



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# AERODYNAMICKÝ NÁVRH VĚTRNÉ TURBÍNY PRO ZVOLENOU LOKALITU

AERODYNAMIC DESIGN OF WIND TURBINE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Žabka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2018



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Bc. Marek Žabka</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

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

## **Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Větrná energetika je dynamicky se rozvíjející obor výroby elektřiny. Naprosto převažujícím typem jsou axiální větrné turbíny s maximálně třemi lopatkami. Jedná se tedy o lopatkový stroj bez skříně jehož základní aerodynamický návrh je o to obtížnější než je návrh klasických turbín se skříní. Pro aerodynamický návrh větrné turbíny se používá především klasická momentová teorie (vrtulová). Existuje ale i jiný postup vycházející z teorie lopatkové mříže a bylo, by zajímavé výsledky obou metod návrhu porovnat.

### **Cíle diplomové práce:**

- (1) Základní atributy větrné energetiky a turbín.
- (2) Zvolení lokality pro aerodynamický návrh větrné turbíny, zpracování statistických dat, návrh optimálních parametrů větrné turbíny o výkonu 1,2 kW.
- (3) Aerodynamický návrh větrné turbíny klasickou (vrtulovou) teorií.
- (4) Aerodynamický návrh větrné turbíny pomocí teorie lopatkové mříže (návrh verze s kroucenými lopatkami a verze s prizmatickými lopatkami ).
- (5) Výkonové charakteristiky obou variant a porovnání a jejich vzájemné srovnání ve vztahu k množství vyrobené energie za rok.
- (6) Porovnání všech variant z pohledu výrobních, instalačních a servisních nákladů s přihlédnutím k množství vyrobené elektřiny za rok.

### **Seznam doporučené literatury:**

HANSEN, Martin. Aerodynamics of wind turbines, 2008. Second edition. London: Earthscan Ltd., ISBN 978-1-84407-438-9.

WILSON, Robert, LISSAMAN, Peter, WALKER, Stel. Aerodynamic performance of wind turbines, 1976. Corvallis: Oregon State Univ., Technical Report. Dostupné z [http://wind.nrel.gov/designcodes/papers/WilsonLissamanWalker\\_AerodynamicPerformanceOfWindTurbines\(1976\).pdf](http://wind.nrel.gov/designcodes/papers/WilsonLissamanWalker_AerodynamicPerformanceOfWindTurbines(1976).pdf)

HAU, Erich, Wind Turbines–fundamentals, technologies, Applications, Economics, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN–10-3-540-24240-6.

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca sa venuje téme veterných turbín. Zaoberá sa základnými atribútmi veternej energetiky, potenciálom Slovenskej Republiky a ekologickým hľadiskom tohto odvetvia. Pre vybranú lokalitu sú spracované meteorologické dáta Weibulloým rozdelením, ktoré sú následne použité pre návrh lopatiek veternej turbíny. Návrh aerodynamiky prebieha podľa dvoch postupov. Prvým je teória lopatkovej mreže, ktorou sú navrhnuté krútené a prizmatické lopatky. Druhý postup je bežne používaná momentová teória, ktorou sú spočítané len krútené lopatky. Spočítané aerodynamiky sú následne porovnané a je vybrané najvhodnejšie riešenie pre danú lokalitu z ekonomického hľadiska.

### **Kľúčové slová**

Malá veterná turbína, veterná energia, aerodynamika, Weibullovo rozdelenie, teória lopatkovej mreže, momentová teória.

## **ABSTRACT**

This Master's thesis focuses on the wind turbines. It describes the basic attributes of the wind energy and the wind potential of Slovak Republic, as well as the environmental impact of this sector. Meteorological data for the selected location are processed according to the Weibull distribution and they are used for the aerodynamic design of the wind turbine blades. Aerodynamic design is processed by using two methods. The first is the blade cascade theory, which is used to design prismatic and twist blades. The second method is called the blade element momentum, which is used to design wind turbine but only twist blades are designed by using this theory. Calculated aerodynamic shapes are compared and the best economic solution for the selected location is chosen.

### **Key words**

Small wind turbine, wind energy, aerodynamics, Weibull distribution, blade element momentum theory, blade cascade theory.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

ŽABKA, M. Aerodynamický návrh větrné turbíny pro zvolenou lokalitu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 99 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D..

## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Aerodynamický návrh veternej turbíny pre zvolenú lokalitu vypracoval(a) samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....  
Dátum

\_\_\_\_\_  
Meno a priezvisko

\_\_\_\_\_  
podpis

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem týmto Ing. Jiří Škorpík, Ph.D. za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytol(a) pre vypracovaní záverečnej práce. Veľké poďakovanie patrí tiež mojej rodine za podporu pri štúdiu.



