýchlosť. Jedná sa o hodnotu 29,9 m/s. Následne bola prepočítaná podľa vzorca 1.1 na výšky 40 a 70 metrov. Teda 44,1 a 51,6 m/s. V oboch výškach majú rotory rovnakú plochu a to 707 m^2 .

Pre výpočet tejto sily je potrebné zistiť náporový súčiniteľ C_T . Bol použitý graf závislosti C_T na koeficiente b , ktorý je určený experimentálne. [75] Koeficient b môže nadobúdať hodnoty 0 – 1. Najčastejšie má koeficient b pre veterné turbíny hodnotu v rozmedzí 0,5 – 1 resp. v okolí hodnoty 0,8. Po konzultácii s vedúcim práce bolo rozhodnuté že hodnota koeficientu b bude určená 1. Teda maximálna možná hodnota. Aby bol analyzovaný prípad pôsobenia najväčšieho náporu na rotor. Podľa grafu v knihe [75], vybraná hodnota b odpovedá koeficientu C_T s hodnotou 2. Koeficient C_T nadobúda hodnoty 0 – 2, čiže sa taktiež jedná o maximálnu hodnotu. Náporová sila T sa vypočíta zo vzorca 5.3. Kde C_T je náporový koeficient (-), v je maximálna rýchlosť vzduchu pre danú výšku ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ρ_i je hustota vzduchu v danej výške ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), S_R je plocha rotoru (m^2).

$$C_T = f(b) \quad (5.2)$$

$$C_T = \frac{T}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S_R} \quad (5.3)$$

Zo vzorca 5.3 sa vyjadri T :

$$T_i = 0,5 \cdot S_R \cdot \rho_i \cdot v_{imax}^2 \cdot C_T$$

$$T_{40} = 0,5 \cdot 707 \text{ m}^2 \cdot 1,10452 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (44,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot 2 = 1\,518\,693 \text{ N}$$

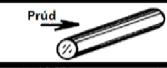

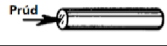


$$T_{70} = 0,5 \cdot 707 \text{ m}^2 \cdot 1,10049 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (51,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot 2 = 2\,071\,595 \text{ N}$$

Výsledné odporové sily majú veľkosť 1 518 693 N pre výšku 40 metrov a 2 071 595 N pre výšku 70 metrov. Sú umiestnené 2,5 metra nad plochou ramien, teda vo výške osy rotoru. Jedná sa o najväčšie sily pôsobiace na konštrukciu a teda budú mať najväčší vplyv na návrh.

Tak ako na rotory, tak aj na konštrukciu pôsobí gravitačné zrýchlenie. Preto je potrebné zohľadniť ho v simulácií. Ako už bolo spomenuté, veľkosť gravitačného zrýchlenia je $9,82 \text{ m/s}^2$. Jednou z dôležitých požiadaviek pri pevnostnej analýze je zaistiť aby sa konštrukcia nezrútila pod vlastnou váhou. Vid' obr. 5.12 a).

Āalšou silou ktorá pôsobí na konštrukciu (nie na rotory) je odporová sila vetra. S narastajúcou výškou sa hodnota tejto sily zväčšuje lebo je závislá na rýchlosti vetra. Rovnako ako pri náporovej sile pôsobiacej na rotory, tak aj tu bola použitá najväčšia rýchlosť vetra za roky 2010-2023. V tomto prípade bola konštrukcia rozdelená na úseky dĺžky 10 metrov v zvislom smere. Tým sa konštrukcia rozdelila na 7 sekcií pričom na každú pôsobí iná rýchlosť vetra. Pre zvýšenie presnosti výpočtu by bolo potrebné rozdeliť konštrukciu na ešte väčší počet častí prípadne vytvoriť funkciu rastu odporovej sily v závislosti na výške. Bolo rozhodnuté, že pre určenie základných rozmerov ako sú priemery a hrúbky stien konštrukcií postačí aj 7 sekcií.

Hustota vzduchu bola v tomto výpočte pre všetky výšky považovaná za konštantnú. Pretože rozdiel hustôt medzi výškami 0 a 70 metrov ($1,10992 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $1,10049 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je 0,85 %. Je ale potrebné počítať s koeficientom odporu C_d . Keďže celá konštrukcia je tvorená trubkami, hodnota C_d bude zodpovedať vonkašiemu pôsobeniu prúdu vzduchu na trubku, teda 1,20. [64]

Tvar	Náčrt	C_D
Kruhový válec (dlhá tyč), na stranu		1,20
Guľa		0,47
Tyč, čelne		0,82
Disk, čelne	 alebo 	1,17

Obr. 5.11 Koeficient C_d [76](upravené)

Sila sa následne vypočíta podľa vzorca 5.4.

$$F_i = 0,5 \cdot S \cdot \rho_i \cdot v_{imax}^2 \cdot C_d \quad (5.4)$$

C_D - koeficient odporu (-)

v_{imax} - maximálna rýchlosť vzduchu pre danú výšku ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

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

S - plocha na ktorú pôsobí odporová sila (m^2).

Pre výpočet tejto sily nebola známa plocha jednotlivých častí, preto bola sila prevedená na tlak.

$$p_i = \frac{F_i}{S} = 0,5 \cdot \rho_i \cdot v_{imax}^2 \cdot C_d \quad (5.5)$$

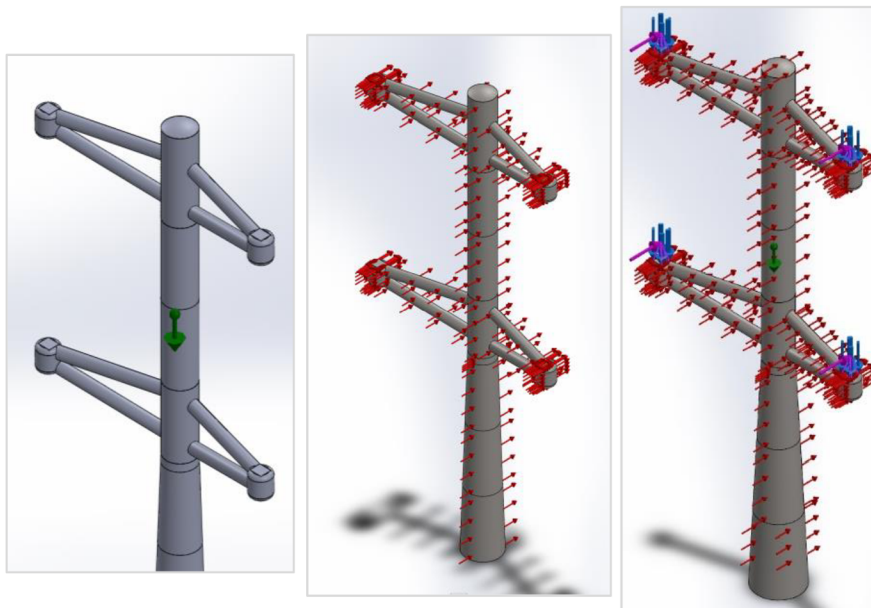
Nižšie je zobrazený ukázkový výpočet pre oblasť 0-10 metrov, pričom výsledky pre ostatné oblasti sú zobrazené v tabuľke 5.2.

$$p_{0-10} = 0,5 \cdot 1,10992 \cdot 29,9^2 \cdot 1,2 = 590,0 \text{ Pa}$$

Tabuľka 5.2 Hodnoty rýchlosti vetra a tlaku na jednotlivých výškových úsekoch

x (m)	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70
v (m/s)	29,9	36,3	40,7	44,1	46,9	49,4	51,6
p (Pa)	590,0	869,9	1091,6	1282,4	1453,1	1609,4	1754,5

Napríklad, rýchlosť v 10 metroch je 29,9 m/s tak sa uvažuje že na celom úseku 0 až 10 metrov bude rýchlosť 29,9 a teda aj tlak 590,0 Pa. Tieto tlaky boli následne vložené do simulácie po jednotlivých výškových úsekoch, viď obr. 5.12 b).



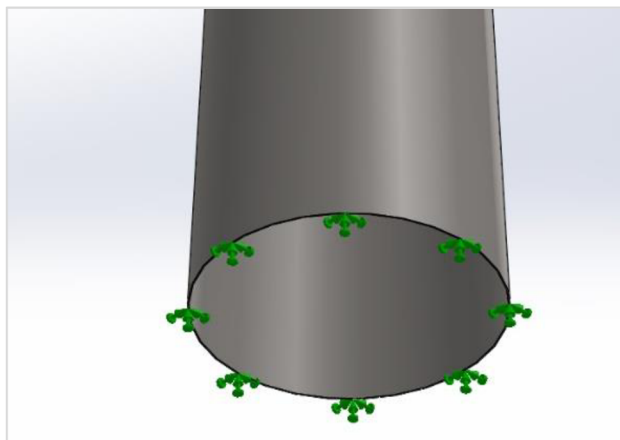
Obr. 5.12 a) Tiažová sila; b) Odporová sila vetra; c) Pôsobenie všetkých síl na konštrukciu

5.4 Simulácia

Cieľom tejto analýzy bolo zistiť priemer hlavnej veže, priemer ramien, hrúbky stien a celkovú hmotnosť konštrukcie. Simulácia pôsobenia síl na konštrukciu bola vykonaná v programe SolidWorks 2020. Jedná sa o 3D CAD software, ktorý disponuje niekoľkými doplnkami ako je aj možnosť vypracovať statickú analýzu, resp. analýzu konečných elementov. Práve tento doplnok bol použitý pri tvorení simulácie. Ako prvé bolo potrebné vytvoriť jednotlivé časti konštrukcie. Jedná sa o dolnú časť hlavnej veže, časť s ramenami pre rotory v prvej výške, hornú časť hlavnej veže a časť s ramenami pre rotory v druhej výške. Najprv boli vytvorené tieto časti zjednodušene a postupne boli upravované podľa pôsobenia síl a vzniknutých kritických miest. Následne boli všetky časti nerozdeliteľne spojené do jednej zostavy tak ako je to vidieť na obr. 5.12 c). Od tohto momentu bolo možné začať pracovať na pevnostnej analýze alebo tzv. statickej štúdií.

- Prvý krok predstavoval výber materiálu pre všetky časti konštrukcie. Ako už bolo spomenuté v kapitole 5.1, bol vybraný materiál S355J2G3 ktorý je bežne používaný pri stavbe VtE. Tento materiál sa nachádza v databáze materiálov priamo v programe SolidWorks, pod záložkou konštrukčné ocele. Preto nebolo potrebné ručne nahráť parametre daného materiálu.

- V d'alšom kroku bolo potrebné do modelu pridať upevnenie. V prípade tejto konštrukcie je upevnenie iba na spodnej ploche dolnej časti veže.



Obr. 5.13 Upevnenie veže

- Nasledovalo vytvorenie siete (mesh) ktorá rozdelí model na elementy, spojené uzlami. Āím menšie sú rozmery elementov tým presnejší výsledok analýza dosiahne. Veľkosť elementov závisí na nastaveniach siete, možnostiach siete, podmienkach kontaktu, výkone výpočtového zariadenia a vytvorenej geometrii. [77] Jedná sa o kľúčový krok pri tvorbe analýzy konečných elementov. Hlavné parametre ktoré boli iterované sú maximálna a minimálna veľkosť elementu. Tento proces si vyžadoval niekoľko pokusov kým bola dosiahnutá sieť o požadovanej jemnosti a vhodnom pomere strán (aspect ratio). Z programu SolidWorks je možné priamo vyexportovať údaje o vytvorenej sieti a tie sú zobrazené v tabuľke 5.3. Maximálna dĺžka elementu je 141 mm. Vzhľadom na veľkosť celého modelu je tento rozmer prijateľný. To isté platí aj pre minimálnu dĺžku elementu, ktorá je 48 mm.

Tabuľka 5.3 Parametre vytvorenej siete

Typ siete	Pevná sieť
Použitý sieťovač:	Zmiešaná sieť založená na zakrivení
Jacobiho body	4 body
Maximálna veľkosť elementu	141,161 mm
Minimálna veľkosť elementu	48,2323 mm
Kvalita siete	Vysoká
Celkový počet uzlov	738904
Celkový počet elementov	372464
Maximálny pomer strán	18,354
% elementov s pomerom strán < 3	68,42
% elementov s pomerom strán > 10	0,3
% skreslených elementov (Jacobian)	0

- Po vytvorení siete nasledovalo nastavenie všetkých síl pôsobiacich na model. Tieto sily sú popísané v kapitole 5.3.
- Po splnení všetkých týchto krokov je možné spustiť analýzu. Program SolidWorks pracuje s napätím von Mises. Toto kritérium maximálneho napätia je zložené na teórii von Mises-Hencky. Jedná sa o teóriu šmykovej energie resp. teóriu maximálneho skreslenia. Pokiaľ sa napätie von Mises začína rovnať medzi napätia, ohybné materiály sa začínajú rozťahovať. Napätie v jednotlivých osách je označené ako $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ($N \cdot m^{-2}$). Napätie von Mises je určené vzorcom [78]:

$$\sigma_{vonMises} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2\}^{1/2} \quad (5.6)$$

- Následne je z výsledkov pevnostnej analýzy určený koeficient bezpečnosti, teda „factor of safety“ (FOS). Ten je možné upravovať, konštrukčnými zmenami. Zvyšovanie tohto koeficient väčšinou znamená aj zvyšovanie celkovej hmotnosti. Preto je dôležité nájsť optimálnu hodnotu bezpečnosti, ktorá nebude príliš veľká, ale dostatočná, aby konštrukcia nemala zbytočne veľkú hmotnosť. Väčšia hmotnosť znamená viac materiálu, teda aj drahšiu konštrukciu. Tento koeficient sa určuje vzorcom [78]:

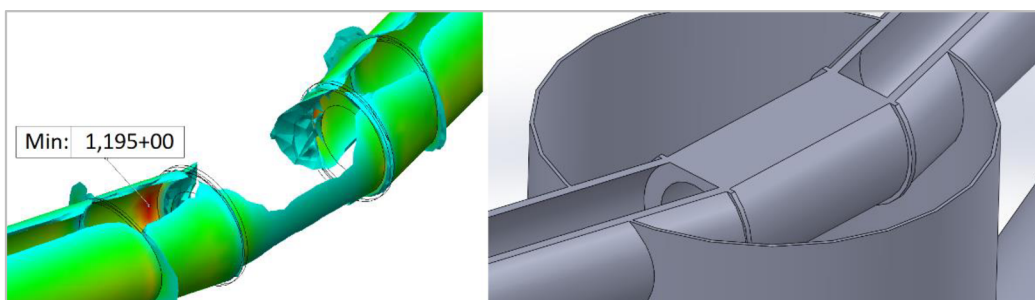
$$k_{FOS} = \frac{\sigma_{medza}}{\sigma_{vonMises}} \quad (5.7)$$

k_{FOS} - koeficient bezpečnosti (-)

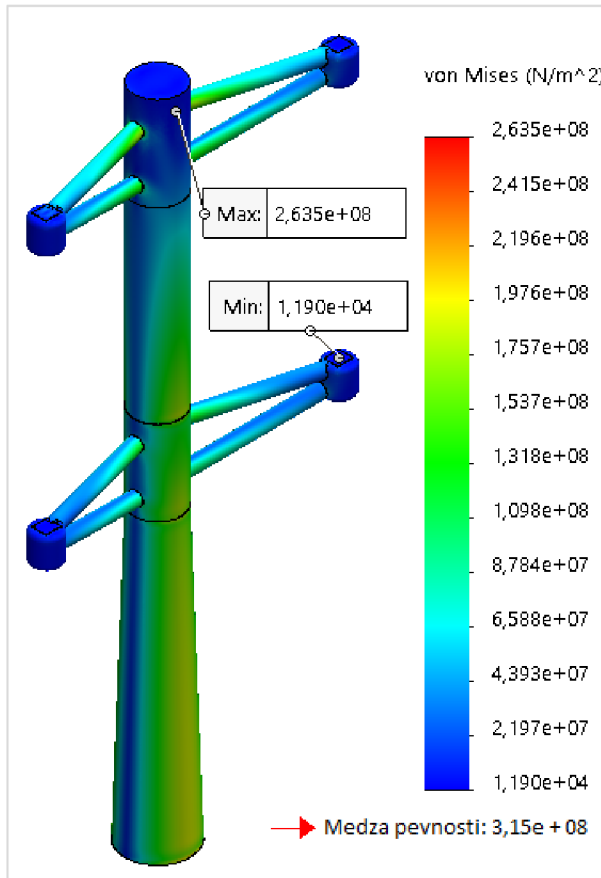
σ_{medza} - medza napätia ($N \cdot m^{-2}$)

$\sigma_{vonMises}$ - napätie von Mises ($N \cdot m^{-2}$)

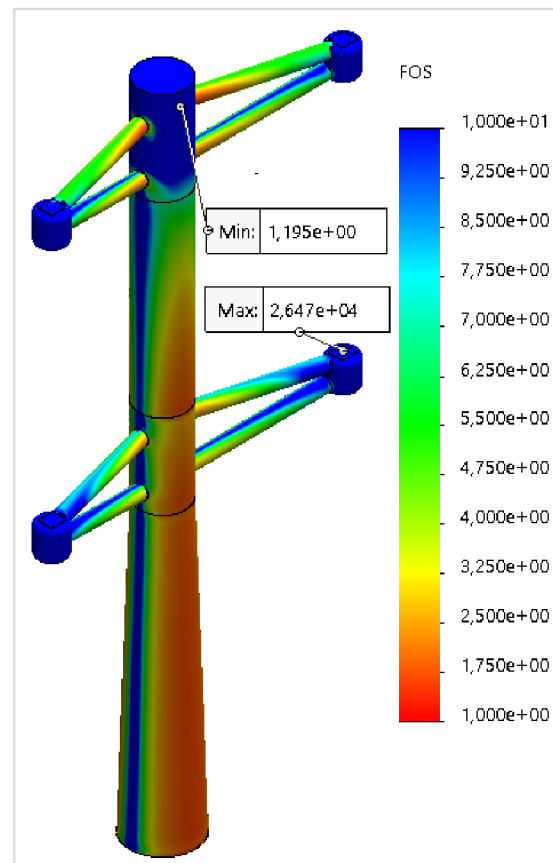
- Výsledky analýzy sú premietnuté na model na obr. 5.15 a 5.16. Najmenej namáhané časti sú plochy na konci ramien kde budú umiestnené rotory. Tieto plochy sú vodorovné so zemou preto na nich pôsobí sila vetra len minimálne. Ich najväčším zaťažením je tiažová sila rotorov. Najviac zaťažená časť sa nachádza na spojení ramien pravej a ľavej strany, vid' obr. 5.14. Toto miesto je zaťažené silou vetra pôsobiacou na ramená, náporovou silou pôsobiacou na rotory aj tiažovou silou rotorov a celej konštrukcie. Najmenší koeficient bezpečnosti pri najväčšom zaťažení sa nachádza práve v tomto mieste a jeho hodnota je 1,195. Ako už bolo spomenuté, túto hodnotu je možné zvýšiť (prípadne znížiť) zmenou návrhu. Po konzultácií s vedúcim práce bolo rozhodnuté, že pre túto konštrukciu je koeficient postačujúci.