## OBSAH

1	ÚVOD.....	13
2	Vietor ako zdroj energie .....	14
2.1	Vznik vetra a prúdenie vetra .....	14
2.2	Meranie rýchlosti a smeru vetra.....	15
2.3	Energia vetra .....	15
2.4	Transformácia energie vetra na elektrickú energiu.....	16
2.5	Využitie energie vetra na Slovensku .....	18
2.5.1	Najväčšie veterná elektráreň na Slovensku .....	19
3	Environmentálne hľadisko veternej energetiky .....	20
3.1	Akustické emisie .....	20
3.2	Optické emisie .....	23
3.3	Emisie škodlivých látok .....	24
3.3.1	Emisie CO <sub>2</sub> .....	25
3.3.2	Emisie NO <sub>x</sub> a SO <sub>x</sub> .....	26
3.3.3	Emisie pevných častíc .....	26
3.3.4	Emisie elektro magnetického žiarenia.....	27
3.4	Ostatné vplyvy na životné prostredie.....	27
3.4.1	Vplyv na pôdu .....	27
3.4.2	Vplyv na faunu a flóru .....	28
3.4.3	Dopad na ráz krajiny .....	29
3.4.4	Vplyv na zásoby vody .....	29
4	Typy veterných motorov .....	30
4.1	Podľa súčiniteľa rýchlobežnosti .....	30
4.2	Podľa spôsobu regulácie výkonu .....	31
4.3	Podľa osy otáčania .....	31
4.4	Podľa aerodynamického princípu .....	31
4.4.1	Odporové veterné motory.....	31
4.4.2	Vztlakové veterné motory .....	32
5	Komponenty veternej turbíny .....	34
5.1	Rotor .....	34
5.1.1	Lopatky.....	34
5.1.2	Náboj rotora.....	36
5.1.3	Mechanizmus natáčania lopatiek .....	37

---

5.2	Gondola .....	37
5.2.1	Prevodovka .....	37
5.2.2	Generátor .....	38
5.3	Veža.....	38
5.4	Základy.....	39
5.4.1	Onshore základy .....	39
5.4.2	Offshore základy.....	40
6	Malé veterné turbíny .....	41
6.1	Využitie malých veterných turbín .....	41
6.1.1	System zapojený do siete „Grid-on“ .....	41
6.1.2	System nezávislý od siete „Grid-off“ .....	42
6.2	Komerčne ponúkané turbíny .....	43
7	Výber lokality .....	45
7.1	Spracovanie získaných hodnôt .....	46
7.2	Absolútna početnosť („četnosť“) .....	46
7.3	Weibullove rozdelenie.....	47
7.4	Výpočet hustoty energie.....	48
7.5	Výpočet návrhovej rýchlosti .....	49
8	Aerodynamický návrh podľa teórie lopatkovej mreže – krútené lopatky.....	51
8.1	Postup výpočtu .....	51
8.2	Teória osamoteného profilu.....	51
8.3	Výber aerodynamického profilu.....	52
8.4	Maximálny polomer rotora.....	55
8.5	Voľba počtu lopatiek.....	57
8.6	Výpočet geometrie krútených lopatiek.....	58
8.7	Profilové straty .....	60
8.8	Výsledné hodnoty.....	62
8.9	Výsledný mechanický výkon .....	62
8.10	Elektrický výkon .....	63
8.11	Účinnosť veternej turbíny .....	63
8.12	Overenie Reynoldsovho čísla.....	63
9	Aerodynamický návrh podľa teórie lopatkovej mreže – prizmatické lopatky.....	64
9.1	Postup výpočtu .....	64
9.2	Maximálny polomer lopatiek .....	65

9.3	Výpočet geometrie prizmatických lopatiek .....	65
9.4	Straty .....	65
9.4.1	Zmena obvodovej sily .....	65
9.5	Merná práca .....	66
9.5.1	Profilové straty .....	66
9.6	Výsledné hodnoty .....	67
9.7	Mechanický výkon.....	67
9.8	Elektrický výkon.....	67
9.9	Účinnosť veternej turbíny .....	68
10	Aerodynamický návrh podľa BEM teórie – krútené lopatky .....	69
10.1	Postup výpočtu.....	69
10.2	Jednodimenzionálna hodnostná teória .....	69
10.2.1	Ťahová sila .....	69
10.2.2	Uhlový indukčný faktor.....	70
10.2.3	Vyjadrenie účinnosti.....	71
10.2.4	Radiálny indukčný faktor .....	71
10.3	Maximálny polomer.....	72
10.4	Charakteristika premenných .....	73
10.5	Výpočet geometrie .....	74
10.6	Výsledné hodnoty .....	76
10.7	Výpočet účinnosti .....	77
11	Porovnanie navrhnutých geometrií.....	78
11.1	Dĺžka tetivy.....	78
11.2	Uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži.....	78
11.3	Profilové straty.....	79
11.4	Obvodová sila .....	80
11.5	Výkonová charakteristika .....	80
11.6	Množstvo vyrobenej energie za rok.....	81
11.7	Ekonomické zhodnotenie.....	81
12	Záver.....	83
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	84
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK .....	90
	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV.....	95
	ZOZNAM TABULIEK .....	98

ZOZNAM PRÍLOH ..... 99

## 1 ÚVOD

Veterná energetika je v dnešnej dobe rozvíjajúci sa odbor výroby elektrickej energie, ktorý môže prispieť k nižšej produkcii znečisťujúcich plynov vypúšťaných do ovzdušia, ako pri konvenčných typoch výroby elektrickej energie. Prevládajúcim druhom sú v dnešnej dobe axiálne veterné turbíny s tromi lopatkami. Tieto zariadenia sú však verejnosťou často vnímané negatívne, hlavne pre ich akustické emisie, dopad na ráz krajiny a ako príčina úmrtia veľkého počtu vtákov a lietajúcich cicavcov. Preto je nutné toto hľadisko preskúmať a rozobrať dostupné informácie.

Aby sa však inštalácia veterných turbín ekonomicky oplátila, je nutné nájsť lokalitu s dostatočnou veternosťou. Toto kritérium býva častým problémom, hlavne v krajinách nachádzajúcich sa vo vnútrozemí. Je vhodné preto zvoliť reálnu lokalitu na území Slovenskej Republiky a zistiť tak možnosti produkcie elektrickej energie v tejto oblasti.

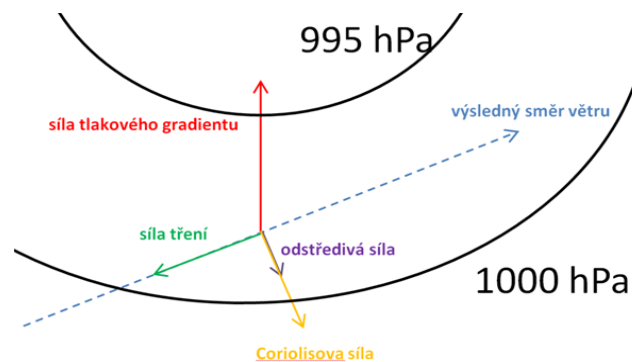
Aerodynamický návrh zvyčajne prebieha klasickou momentovou teóriou (BEM), ktorú odvodil Wilson a Lissaman. Tento postup je založený na poznatkoch z leteckého priemyslu a poznatkoch Alberta Betza a Glaurta. V súčasnosti je takmer výhradne používaná táto metóda. Rovnice je však možno odvodiť aj z teórie lopatkovej mreže (TLM), postavenej na Eulerovej rovnici. Podľa tohto postupu je možné navrhnuť aj tvarovo jednoduchšie priame lopatky. Je vhodné tieto dva postupy porovnať pre určenie rozdielov vo výstupoch a vybrať najvhodnejšie riešenie pre zariadenia o výkone 1200 W na skúmanej lokalite.

## 2 Vietor ako zdroj energie

Táto kapitola sa zaoberá vetrom, jeho vznikom, energiou skrytou vo vetre, jej transformáciou na elektrickú energiu a nakoniec jej využitím na Slovensku.