Obr. 5.14 Kritické miesto



Obr. 5.15 Napätie von Mises



Obr. 5.16 Bezpečnosť

Celá konštrukcia bez rotorov váži 955 ton. S rotormi je hmotnosť 1021,8 ton, pričom jej výkon je 1,2 MW. Pre porovnanie, veterná turbína AN Bonus 1300/62 s výkonom 1,2 MW má celkovú hmotnosť aj s vežou 280 ton. Navrhnutá konštrukcia má teda 3,6-krát väčšiu hmotnosť. Vzhľadom na hodnotu bezpečnosti (1,195), nie je veľa možností ako znížiť hmotnosť. Je možné použiť iný materiál, napríklad spomenutý S690. Ten je ale používaný ojedinele a je taktiež drahší. Boli vytvorené ďalšie návrhy konštrukcie ale ich hmotnosť bola menšia len o zanedbateľnú hodnotu. Preto bolo rozhodnuté, že aj keď je táto navrhnutá konštrukcia niekoľkonásobne ťažšia ako konštrukcia ekvivalentnej jednorotorovej elektrárne, pre dané zaťaženie a voľbu materiálu je optimálna.

6 Porovnanie s jednorotorovou veternou elektrárnou

6.1 Výpočet rozmerov veternej turbíny s jedným rotorom

V tejto kapitole bude hľadaná jednorotorová vetrená elektrárň ktorej výkon bude ekvivalentný multirotorovej elektrárni navrhutej v tejto práci. Ako bolo vypočítané v kapitole 4.2, multirotorová elektrárň by v roku 2023 vyrobila 3 765 729,6 kWh. Tejto hodnote je potrebné sa čo najviac priblížiť.

Výška umiestnenia rotoru hľadanej VtE bola určená na 70 metrov, keďže pre túto výšku už je vypočítaná hodinová početnosť rýchlostí za rok 2023 v kapitole 4.1.

Energia vetra pre jednotkovú plochu vo výške 70 metrov E_{v70} má hodnotu $3\,788,7\text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ vid' kapitola 4.1. Taktiež je známe, že energia vetra prechádzajúceho plochou opísanou všetkými štyrmi rotormi $E_{v\text{ celková}}$ má hodnotu $8\,484\,835\text{ kWh}$. Takže:

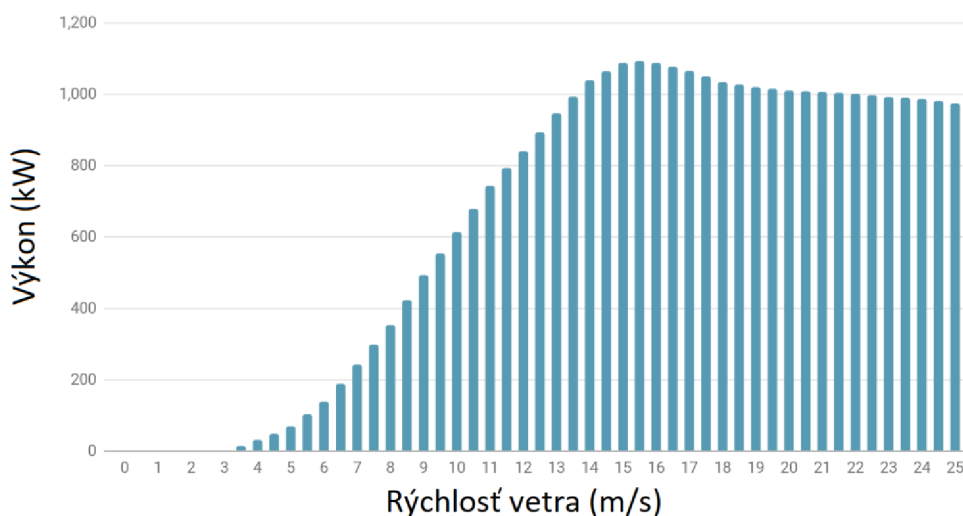
$$E_{v\text{ celková}} = S \cdot E_{v70} \rightarrow S = \frac{E_{v\text{ celková}}}{E_{v70}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (6.1)$$

Z rovnice sa vyjadri sa priemer:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot E_{v\text{ celková}}}{\pi \cdot E_{v70}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8\,484\,835\text{ kWh}}{\pi \cdot 3\,788,7\text{ kWh}}} = 53,4\text{ m}$$

To znamená že je potrebné nájsť veternú elektrárň s priemerom rotoru približne 53,4 metrov.

Hľadanie vyhovujúceho modelu prebiehalo pomocou databázy modelov veterných turbín [79]. Po vykonaní výpočtu vyrobenej energie za rok 2023 pre 10 modelov s priemerom okolo 53,4 metrov, bol vybraný model Nordex N54/1000. Tento model má výkon 1000 kW a priemer rotoru 54 metrov, čiže vyhovuje požiadavke na priemer rotoru. Maximálna výška umiestnenia rotoru pre tento model je 70 metrov [80], čiže vyhovuje požiadavke na výšku umiestnenia rotoru. Jeho výkonová charakteristika je zobrazená na nasledujúcom obrázku.



Obr. 6.1 Výkonová charakteristika Nordex N54/1000 [80]

V nasledujúcej rovnici bola vypočítaná vyrobená energia za rok 2023 pre výšku 70 metrov. Jedná sa o vzorec 4.6 z kapitoly 4.2. Pre lepšú popis výsledkov viď tabuľka 6.1.

$$E_{e70JR} = \sum E_{e_i} = \sum_{v_{min}}^{v_{max}} P_{e_i} \cdot t_{e_i} = \sum_1^{19} P_{e70_i} \cdot t_{e70_i} = 3\,713\,568,0 \text{ kWh}$$

Tabuľka 6.1 Celková elektrická energia vyrobená turbínou Nordex N54/1000 za rok 2023

Nordex 54/1000		Časový interval rýchlostí t_{e_i} vo výške 70 m (h)	Čiastočná energia E_{e_i} (kWh)
Rýchlosť (m/s)	Výkon P_{e_i} (kW)		
1	0	0	0,0
2	0	0	0,0
3	0	144	0,0
4	44	504	22176,0
5	71	984	69864,0
6	140	1200	168000,0
7	244	1248	304512,0
8	355	1152	408960,0
9	494	672	331968,0
10	615	720	442800,0
11	745	504	375480,0
12	842	408	343536,0
13	948	432	409536,0
14	1041	384	399744,0
15	1090	24	26160,0
16	1090	192	209280,0
17	1067	96	102432,0
18	1036	72	74592,0
19	1022	24	24528,0
Celková vyrobená elektrická energia (kWh):			3713568,0

Rozdiel medzi vyrobenou energiou navrhnutej multirotorovej a vybranej jednorotorovej VtE je:

$$\left(1 - \frac{E_{e70JR}}{E_e}\right) * 100 = \left(1 - \frac{3\,713\,568,0 \text{ kWh}}{3\,765\,729,6 \text{ kWh}}\right) * 100 = 1,39 \% \quad (6.2)$$

Vybraný model má o 1,39 % menšú výkon než navrhnutá multirotorová elektrárneň, pri rovnakých podmienkach. Je však možné, že skúšaním ďalších modelov by bol nájdený taký, ktorý by sa ešte viac priblížil vypočítanej hodnote vyrobenej energie multirotorovej elektrárne. Ak by nebola braná do úvahy interakcia medzi rotormi multirotorového riešenia (+1,5 % vyrobenej energie), mala by jednorotorová elektrárneň o 0,094 % vyšší výkon než navrhnutá multirotorová elektrárneň. Je potrebné spomenúť že tieto dáta sú vypočítané len pre jeden rok. Je otázne aký veľký rozdiel vo vyrobenej energii by nastal ak by sa uvažovalo dlhšie obdobie (napr. 10 rokov). Taktiež je potrebné spomenúť že sa jedná o teoretický výpočet a skutočné hodnoty sa budú určite odlišovať.

Energia vetra pre Nordex 54/1000 za rok 2023:

$$E_{v70JR} = A_s \cdot E_{v70} = \frac{\pi \cdot 54^2}{4} m^2 \cdot 3\,788,7 kWh \cdot m^{-2} = 8\,676\,960,5 kWh$$

Hodnota E_{v70} - vid' kapitola 4.1.