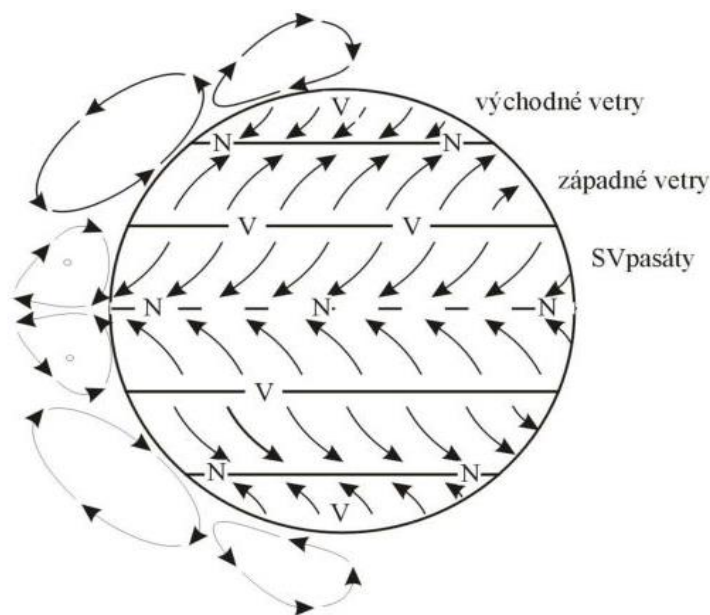
### 2.1 Vznik vetra a prúdenie vetra

Vietor je jav, kedy dochádza k prúdeniu vzduchu z miesta o vyššom tlaku do miesta o tlaku nižšom. Tlaková diferencie vzniká v dôsledku nerovnomerného zahrievania vzduchu. Pri ohrievaní tlak klesá, dochádza k znižovaniu hustoty vzduchu. Pri ochladzovaní nastáva presne opačný jav, tlak teda rastie. Pri veľmi zjednodušenom pohľade by teplý vzduch nad rovníkom stúpал hore a na jeho miesto by v smere poludníkov prúdil studený vzduch z pólů zeme, ktorý by sa potom vracal späť v horných častiach atmosféry. Na prúdenie ale majú vplyv aj iné veličiny. Napríklad rozdielne fyzikálne vlastnosti povrchov, pokrytie pevniny vegetáciou, oblačnosť a sily pôsobiace na prúdenie. Tieto sily spôsobujú, že prúdenie neprúdi priamo z miesta o vysokom tlaku do miesta o nízkom tlaku vid'. obr. 2.1. [1] [2]



Obr. 2.1 Sily pôsobiace na prúdenie [2]

Obr. 2.2 zobrazuje základnú cirkuláciu vzduchu na planéte. Samozrejme potom sú tu ešte lokálne vetry a monzúny.



Obr. 2.2 Prúdenie pri rotácii zeme [3]

## 2.2 Meranie rýchlosti a smeru vetra

Z hľadiska veternej energetiky je meranie rýchlosti vetra veľmi dôležité, nakoľko je to kľúčový faktor pri výbere vhodnej lokality pre veternú elektrárňu. Pri meraní treba brať do úvahy, že rýchlosť je vektorová veličina. Je teda nutné merať ako rýchlosť vetra, tak aj jeho smer. Rýchlosť vetra sa meria v metroch za sekundu a jeho smer v stupňoch, kedy 360 ° znamená sever a 180 ° juh. [2]

Meranie rýchlosti by malo spĺňať pre porovnateľnosť isté štandardy. Napríklad výška merania by mala byť 10 m nad zemským povrchom. Ak týmto spôsobom meranie nie je možné uskutočniť, získané údaje sa prepočítajú dohodnutou metódou na túto výšku. Taktiež, ak sa meranie nevykonáva nepretržite, vykonáva sa synoptických termínoch po celom svete súčasne. Najčastejšie používané zariadenie pre meranie rýchlosti vetra v meteorológii, je miskový anemometer, ktorého súčasťou je aj veterná smerovka, slúžiaca na určenie smeru prúdenia vid' obr. 2.3. Samozrejme je dostupné veľké množstvo anemometrov na rôznych princípoch, napr. sonický, anemometer z horúcim drôtom, atď.. [4]



Obr. 2.3 Miskový anemometer [5]

## 2.3 Energia vetra

Dá sa povedať, že prúdenie vzduchu je závislé na množstve slnečnej energie, ktorá dopadne na zemský povrch. Dopadajúca slnečná energia totiž vytvára už spomínané teplotné rozdiely vzduchu obsiahnutého v atmosfére. Z celkovej slnečnej energie dopadajúcej na povrch sa na vietor premení niečo okolo 2 %. Je to asi 50 až 100 krát viac energie, ako dokážu rastliny premeniť na biomasu pri fotosyntéze. Množstvo energie prúdiacej vo vetre predstavuje  $4 \times 10^{18}$  kWh rok. [6]

Pri odvodení výkonu je možné vychádzať zo vzťahu pre kinetickú energiu. Samotná energia pohybujúceho telesa sa počíta z rovnice kinetickej energie.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot c_w^2 \text{ [J]} \quad \text{Rov.2.1}$$

Hmotnosť vzduchu  $m$ , potom môžeme vyjadriť nasledujúcim vzťahom.

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot s \quad [kg] \quad \text{Rov.2.2}$$

Kde  $S$  predstavuje plochu kontrolného objemu, kolmého na rýchlosť prúdenia a  $s$  predstavuje dráhu.

Z definície výkonu je potom možné napísať nasledujúci vzťah.

$$P_w = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot c_w^2}{t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot s \cdot c_w^2}{t} \quad [W] \quad \text{Rov.2.3}$$

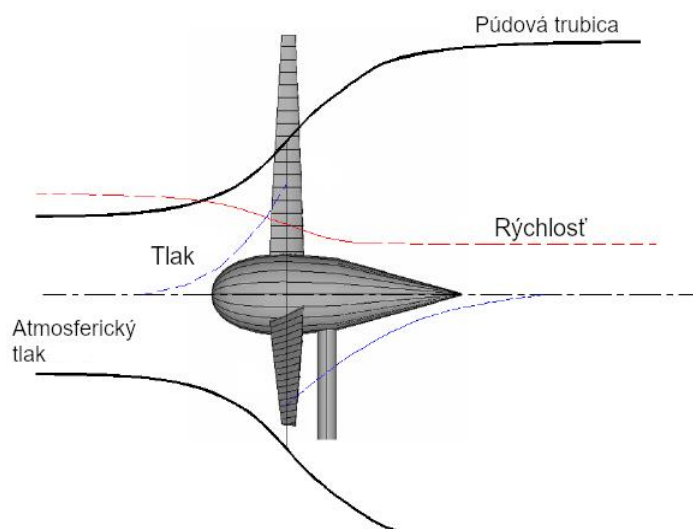
Je zrejmé, že dráha podelená časom nám opäť dá rýchlosť prúdenia vetra  $c_w$ . Po úprave tejto rovnice a prevedení na jednotkový výkon dostaneme teda nasledujúci vzťah.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w^3 \quad [W/m^2] \quad \text{Rov.2.4}$$

Z rov.2.4 môžeme vidieť, že výkon vetra je priamo závislý na rýchlosti prúdenia a na hustote vzduchu. [7]

## 2.4 Transformácia energie vetra na elektrickú energiu

Energiu vetra je nutné transformovať na rotačný pohyb, z ktorého následne pomocou generátora získame elektrickú energiu. Tento proces prebieha vo veternej turbíne. Vo svete je najpoužívanejšia axiálna veterná turbína. V tomto prípade premieňa časť kinetickej energie vetra na tlakovú. Prúd vzduchu obtekajúceho turbínu vyzera nasledovne vid'. Obr. 2.4.



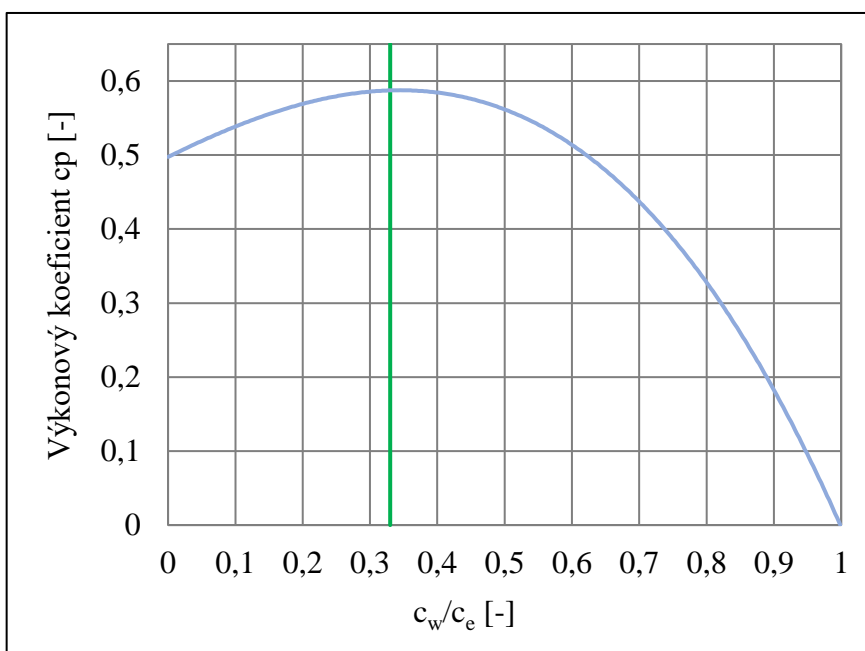
Obr. 2.4 Priebeh prúdenia okolo turbíny [8]

Z obr. 2.4 je tiež zrejmé, že nemá zmysel postaviť ďalšiu veternú turbínu v tesnej blízkosti za prvou turbínou. Je nutné počkať, kým sa prúdenie premieša s okolitým vzduchom a je opäť možné využiť jeho energiu vo veternej turbíne. Minimálne vzdialenosti, ktoré je vhodné dodržať pri stavbe veternej farmy, uvádzajú autori práce [9]. Ak ide o turbíny idúce za sebou, minimálna vzdialenosť by mala byť 7 priemerov rotora.



Ak sa turbíny nachádzajú vedľa seba, tak isto dochádza k narušeniu prúdenia a je vhodné dodržať vzdialenosť 4 priemerov rotora.

Samozrejme nie je možné previesť všetku energiu obsiahnutú vo vetre na mechanickú resp. elektrickú energiu. Prúdenie za veternou turbínou totiž nemôže dosahovať nulovú rýchlosť, pretože by to znamenalo účinnosť 0%. Optimálny pomer rýchlosti pred a za turbínou, tak aby bolo odberané maximálne množstvo energie z vetra, bol stanovený na  $1/3$ , čo znamená, že vzduch za turbínou má  $1/3$  svojej pôvodnej rýchlosti vid'. Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Betzov limit[10]

Túto zákonitosť odvodil v roku 1926 nemecký vedec Albert Betz z predpokladu jednodimenzionálneho prúdenia skrz idealizovaný rotor, pomocou hybnostnej teórie. Tiež určil aj maximálnu teoretickú účinnosť veternej turbíny 59,3 % vid' rov. 2.6. Rovnica zobrazuje pomer skutočného výkonu turbíny a výkonu vetra vstupujúceho do turbíny. Bližšie odvodenie vid' kap. 10.2.