Výkonový súčiniteľ a koeficient využitia veternej elektrárne pre Nordex 54/1000 za rok 2023:

$$C_p = \frac{E_{e70JR}}{E_{v70JR}} = \frac{3\,713\,568,0 kWh}{8\,676\,960,5 kWh} = 0,428$$

$$C_f = \frac{E_{e70JR}}{P_{inst} \cdot t_r} = \frac{3\,713\,568,0 kWh}{1000 kW \cdot 8760 h} = 0,424 = 42,4 \%$$

Tabuľka 6.2 Porovnanie veterných turbín

	m (t)	D (m)	P_{inst} (kW)	E_{v celková} (kWh)	E_e (kWh)	C_p (-)	C_f (-)
Nordex 54/1000	179	54	1000	8 676 960,5	3 713 568,0	0,428	0,424
Enercon E-30	1021,8	29,6	4 x 300	8 484 835,5	3 765 729,6	0,444	0,358

Hmotnosť veternej turbíny Nordex 54/1000 aj s vežou je 179 ton. [81] Hmotnosť navrhutej multitorovej elektrárne je teda 5,7-krát väčšia, pričom teoreticky vyrobí ročne skoro rovnaké množstvo energie.

Väčšia hodnota koeficientu využitia veternej elektrárne pre Nordex 54/1000 je spôsobená hlavne tým, že vyrobí ročne skoro rovnaké množstvo energie pri menšom inštalovanom výkone ako má navrhnutá multitorová elektrárň.

Nordex 54/1000 má o 0,6 metra väčší priemer ako vypočítaný priemer pre ekvivalentnú jednorotorovú elektrárň, to spôsobuje že má väčšiu opísanú plochu od ktorej závisí hodnota energie vetra. To negatívne ovplyvňuje hodnotu výkonového súčiniteľa, ktorého hodnota je menšia ako u multitorovej konštrukcie.

Cena vybranej turbíny Nordex sa pohybuje od 175 000 € do 215 000 €. [82,83] Toto je cena za rotor s príslušenstvom aj za vežu. Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.2, cena vybranej turbíny Enercon E-30 sa pohybuje od 35 000 € do 44 000 €. Samozrejme sú potrebné štyri, teda cena stúpne na 140 000 € až 176 000 €. Je vidieť, že pri nákupe turbín Enercon za najdrahšiu cenu je táto cena približne rovnaká ako u jednej turbíny Nordex. Avšak je potrebné pripočítať cenu navrhutej veže pre multitorovú elektrárň. Cena turbíny Enercon je za rotor s príslušenstvom aj za vežu, ale pre túto prácu nie je táto veža potrebná, keďže je navrhnutá úplne iná.

Napriek mnohým výhodám oproti navrhutej multitorovej elektrárni je však Nordex 54/1000 pre vybranú lokalitu nevyhovujúci, vzhľadom na dĺžku lopatiek. Tá je 27 metrov, čo je nad hranicou stanovenou v kapitole 2.2. Je to o 12,2 metra viac ako má Enercon E-30.

6.2 Veterné elektrárne v blízkosti

V blízkosti vybranej oblasti sa nachádzajú dve lokality s veternými elektrárnami: Loučná pod Klínovcom a Boží dar. V tabuľke 6.3 sú uvedené údaje o veterných elektrárnach v daných lokalitách. Údaje o veterných turbínach boli získané zo stránok prevádzkovateľa Green Lines [84,85] a BENOCO [86].

Veterné turbíny v týchto lokalitách disponujú, na súčasné pomery, malým inštalovaným výkonom (0,33-0,8 MW). Koeficient využitia je pri oboch lokalitách nižší než u vybranej lokality. Je však potrebné zmieniť, že u navrhutej lokality sa jedná o teoretickú hodnotu koeficientu využitia pre jeden rok (2023). Skutočná hodnota môže byť odlišná a viac podobná ďalším dvom lokalitám.



Obr. 6.2 Loučná pod Klínovcem [84]



Obr. 6.3 Boží Dar II a III - Neklid [87]

Navrhnutá multirotorová elektrárň má z troch lokalít najmenší celkový inštalovaný výkon, no vyrobí najväčšie množstvo energie. Obe lokality v blízkosti vyrobí za rok osobitne o 15,1 % menšie množstvo energie než navrhnutá multirotorová elektrárň. Jednou z príčin tohto rozdielu je výškový rozdiel medzi jednotlivými lokalitami resp. vyššia rýchlosť vetra vo vybranej lokalite. Ich koeficient využitia veternej elektrárne je menší o 15,8% resp. 10,8%. Okrem modelu Enercon E33 je dĺžka lopatiek turbín v oboch lokalitách príliš veľká na to aby ich bolo možné použiť vo vybranej lokalite.

Tabuľka 6.3 Parametre VtE v blízkosti vybranej lokality

	Loučná pod Klínovcem	Boží Dar II a III - Neklid	Vybraná lokalita
Vzdialenosť od vybranej lokality (km)	3,5	2,5	-
Počet turbín	3	3	4
Model turbín	DeWind D4	2 x Enercon E33 1 x Enercon E48	Enercon E30
Priemer rotoru (m)	46	33,4 48	29,6
Výška veže (m)	60	50 64,6	40/70
Celkový inštalovaný výkon (MW)	1,8 (3 x 0,6)	1,46 (2 x 0,33 + 1 x 0,8)	1,2 (4 x 0,3)
Vyrobená elektrina za rok (GWh)	cca 3,2	cca 3,2	3,77
Koeficient využitia veternej elektrárne (%)	20,0	25,0	35,8
Prevádzkovateľ	Green Lines, s.r.o.	BENOCO, s.r.o.	-

DISKUSIA

Hlavnou prekážkou rozšírenia multirotorovej konštrukcie je, z pohľadu tejto práce, zložitosť konštrukcie. Ramená výrazne komplikujú konštrukciu veže a je potrebné kompenzovať sily ktoré na nich pôsobia. Vzniká moment od váhy rotorov a taktiež sa pridaním ramien zvyšuje odporová a náporová sila vzduchu pôsobiaca na konštrukciu. Rozloženie jednotlivých síl je taktiež komplikovanejšie než u jednorotorovej elektrárne.

Naopak hlavnou výhodou multirotorového konceptu je zníženie nákladov na rotor až o 89 %, pričom ročná produkcia energie sa vďaka vzájomnej interakcii rotorov zvýši o 1,5 %. Tieto informácie sú však len teoretické a je potrebné vybudovať skutočné projekty na overenie daných tvrdení.

Jedným z problémov pri vypracovávaní tejto práce bolo to, že nebolo možné získať dáta o rýchlosti vetra vo vybranej lokalite v požadovanej kvalite (hodinové intervaly počas jedného roka) od ČHMU. Tento fakt určite ovplyvnil výsledky energie vetra, vyrobenej elektrickej energie a využitie veternej elektrárne. Ak by sa tento projekt skutočne realizoval, odporúča sa vykonať meranie všetkých potrebných veličín (rýchlosť, tlak, teplota vetra) v požadovanom časovom intervale a v lokalite a výške rotorov kde sa bude veterná elektrárň realizovať.

Pre umiestnenie multirotorovej elektrárne bola vybraná lokalita s jednou z najvyšších priemerných rýchlostí v Česku. To má pozitívny vplyv na množstvo vyrobenej energie, avšak konštrukcia musela odolať väčšiemu zaťaženiu. Preto bola potrebná pevnejšia konštrukcia, na ktorú bolo potrebné viac materiálu, čo vo výsledku zvýšilo hmotnosť. Oproti veternej turbíne AN Bonus 1300/62 s rovnakým inštalovaným výkonom má 3,6-krát väčšiu hmotnosť. Návrh na zníženie hmotnosti je vytvoriť konštrukciu s rotormi vo výškach 30 a 60 metrov, prípadne ešte v nižšej výške. Vzhľadom na vysoký koeficient ročného využitia elektrárne je možné určité zníženie výšky. Vymeniť určité množstvo vyrobenej energie za zníženie hmotnosti a teda aj zníženie investičných nákladov. Ďalšou možnosťou ako znížiť hmotnosť je použitie materiálu s vyššou medzou klzu, napr. S690. V tejto práci bolo žiadané aby sa použil materiál, ktorý sa bežne používa na stavbu veží vetrených elektrární, teda S355J2G3. Je potrebné brať do úvahy to, že materiál S690 je o 67 % drahší než S355J2G3. Ak by bola zvolená možnosť zníženia hmotnosti zmenou materiálu alebo zmenou výšky, je potrebné porovnať o koľko by sa zmenili stavebné náklady a o koľko by sa zmenilo množstvo vyrobenej energie.

Jedným z dôležitých rozhodnutí ktoré bolo pri vypracovávaní práce potrebné vykonať, bolo, či sa bude konštrukcia otáčať. A ak áno, aký mechanizmus by sa použil. Konštrukcia bez možnosti otáčania bola vybraná z toho dôvodu, že vietor v danej lokalite prúdi prevažne jedným smerom a implementovanie mechanizmu na otáčanie konštrukcie by malo negatívny vplyv na bezpečnosť. Bola by potrebná ešte pevnejšia konštrukcia aby sa vykompenzovalo slabé miesto v oblasti mechanizmu otáčania. Ak by bola predsa len požiadavka na otáčaciu konštrukciu, bolo by potrebné vytvoriť úplne iný návrh veže. V tejto oblasti je potrebné vytvoriť ďalší výskum, resp. vypracovať návrh, ktorý by umožnil otáčanie. Keďže v súčasnej dobe bola jedinou funkčne postavenou multirotorovou elektrárnou Vestas 4R-V29 a detaily konštrukcie nie sú verejne sprístupnené.

ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo popísať multirotorové veterné elektrárne z hľadiska konštrukcie, ekonomiky, logistiky a i.. Taktiež bola vyžadovaná analýza využiteľnosti multirotorových veterných elektrární v ĀR a následný výber vhodnej lokality. Āalším cieľom bolo vytvoriť návrh multirotorovej veternej turbíny pre vybranú lokalitu a vypočítať rozmery ekvivalentnej jednorotorovej veternej turbíny.

V prvej časti bolo zistené, že koncept multirotorovej veternej konštrukcie sa so značnými zmenami používal už v 19. storočí. Jeho konštrukcia prešla mnohými zmenami až sa v roku 2015 podarilo postaviť funkčnú multirotorovú elektrárneň firmou Vestas. Vzhľadom na prácu spoločností Wind Catching Systems, EnBW a EnerOcean je možné predpokladať, že sa budúci vývoj multirotorových elektrární zameria na prevedenie na mori, namiesto ťažko dostupných miest. Pričom, rozšíreniu multirotorových elektrární bráni hlavne komplikovanosť konštrukcie veže, ktorá závisí hlavne na počte rotorov. Teoreticky je možné použitím multirotorového konceptu znížiť investičné náklady. A taktiež, zvýšiť množstvo vyrobenej energie vplyvom interakcie rotorov. Čo sa týka dopravy, počet jednotlivých dielov sa zväčší ale ich rozmery sa zmenšia. Predovšetkým teda rozmery lopatiek, ktoré predstavujú pre dopravu najväčší problém. Po zhodnotení povrchu Āeskej republiky bolo dospieť k záveru, že v ĀR existuje uplatnenie multirotorových elektrární. Keďže dostatočná rýchlosť pre veterné elektrárne ($> 4\text{ m/s}$) sa v ĀR často vyskytuje v ťažšie dostupných miestach, do ktorých je vhodná práve multirotorová konštrukcia. Pre navrhovanú veternú elektrárneň v tejto práci, bola na základe veterných máp vybraná lokalita pri hore Klínovec. Po spracovaní dát rýchlosti vetra v danej lokalite vyplýva, že pre výšku 40 metrov je najčastejšia rýchlosť 5 m/s a množstvo rýchlostí nad 4 m/s predstavuje 75 %. Pre výšku 70 metrov je najčastejšia rýchlosť 6 m/s a množstvo rýchlostí nad 4 m/s predstavuje 86 %. Jedná sa teda o priaznivé podmienky pre veternú elektrárneň.

Nasledoval výber veternej turbíny. Po zohľadnení technických a energetických parametrov troch modelov veterných turbín, bol vybraný Enercon E-30 s dĺžkou lopatky 14,8 metrov. Multirotorová elektrárneň s týmto modelom má celkový inštalovaný výkon 1,2 MW. Celková vyrobená energia za rok 2023 pre multirotorovú konštrukciu s týmto modelom veternej turbíny je 3,77 GWh, výkonový súčiniteľ C_p je 0,444 a koeficient využitia veternej elektrárne je C_f je 35,8 %. Jedná sa o nadpriemernú hodnotu, keďže priemerná hodnota koeficientu využitia veterných elektrární v ĀR je 23 %.

Po vypočítaní energetických parametrov nasledoval návrh veže. Navrhnutá konštrukcia má pri najväčšom zaťažení bezpečnosť 1,195, čo je možné považovať za dostatočnú hodnotu. Pričom, hmotnosť veže a rotorov je spolu 1021,8 ton. Oproti veternej turbíne AN Bonus 1300/62 s rovnakým inštalovaným výkonom, má 3,6-krát väčšiu hmotnosť. Z toho je možné usúdiť, že aj keď je dĺžka lopatiek pri multirotorovom riešení menšia, celková hmotnosť konštrukcie nemusí byť vždy menšia ako u jednorotorovej elektrárne s rovnakým inštalovaným výkonom. To naznačuje, že je potrebný ďalší výskum v tomto odvetví. Je však potrebné povedať, že veterná turbína AN Bonus 1300/62 má lopatky dĺžky 32 metrov. To znamená, že do vybranej lokality ju nie je možné dopraviť.

V poslednej časti bol vykonaný výpočet ekvivalentnej veternej turbíny a porovnanie navrhnujej multirotorovej elektrárne s veternými elektrárnami v okolí. Veterná turbína s jedným rotorom, ktorá je ekvivalentná navrhnujej multirotorovej elektrárni vo vyrobenej energii je Nordex N54/1000. Pričom rozdiel v elektrickej energii vyrobenej za rok 2023 medzi jednorotorovou a navrhnutou multirotorovou elektrárnou bol 1,39 %. V blízkosti vybranej lokality sa nachádzajú dve oblasti s veternými elektrárnami. Jedná sa o Loučnou pod Klínovcom a Boží dar. Veterné turbíny v týchto oblastiach vyrobí za rok každá zvlášť o 15,1 % menšie množstvo energie než navrhnutá multirotorová elektrárneň. Ich koeficient využitia veternej elektrárne je o 15,8% resp. 10,8 % menší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SANDHU, Navjot Singh a CHANANA, Saurabh. Performance and Economic Analysis of Multi-Rotor Wind Turbine. Online. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*. 2018, roč. 6, č. 2, s. 289-316. ISSN 2443-1168. Dostupné z: <https://doi.org/10.24003/emitter.v6i2.298>. [cit. 2024-04-06].
- [2] Padmanathan, K.; Uma, G.; Ramachandaramurthy, V.K.; P., V.; Sudar Oli Selvi, T.; Tamizharasan, T. Conceptual Framework of Antecedents to Trends on Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Energy Conversion System. Preprints 2017, 2017070057. Dostupné z: <https://doi.org/10.20944/preprints201707.0057.v1> [cit. 2024-04-14].
- [3] VIUM NIELSEN, Jan. Vindmøller ved Saltbæk Vig 1873-1923. Online. Danmarks Vindkraftshistoriske Samling. 2001. Dostupné z: http://www.vindhistorie.dk/?Vindm%C3%B8llehistorie_Faktablade . [cit. 2024-04-14].
- [4] Johnson, Nick, Pietro Bortolotti, Katherine Dykes, Garrett Barter, Patrick Moriarty, Scott Carron, Fabian Wendt, Paul Veers, Josh Paquette, Chris Kelly, and Brandon Ennis. 2019. Investigation of Innovative Rotor Concepts for the Big Adaptive Rotor Project. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-73605. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73605.pdf>. [cit. 2024-04-14].
- [5] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny II. – Od průkopníků k výrobě větrných elektráren. Online. TZB-INFO. 2015-12-28. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13625-vetrne-elektrarny-ii-od-prukopniku-k-vyrobe-vetrnych-elektraren> . [cit. 2024-04-14].
- [6] L. Fingersh, M. Hand, A. Laxson. Wind Turbine Design Cost and Scaling Model: Technical Report. Online. December 2006. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40566.pdf> . [cit. 2024-04-07].
- [7] VAN DER LAAN, Maarten Paul; ANDERSEN, Søren Juhl; RAMOS GARCÍA, Néstor; ANGELOU, Nikolas; PIRRUNG, Georg Raimund et al. Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator. Online. *Wind Energy Science*. 2019, roč. 4, č. 2, s. 251-271. ISSN 2366-7451. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-4-251-2019>. [cit. 2024-04-06].
- [8] H. Dorner. *Wind Energy History*. Online. UNIVERSITÄT STUTTGAR. 1997. Dostupné z: <https://www.heiner-doerner-windenergie.de/edoerner.html>. [cit. 2024-04-07].
- [9] WIND CATCHING SYSTEMS AS. *Technology*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.windcatching.com/technology>. [cit. 2024-05-18].
- [10] DURAKOVIC, Adnan. *Norway Launches 30 GW by 2040 Offshore Wind Investment Plan*. Online. OFFSHOREWIND. 2022. Dostupné z: <https://www.offshorewind.biz/2022/05/11/norway-launches-30-gw-by-2040-offshore->