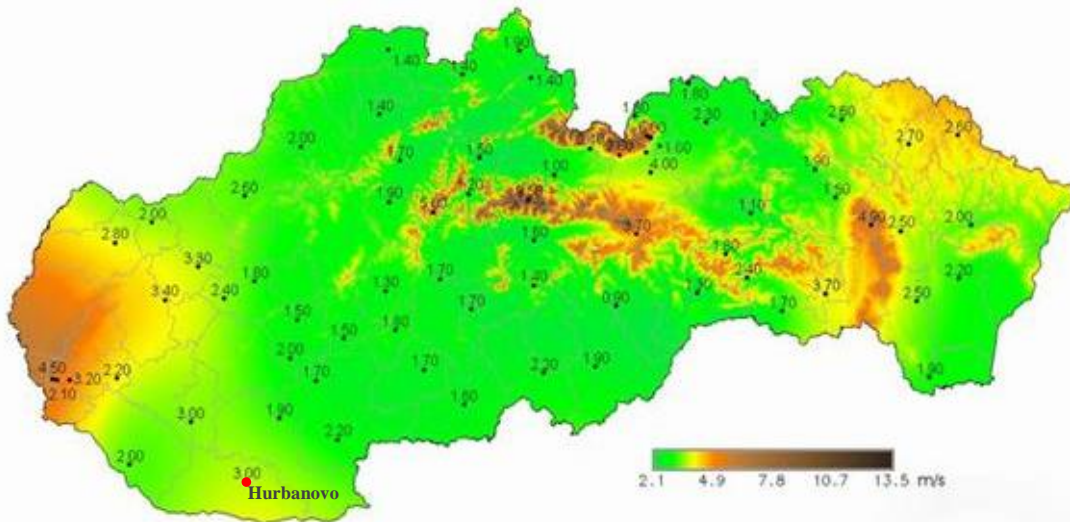
$$c_{p_{max}} = \frac{P_{VT}}{P_{vietor}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad \text{Rov.2.6}$$

Táto hodnota ale platí pre ideálne lopatky. V realite ovplyvňujú účinnosť nedokonalosti lopatiek a ďalšie straty. Preto sme schopní dosahovať účinnosť premeny veternej energie na mechanickú okolo 40 %. Celková účinnosť premeny energie na elektrickú je ovplyvnená teda účinnosťou rotora (0,4), účinnosťou prevodu (0,8) a účinnosťou generátora (0,9) vid'. rov. 2.7. Celková účinnosť premeny na elektrickú energiu je 29 %. [7] [11]

$$\eta_{celk} = \eta_{rot} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{prevod} = 0,29 \quad \text{Rov.2.7}$$

## 2.5 Využitie energie vetra na Slovensku

V prvom rade treba definovať veterný potenciál Slovenska. Poloha v strede Európy ho predurčuje na krajinu s nižším veterným potenciálom. Nie je tu totiž možné využiť prímorské prúdenie na pevninu a od pevniny. Priemerná ročná rýchlosť vetra vo väčšine údolných oblastí sa pohybuje okolo 2,5 m/s, čo je pre veternú elektrárňu nedostačujúce. Minimálna rýchlosť vetra pre prevádzkovanie veternej elektrárne je 5 m/s. Túto podmienku spĺňajú najmä horské oblasti Slovenska a niektoré rozsiahlejšie doliny, napr. Podunajská nížina. vid' obr. 2.6. Treba podotknúť, že lokality s rýchlosťou pod 6 m/s sú vo svete považované za podpriemerné. [12]



Obr. 2.6 Priemerné rýchlosti vetra Slovensko [10]

Slovensko už aj tak malý potenciál využíva len minimálne, na jeho území sa nachádzajú len dve veterné elektrárne. Veterný park Cerová a Ostrý vrch, veterný park Skalité v roku 2008 ukončil prevádzku. Prevádzky zobrazuje obr. 2.7. Celkový inštalovaný výkon týchto parkov je od roku 2008 stabilný, na hodnote 3,14 MW. Reálny využiteľný potenciál vyhodnotilo pritom združenie pre veternú energiu Slovenska na 600 MW. Týmto sa Slovensko radí na posledné miesto spomedzi členských štátov EÚ, ktoré veternú energiu zaradili do svojho energetického mixu. Ak by totiž Slovensko využilo svoj potenciál, podiel takto vyrobenej energie by bol 3 % spotreby Slovenska. [13]