- [wind-investment-plan/](#). [cit. 2024-05-18].
- [11] WIND CATCHING SYSTEMS AS. *The Windcatcher model test*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.windcatching.com/wcs-insights/insight5>. [cit. 2024-05-18].
- [12] KOČ, Břetislav. Větrné elektrárny II. – Od průkopníků k výrobě větrných elektráren. Online. TZB-INFO. 2015-12-28. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/13625-vetrne-elektrarny-ii-od-prukopniku-k-vyrobe-vetrnych-elektraren> . [cit. 2024-04-14].
- [13] Manwell, James F., et al. A Comparative Study of a Three Rotor and a Single Rotor 5 MW Wind Turbine Based on Economic and Structural Considerations. *Wind Engineering*, vol. 38, no. 6, 2014, pp. 643–57. *JSTOR*, Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/90006852> . [cit. 2024-04-07].
- [14] ŠKORPÍK, Jiří. *Větrné elektrárny*. Online. Březen 2024. ISSN 1804-8293. Dostupné také z: <https://turbomachinery.education/vetrne-elektrarny.html>. [cit. 2024-04-06].
- [15] Padmanathan, K.; Uma, G.; Ramachandaramurthy, V.K.; P., V.; Sudar Oli Selvi, T.; Tamizharasan, T. Conceptual Framework of Antecedents to Trends on Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Energy Conversion System. Preprints 2017, 2017070057. Dostupné z: <https://doi.org/10.20944/preprints201707.0057.v1> [cit. 2024-04-14].
- [16] GIGER, Urs; KLEINHANSL, Stefan a SCHULTE, Horst. Design Study of Multi-Rotor and Multi-Generator Wind Turbine with Lattice Tower—A Mechatronic Approach. Online. *Applied Sciences*. 2021, roč. 11, č. 22. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app112211043>. [cit. 2024-04-06].
- [17] VERMA, Preeti. *Multi Rotor Wind Turbine Design And Cost Scaling*. Diplomová práce, vedoucí James F. Manwell. University of Massachusetts Amherst, 2013. Dostupné také z: <https://doi.org/10.7275/4460782>. [cit. 2024-04-06].
- [18] PLOUGMANN VINGTOFT. *VESTAS: The rotating Tower of Babel*. Online.2024. Dostupné z: <https://www.pv.eu/clients/large-enterprises/vestas-the-rotating-tower-of-babel/>. [cit. 2024-04-07].
- [19] VAN DER LAAN, Maarten Paul; ANDERSEN, Søren Juhl; RAMOS GARCÍA, Néstor; ANGELOU, Nikolas; PIRRUNG, Georg Raimund et al. Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator. Online. *Wind Energy Science*. 2019, roč. 4, č. 2, s. 251-271. ISSN 2366-7451. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/wes-4-251-2019>. [cit. 2024-04-06].
- [20] JAMIESON, Peter a BRANNEY, Michael. Multi-Rotors; A Solution to 20 MW and Beyond? Online. *Energy Procedia*. 2012, roč. 24, s. 52-59. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.086>. [cit. 2024-04-06].
- [21] KALE, S.A. and SAPALI, S.N. A REVIEW OF MULTI-ROTOR WIND TURBINE SYSTEMS. *Journal of Sustainable Manufacturing and Renewable Energy*,

- Suppl.Special Issue of WEMEP2012 Conference*, 2013, vol. 2, no. 1. pp. 3-13 ProQuest Central. ISSN 21536821. [cit. 2024-04-06].
- [22] INDUSTRYARC. *Multi Rotor Wind Turbine Market - Forecast(2024 - 2030)*. Furion analytics Research & Consulting LLP. Dostupné také z: <https://www.industryarc.com/Report/19389/multi-rotor-wind-turbine-market.html>. [cit. 2024-04-06].
- [23] REN21. "Value of investments in wind energy worldwide from 2011 to 2022 (in billion U.S. dollars)." Chart. June 13, 2023. Statista. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/186821/global-investment-in-wind-technology-since-2004/>. [cit. 2024-04-07].
- [24] MARTIN, Biben. *Živí je severní vítr. Největší výrobce větrných elektráren v Česku veškerou produkci vyváží*. Online. HOSPODÁŘSKÉ NOVINY. 2016. Dostupné z: <https://byznys.hn.cz/c1-65331160-zivi-je-severni-vitr-nejvetsi-vyrobce-vetrnych-elektraren-v-cesku-veskerou-produkci-vyvazi>. [cit. 2024-04-07].
- [25] SIAG CZ. *Výrobní zařízení*. Online. 2021. Dostupné z: <http://siag.cz/>. [cit. 2024-04-07].
- [26] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava: HEL, 2002. ISBN isbn80-86167-19-4. [cit. 2024-04-06].
- [27] VENNELL, Ross. Exceeding the Betz limit with tidal turbines. Online. *Renewable Energy*. 2013, roč. 55, s. 277-285. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.016>. [cit. 2024-04-07].
- [28] CENTER FOR SUSTAINABLE SYSTEMS. *Wind Energy: Factsheets*. Pub. No. CSS07-09. University of Michigan, 2023. Dostupné také z: <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/wind-energy-factsheet>. [cit. 2024-04-07].
- [29] MOLEK, Tomáš. První čtvrtletí provozu plovoucí větrné farmy Hywind předčilo očekávání. Online. *Oenergetice*. Roč. 15. únor 2018. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vetrne-elektra-rny/prvni-ctvrtleti-provozu-plovouci-vetrne-farmy-hywind-predcilo-ocekavani>. [cit. 2024-04-07].
- [30] SOARES-RAMOS, Emanuel P.P.; DE OLIVEIRA-ASSIS, Lais; SARRIAS-MENA, Raúl a FERNÁNDEZ-RAMÍREZ, Luis M. Current status and future trends of offshore wind power in Europe. Online. *Energy*. 2020, roč. 202. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117787>. [cit. 2024-04-07].
- [31] HEAVY HAUL AND OVERSIZED. *Wind Turbine Transport: Tips for Easy, Breezy Shipping*. Online. 2023-06-02. Dostupné z: <https://heavyhaulandoversized.com/process/wind-turbine-transport-what-you-need-to-know/>. [cit. 2024-04-06].

- [32] J. Cotrell, et al. Analysis of Transportation and Logistics Challenges Affecting the Deployment of Larger Wind Turbines: Summary of Results. Online. *National Renewable Energy Laboratory*. January 2014. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61063.pdf>. [cit. 2024-04-07].
- [33] WINDPOWERENGINEERING. *Challenges in moving huge and heavy components*. Online. DVORAK, Paul. 2011-08-05. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/challenges-in-moving-huge-and-heavy-components/>. [cit. 2024-04-07].
- [34] MAMMOET. *Record-breaking transport of wind turbine blade*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.mammoet.com/news/record-breaking-transport-of-wind-turbine-blade/>. [cit. 2024-04-07].
- [35] ČESKÁ SPOLEČNOST PRO VĚTRNOU ENERGII. *Větrná mapa*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/clanky/vetrna-mapa/35>. [cit. 2024-04-07].
- [36] SKLENÁŘ, Oldřich. *Potenciál obnovitelných zdrojů v České republice: Větrné elektrárny*. Online. AMO. 2020-10-30. Dostupné z: <https://www.amo.cz/cs/klimatym/potencial-obnovitelných-zdroju-v-ceske-republice-ve-trne-elektrarny/>. [cit. 2024-05-23].
- [37] IBERDROLA. *Construction of an offshore wind plant*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>. [cit. 2024-04-14].
- [38] WINDEUROPE. *Revised EU Renewables Directive set to speed up wind permitting*. Online. 2023, 2023-04-14. Dostupné z: <https://windeurope.org/newsroom/news/revised-eu-renewables-directive-set-to-speed-up-wind-permitting/>. [cit. 2024-04-14].
- [39] LIU, W.Y. A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. Online. *Renewable Energy*. 2017, roč. 108, s. 311-320. ISSN 09601481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.034>. [cit. 2024-04-14].
- [40] NAZIR, Muhammad Shahzad; ALI, Nisar; BILAL, Muhammad a IQBAL, Hafiz M.N. Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective. Online. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2020, roč. 13, s. 85-90. ISSN 24685844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.002>. [cit. 2024-04-14].
- [41] Mapa všeobecných větrných podmínek či výroby energie malou větrnou elektrárnou ve výšce 10 m nad povrchem. Online. ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY: AV ČR, v.v.i. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte>. [cit. 2024-04-07].
- [42] Aktuální instalace: Mapa. ČSVE: Česká společnost pro větrnou energetiku. Online. 2021. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/aktualni-instalace>. [cit. 2024-04-07].
- [43] LAWRENCE, Deborah; COE, Michael; WALKER, Wayne; VERCHOT, Louis a VANDECAR, Karen. The Unseen Effects of Deforestation: Biophysical Effects on

- Climate. Online. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022, roč. 5. ISSN 2624-893X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.756115>. [cit. 2024-05-23].
- [44] MAPY.CZ. *Mapa české republiky*. Online. 2024-03-26. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?y=49.8022514&x=15.6252330&z=8>. [cit. 2024-04-07].
- [45] Informace o pozemku. ČÚZK: Nahlížení do katastru nemovitostí. Online. Dostupné z: <https://nahlizeniidokn.cuzk.cz/ZobrazObjekt.aspx?typ=parcela&id=1291347503>. [cit. 2024-04-07].
- [46] CETKOVSKÝ, Stanislav, Bohumil FRANTÁL a Josef ŠTEKL. *Větrná energie České republiky: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů socioekonomických souvislostí*. Brno: Ústav geoniky Akademie věd ČR, 2010. Studia geographica. ISBN 978-80-86407-84-5. [cit. 2024-04-07].
- [47] HRADIL, M. Použití modelů WASP a WENG při řešení problematiky větrné eroze. STŘEDOVÁ, Hana, Jaroslav ROŽNOVSKÝ a Tomáš LITSCHMANN. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí: sborník abstraktů z mezinárodní konference : Skalní mlýn 2.-4.2.2011*. Online. Praha: Česká bioklimatická společnost v nakl. Český hydrometeorologický ústav, 2011. ISBN 978-80-86690-87-2. [cit. 2024-04-07].
- [48] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Denní data dle zákona 123/1998 Sb*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z.-123-1998-Sb>. [cit. 2024-04-14].
- [49] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1997. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1563-7. [cit. 2024-04-15].
- [50] Rayleigh Distribution - MATLAB & Simulink - MathWorks Australia. [au.mathworks.com](https://au.mathworks.com/help/stats/rayleigh-distribution.html). online. Dostupné z: <https://au.mathworks.com/help/stats/rayleigh-distribution.html>. [cit. 2020-07-14]
- [51] METEOBLUE. *History+ počasí archivní data: Hodinové historické údaje o simulaci počasí od roku 1940*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.meteoblue.com/cs/user/order/historyplus#try-for-free>. [cit. 2024-04-14].
- [52] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Bilance elektrické energie*. Online. 2023. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt-vyhledavani&vyhltext=energie&bkv=ZW5lcmdpZQ..&katalog=33415&pvo=ENE04#w>. [cit. 2024-04-07].
- [53] ČESKÁ SPOLEČNOST PRO VĚTRNOU ENERGII. *Aktuální instalace*. Online. 2023-12-31. Dostupné z: <https://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>. [cit. 2024-04-15].