Pre porovnanie, Česká republika ma inštalovaný výkon 216 MW (2010), pri vyhodnotenom využiteľnom výkone 900 MW. Z toho vidieť, že pri veľmi podobnej skladbe krajiny je možné veternú energiu využívať v rozumnej miere. [14]



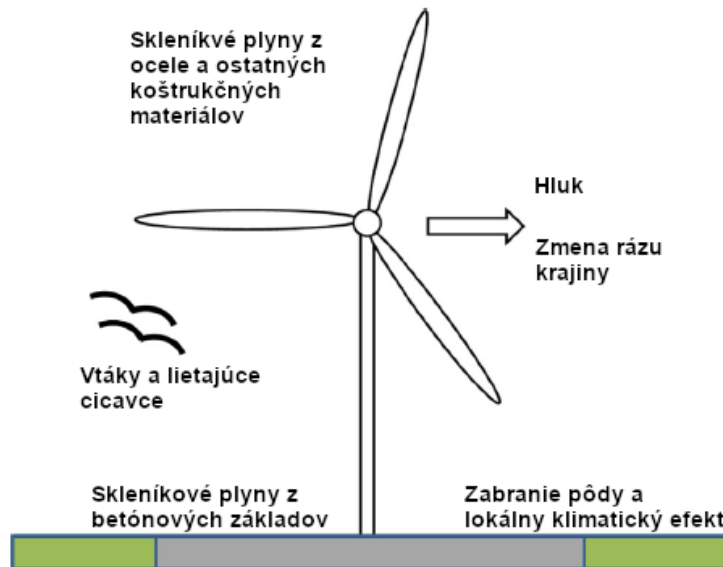
Obr. 2.7 Veterné parky Slovensko [14]

### 2.5.1 Najväčšie veterná elektrárň na Slovensku

Najväčšou veternou elektrárnou je od jej uvedenia, až do dnešného dňa, veterná elektrárň Cerová. Veterný park bol nainštalovaný v roku 2003, od tohto roku je to najväčší realizovaný projekt na Slovensku. Sú tu inštalované 4 veterné stroje od firmy VESTAS, každý o výkone 660 kW, ktoré ročne vyrobí 4 až 5 GWh ročne. Zaujímavosťou je, že turbína obsahuje dva generátory. Malý generátor o výkone 200 kW pracuje do rýchlosti vetra 8 m/s, pri tomto výkone sú otáčky rotora 19,88 ot/min, pri tejto rýchlosti pracuje generátor na úrovni 1200 ot/min. Nad rýchlosť 8 m/s sa zapína veľký generátor o výkone 660 kW, ktorý pracuje pri otáčkach 25,9 ot/min, čo znamená že generátor má 1500 ot/min. K núdzovému odstaveniu elektrárne pomocou brzdy dôjde potom pri rýchlosti vetra 25 m/s. K doprave materiálu potrebného na tento projekt bolo potrebných 27 kamiónov a 200 domiešavačov s betónom. Tento projekt by mal ročne ušetriť až 3270 tCO<sub>2</sub>. [15]

### 3 Environmentálne hľadisko veternej energetiky

Každá forma výroby elektrickej energie vytvára negatívne vplyvy na životné prostredie, či už menšie alebo väčšie. Pri samotnej prevádzke veternej elektrárne nevznikajú v podstate žiadne tuhé odpady, odpadové vody resp. plynné emisie a tiež nedochádza k významnému zaberaniu poľnohospodárskej pôdy. Jediné emisie, ktoré vznikajú pri prevádzke, sú akustické. Aj napriek tomu má veterná energetika mnoho odporcov pre jej vplyv na krajinu, zverstvo a už spomínané akustické emisie. V tejto kapitole budú rozobrané jednotlivé aspekty veternej energie, ktoré vplyvajú na životné prostredie vid' obr. 3.1. [16]



Obr. 3.1 Základné dopady na životné prostredie [17]

#### 3.1 Akustické emisie

Akustické emisie sú jednou z hlavných príčin pre ktorú bývajú veterné elektrárne veľmi často kritizované. Zvukové emisie sú z tohto dôvodu veľmi pozorne sledované. Pri prevádzke veternej turbíny vznikajú dva druhy hluku, mechanický a aerodynamický.

Zdrojom mechanického hluku je pohyb mechanických častí strojovne, pri prevádzke turbíny vzniká hluk hlavne v predovke pôsobením trenia medzi jednotlivými časťami, potom v generátore, ložiskách a ďalších pohyblivých častiach strojovne.

Aerodynamický hluk vzniká pri obtekaní vzduchu okolo listov rotora. Toto obtekanie spôsobuje tzv. svišťanie, ktoré je charakteristickým zvukom pre veterné turbíny. Aerodynamický hluk pokrýva veľké množstvo frekvencií a je silne závislý od samotného návrhu geometrie lopatky. Pri návrhu lopatky je teda nutné tento fakt zohľadňovať. Tiež sa dá predpokladať, že pri využití troch lopatiek s nižším počtom otáčok za minútu, dosiahneme nižších hodnôt hluku, ako pri použití napríklad dvoch lopatiek s vyšším počtom otáčok za minútu.