- [54] VESTAS. *Products*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.vestas.com/en/products>. [cit. 2024-04-16].
- [55] MOTLÍK, CSC., Ing. Jan, Libor ŠAMÁNEK, CSC., RNDr. Josef ŠTEKL, Doc. Ing. Ladislav BĚBAR, Ing. Martin LISÝ, CSC., Ing. Martin PAVLAS, Ing. Radim BAŘINKA, Ing. Petr KLIMEK, Doc. Ing. Jaroslav KNÁPEK a Doc. Ing. Jiří VAŠÍČEK, CSC. Obnovitelné zdroje energie: a možnosti jejich využití pro ČR [online]. Praha, 2007. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznosti_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf. Odborná studie. ČEZ. [cit. 2024-04-15].
- [56] LM WIND POWER. *What is a wind class?* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press/stories/learn-about-wind/what-is-a-wind-class>. [cit. 2024-04-16].
- [57] AUGUSTO, G.L.; CULABA, A.B. a CHEN, W.H. Identification of cumulative damage at the blade root of AB92 blade using Palmgren-Miner's rule. Online. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, roč. 463, č. 1. ISSN 1755-1307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012125>. [cit. 2024-04-16].
- [58] ENERCON. *About ENERCON*. Online. Aurich, 2023. Dostupné z: <https://www.enercon.de/en/company/about-enercon>. [cit. 2024-04-16].
- [59] HITWIND. *ENERCON E18 – Sale*. Online. Dostupné z: <https://www.hitwind.com/product/enercon-e18-80kw-wind-turbine-for-sale-good-condition/>. [cit. 2024-04-16].
- [60] BAUER, Lucas a MATYSIK, Silvio. *Marketplace: Enercon*. Online. WIND-TURBINE-MODELS. 2024. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/marketplace?manufacturer=22>. [cit. 2024-04-16].
- [61] BAUER, Lucas a MATYSIK, Silvio. *Enercon E-18*. Online. WIND-TURBINE-MODELS. 2024. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/353-enercon-e-18>. [cit. 2024-04-16].
- [62] THE WIND POWER. *Online access : Manufacturers and turbines: Vestas V25/200*. Online. 2023-07-19. Dostupné z: https://www.thewindpower.net/turbine_en_170_vestas_v25-200.php. [cit. 2024-04-17].
- [63] MWPS. *VESTAS V25 – Used Wind Turbine*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.mwps.co.uk/product/used-wind-turbines-offered/175kw-500kw-wind-turbines/vestas-v25-used-windturbine-for-sale/>. [cit. 2024-05-18].
- [64] HITWIND. *Vestas V25: 200kW Wind Turbines*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.hitwind.com/product/vestas-v25-200kw-wind-turbine-for-sale/>. [cit. 2024-05-18].

- [65] BAUER, Lucas a MATYSIK, Silvio. *Vestas V25*. Online. *WIND-TURBINE-MODELS*. 2024. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/276-vestas-v25>. [cit. 2024-04-16].
- [66] WIND-TURBINE.COM. *Enercon E30/300 for Sale*. Online. 2021. Dostupné z: <https://en.wind-turbine.com/wind-turbines/155338/enercon-e30-300-for-sale-13-wind-turbines.html#infos>. [cit. 2024-04-16].
- [67] BAUER, Lucas a MATYSIK, Silvio. *Enercon E-30*. Online. *WIND-TURBINE-MODELS*. 2024. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/376-enercon-e-30>. [cit. 2024-04-16].
- [68] RYCHETNÍK, Václav; PAVELKA, Jiří a JANOUŠEK, Josef. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN isbn80-01-01563-7. [cit. 2024-04-16].
- [69] MAPY.CZ. Mapa české republiky. Online. 2024-03-26. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/turisticka?y=50.3960305&x=12.9771784&z=18>. [cit. 2024-04-16].
- [70] HANSLIAN, David. *Aktualizace potenciálu větrné energie v České republice z perspektivy roku 2020*. Praha: Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i., 2020. Dostupné také z: https://www.ufa.cas.cz/DATA/vetrna-energie/Potencial_vetrne_energie_2020.pdf. [cit. 2024-04-16].
- [71] MTMSTAL. *Ocelové třídy: OCEL S355J2, S355J2+N*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.mtmstal.cz/ocelove-tridy/ocel-s355j2-s355j2n>. [cit. 2024-04-16].
- [72] ATREON. *Akost' S355*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.atreon.sk/akost-s355/>. [cit. 2024-04-16].
- [73] VAN WINGERDE, Arno. *Use of steel for towers of wind turbines and support structures*. Online. FRAUNHOFER IWES. Bremerhaven, Germany, 2015-08-13. Dostupné z: https://www.sintef.no/globalassets/project/eera-deepwind-2015/presentations/a/a2_van-wingerde_fraunhofer.pdf. [cit. 2024-04-16].
- [74] ČESKÁ SPOLEČNOST PRO VĚTRNOU ENERGII. *Ocelový tubusový stožár*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229?fbclid=IwAR1SpU7u82Kuczy01ZbRTckAD6t5pCJkQYC66kYPoo0EEMR2TI9wVcFFr4>. [cit. 2024-04-16].
- [75] HANSEN, Martin O.L. *Aerodynamics of wind turbines*. Third edition. London: Routledge, 2015. ISBN isbn978-1-138-77507-7. [cit. 2024-04-16].
- [76] STADE AARØNÆS, ANTON a NILSSON, HANNA. *Dynamic response of pipe rack steel structures to explosion loads*. Diplomová práce. Göteborg, Sweden: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2014. Dostupné také z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamic-response-of-pipe-rack-steel-structures-to-Nilsson-Aar%C3%B8n%C3%A6s/94acace29ad923ce8933de088524e46ec1ebe21c>. [cit. 2024-04-16].

- [77] DASSAULT SYSTEMES. *Nápověda pro SOLIDWORKS: Tvorba sítě*. Online. 2024. Dostupné z: https://help.solidworks.com/2021/czech/SolidWorks/cworks/c_meshing.htm. [cit. 2024-04-16].
- [78] DASSAULT SYSTEMES. *Nápověda pro SOLIDWORKS: Maximální napětí von Mises*. Online. 2024. Dostupné z: https://help.solidworks.com/2023/czech/SolidWorks/cworks/r_Maximum_von_Mises_Stress_Criterion.htm. [cit. 2024-04-16].
- [79] BAUER, Lucas a MATYSIK, Silvio. *Windturbines database*. Online. *WIND-TURBINE-MODELS*. 2024. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines?kwrange=540%2C1570&view=table>. [cit. 2024-04-16].
- [80] THE WIND POWER. *Online access : Manufacturers and turbines: Nordex N54/1000*. Online. 2023-07-19. Dostupné z: https://www.thewindpower.net/turbine_en_306_nordex_n54-1000.php. [cit. 2024-04-17].
- [81] BAUER, Lucas a MATYSIK, Silvio. *Nordex N54*. Online. *WIND-TURBINE-MODELS*. 2024. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/397-nordex-n54>. [cit. 2024-04-16].
- [82] RENUGEN. *Nordex N54/1000 Wind Turbine*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.renugen.co.uk/nordex-n54-1000-wind-turbine/>. [cit. 2024-05-18].
- [83] RENUGEN. *Nordex N54 1000kW Wind Turbine*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.renugen.co.uk/nordex-n54-1000kw-wind-turbine/>. [cit. 2024-05-18].
- [84] GREEN LINES. *Projekty: Farma Loučná*. Online. 2015. Dostupné z: <http://www.greenlines.cz/loucna.php>. [cit. 2024-05-18].
- [85] GREEN LINES. *Dopady projektu Větrné elektrárny Loučná*. Online. 2015. Dostupné z: http://www.greenlines.cz/loucna_zivotni_prostredi.php. [cit. 2024-05-18].
- [86] BENOCO. *Lokalita: Boží dar*. Online. 2020. Dostupné z: <http://www.elektrarny.benoco.cz/lokalita/bozi-dar/informace/>. [cit. 2024-05-18].
- [87] ANTOSOVA. *Větrná elektrárna Boží Dar – Neklid*. Online. 2020-11-28. Dostupné z: <https://en.mapy.cz/zakladni?source=base&id=2224416&gallery=1&sourcep=foto&idp=2978546&x=12.9452728&y=50.4036320&z=17>. [cit. 2024-05-23].

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Veličina	Jednotka
Z_1	Nameraná výška	m
Z_2	Požadovaná výška	m
V_{Z2}	Rýchlosť vetra v požadovanej výške Z_2	$m \cdot s^{-1}$
V_{Z1}	Rýchlosť nameraná vo výške Z_1	$m \cdot s^{-1}$
a	Koeficient drsnosti zemského povrchu	-
R	Priemer rotoru	m
ρ	Hustota vzduchu	$kg \cdot m^{-3}$
v	Rýchlosť vzduchu v danej výške	$m \cdot s^{-1}$
C_P	Výkonový súčiniteľ	-
P_i	Výkon prenesený na turbínu	kWh
E_v	Kinetický výkon vetra	kWh
C_T	Náporový súčiniteľ	-
T	Sila pôsobiaca na rotor v smere osy otáčania (náporová sila)	N
p_d	Dynamického tlaku vetru	Pa
A_s	Opísaná plocha rotoru	m^2
C_f	Koeficient ročného využitia	-
E_e	Energia vyrobená za rok	kWh
P_{inst}	Inštalovaný výkon	kW
t_r	Počet hodín v roku	h
E_{v40}	Energia vetra pre rotory vo výške 40 metrov	kWh
E_{v70}	Energia vetra pre rotory vo výške 70 metrov	kWh
E_{e40}	Vyrobená energia vo výške 40 metrov	kWh
E_{e70}	Vyrobená energia vo výške 70 metrov	kWh
k	Parameter tvaru	-
λ	Mierka distribúcie	-
x	Priemerná rýchlosť	$m \cdot s^{-1}$
$p_b(h)$	Barometrický tlak v danej nadmorskej výške	Pa
$p_b(0)$	Barometrický tlak na hladine mora	Pa
h	Požadovaná nadmorská výška	m
r	Plynová konštanta pre vzduch	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	Termodynamická teplota vzduchu	K
E_i	Energia za určitý časový interval	J
ρ_i	Hustota vzduchu pre určitý časový interval	$kg \cdot m^{-3}$
v_i	Priemerná rýchlosť vzduchu za určitý interval	$m \cdot s^{-1}$
Δ_t	Časový interval medzi jednotlivými meraniami	s
E_{e_i}	Energia pre určitú rýchlosť vetra	kWh
P_{e_i}	Výkon VtE pre určitú rýchlosť vetra	kW
t_{e_i}	Časový interval pre jednotlivé rýchlosti vetra	h
E_e^l	Celková elektrická energia vyrobená za rok všetkými rotormi	kWh
F_g	Tiažová sila	N
m	Hmotnosť	kg
g	Gravitačné zrýchlenie	$m \cdot s^{-2}$
ρ_i	Hustota vzduchu v danej výške	$kg \cdot m^{-3}$
S_R	Plocha rotoru	m^2
C_d	Koeficientom odporu	-

F_i	Odporová síla	N
v_{imax}	Maximálna rýchlosť vzduchu pre danú výšku	$m \cdot s^{-1}$
p_{0-10}	Tlak pôsobiaci vo výške 0-10 metrov	Pa
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Napätie v jednotlivých osách	$N \cdot m^{-2}$
$\sigma_{vonMises}$	Napätie von Mises	$N \cdot m^{-2}$
k_{FOS}	Koeficient bezpečn	-
σ_{medza}	Medza napätia	$N \cdot m^{-2}$
D	Priemer rotoru	m
E_{e70JR}	Celková elektrická energia vyrobená jednorotorovou vetrenou turbínou	kWh
E_{v70JR}	Energia vetra pre jednorotorovú vetrenú turbínu	kWh
VtE	Veterná elektrárna	
ĀR	Āeská Republika	
ĀHMÚ	Āeský hydrometeorologický ústav	
ĀSVE	Āeská spoločnosť pro větrnou energii	
AV ĀR	Akademie věd Āeské republiky	
IEC	Medzinárodná elektrotechnická komisia	

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Vývoj veterných turbín [2] (upravené).....	10
Obr. 1.2 Detail multirotorového mlynu v dánsku 1873 [3].....	10
Obr. 1.3 Multirotorové mlyny v Dánsku [3].....	11
Obr. 1.4 Honnefov patent [4].....	11
Obr. 1.5 Honnefov návrh s výkonom 75 MW [5]	11
Obr. 1.6 Lagerwey [8]	12
Obr. 1.7 Vestas 4R-V29 [7]	12
Obr. 1.8 Konštrukcia Wind Catcher system (WCS) [9]	12
Obr. 1.9 Testovanie modelu v mierke 1:87,5 [11]	12
Obr. 1.10 Počet a umiestnenie [15] (upravené)	14
Obr. 1.11 Mriežková veža s výkonom 12 MW [16]	14
Obr. 1.12 Konštrukcia veže Vestas 4R-V29 [18]	14
Obr. 1.13 Koeficient ročného využitia [30] (upravené)	17
Obr. 1.14 Fázy [7] (upravené)	18
Obr. 1.15 Výkonová krivka [7] (upravené)	18
Obr. 1.16 Schnabel prives [33]	19
Obr. 1.17 Preprava lopatiek [34]	19
Obr. 2.1 Veterná mapa ČR v 100 metroch [35]	20
Obr. 2.2 Mapa NP a CHO [36] (upravené)	20
Obr. 2.3 Veterná mapa ČR v 10 metroch [41]	22
Obr. 2.4 Mapa inštalovaných VtE [43]	23
Obr. 2.5 Poloha navrhovanej multirotorovej VtE [44] (upravené)	23
Obr. 2.6 Početnosť rýchlostí v 40 metroch.....	26
Obr. 2.7 Početnosť rýchlostí v 70 metroch.....	26
Obr. 2.8 Veterná ružica pre 10 m.....	27
Obr. 2.9 Veterná ružica pre 100 m.....	27
Obr. 3.1 Inštalovaný výkon a výroba v rokoch 2014-2023 [53]	28
Obr. 3.2 Množstvo veterných elektrární v ČR podľa výrobcov v MW (31.12.2023) [53]..	29
Obr. 3.3 Enercon E-18 [61]	30
Obr. 3.4 Výkonová krivka pre Enercon E-18 [61]	30
Obr. 3.5 Vestas V25/200[65]	31
Obr. 3.6 Výkonová krivka Vestas V25/200 [65]	31
Obr. 3.7 Enercon E-30 [67]	32
Obr. 3.8 Výkonová krivka pre Enercon E-30 [67]	32
Obr. 5.1.....	41
Obr. 5.2.....	41
Obr. 5.3 Rozmery hlavnej veže.....	42
Obr. 5.4 Rozmery ramien.....	42
Obr. 5.5 Konštrukčné riešenie ramien.....	42
Obr. 5.6.....	42
Obr. 5.7.....	42
Obr. 5.8 Mechanizmus otáčania.....	43
Obr. 5.9 Tiažová sila rotoru.....	44
Obr. 5.10 Náporová sila rotoru.....	44
Obr. 5.11 Koeficient Cd [76] (upravené)	45
Obr. 5.12 a) Tiažová sila; b) Odporová sila vetra; c) Pôsobenie všetkých síl na konštrukciu.....	46

Obr. 5.13 Upevnenie veže.....	47
Obr. 5.14 Kritické miesto.....	48
Obr. 5.15 Napätie von Mises.....	49
Obr. 5.16 Bezpečnosť.....	49
Obr. 6.1 Výkonová charakteristika Nordex N54/1000 [80]	50
Obr. 6.2 Loučná pod Klínovcem [84]	53
Obr. 6.3 Boží Dar II a III - Neklid [87]	53

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 1.1</i> Koeficient drsnosti povrchu.....	16
<i>Tabuľka 2.1</i> Základné informácie o pozemku z katastra nehmuteľností [45]	24
<i>Tabuľka 2.2</i> Ukážka dát od ČHMÚ a prepočítané rýchlosti.....	25
<i>Tabuľka 2.3</i> Početnosť rýchlostí v 40 metroch.....	25
<i>Tabuľka 2.4</i> Početnosť rýchlostí v 70 metroch.....	25
<i>Tabuľka 3.2</i> Kategorizácia veterných elektrární podľa Endera (2006) [55]	29
<i>Tabuľka 3.2</i> kategorizácia IEC [56,57]	30
<i>Tabuľka 3.3</i> Základné parametre Enercon E-18 [61]	30
<i>Tabuľka 3.4</i> Základné parametre Vestas V25/200 [65]	31
<i>Tabuľka 3.5</i> Základné parametre Enercon E-30 [67]	32
<i>Tabuľka 4.1</i> Početnosť rýchlostí v 40 metroch	34
<i>Tabuľka 4.2</i> Početnosť rýchlostí v 70 metroch	34
<i>Tabuľka 4.3</i> Celková elektrická energia vyrobená turbínou Enercon E-30 za rok 2023	37
<i>Tabuľka 4.4</i> Porovnanie veterných turbín	38
<i>Tabuľka 5.1</i> Vlastnosti vybraného materiálu	40
<i>Tabuľka 5.2</i> Hodnoty rýchlosti vetra a tlaku na jednotlivých výškových úsekoch	46
<i>Tabuľka 5.3</i> Parametre vytvorenej siete	47
<i>Tabuľka 6.1</i> Celková elektrická energia vyrobená turbínou Nordex N54/1000 za rok 2023	51
<i>Tabuľka 6.2</i> Porovnanie veterných turbín	52
<i>Tabuľka 6.3</i> Parametre VtE v blízkosti vybranej lokality	53