Tiež je vhodné definovať, kedy sa hluk už považuje za rušivý. Hluk sa považuje za rušivý, keď jeho intenzita prevyšuje hluk spôsobený šumom pozadia o niekoľko decibelov, resp. keď je intenzita hluku veternej turbíny vyššia ako z ostatných zdrojov v okolí. Z tohto dôvodu sú pre rôzne zóny vydané rôzne limitné hodnoty hluku, ktoré môžu zariadenia produkovať vid'. tab. 3.1. [16] [18]. Tieto normy majú zväčša lokálny charakter. V Slovenskej republike sú limity dané štátnou hygienickou normou pre dané lokality vid'. tab. 3.1. V niektorých krajinách dokonca štát presne určuje vzdialenosť, v akej je možné stavať veternú elektrárňu od ľudských obydľí. V rakúsku je to napríklad 1200 m.

Tab. 3.1 Príklad limitov hluku pre rôzne oblasti [16]

Oblasť	Deň [dB]	Noc [dB]
Priemyselné územie	70	70
Priemyselná a obchodná zóna	65	50
Oblasť zmiešaná, centrum, dedinská	60	45
Všeobecná obytná oblasť	55	40
Čisté obytné územie	50	35
Kúpeľné územie, nemocnice	45	35

Veterné turbíny je možné považovať za bodové zdroje hluku až do vzdialenosti 1000 m. V tejto vzdialenosti už hlukové emisie nebudú významné. Hluk sa šíri od bodového zdroja v závislosti na smere vetra a s rastúcou vzdialenosťou stráca svoju intenzitu. Útlm hluku s rastúcou vzdialenosťou je možné vypočítať pomocou nasledujúceho vzťahu. [16]

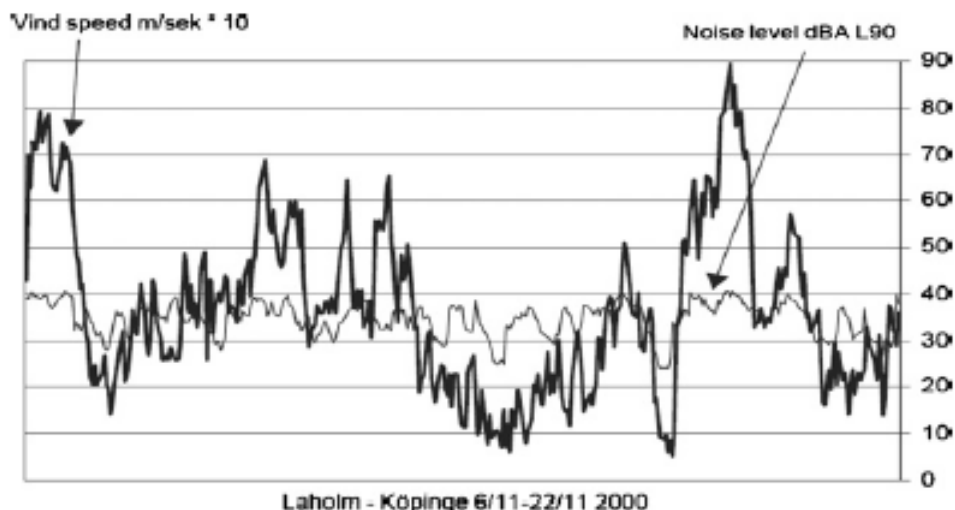
$$L_i = L_p - 20 \log r_i + 10 \log \frac{\varphi_i}{4 \cdot \pi} - \frac{\beta_a \cdot r_i}{1000} \quad \text{Rov.3.1}$$

Treba poznamenať, že rovnica nezohľadňuje komplexné meteorologické podmienky, ktoré by mohli ovplyvniť šírenie hluku, ako napríklad teplota, vlhkosť, hmla, existencia inverzných vrstiev atď. Najmodernejšie veterné turbíny produkujú hluk o intenzite max. 110 decibelov pri náboji turbíny. V tab. 3.2 je zobrazená intenzita hluku vo vzdialenosti od zdroja 750 m v porovnaní s bežnými zdrojmi. Autori tejto práce uvádzajú hodnotu hluku v tejto vzdialenosti 45 decibelov. Spoločnosť GE Power vo svojom článku uvádza pre ich zariadenia vo vzdialenosti 300 m úroveň hluku dokonca 43 decibelov a pri vzdialenosti 500 m len 38 decibelov. Bežná hodnota pozadia sa pohybuje na úrovni 40 – 45 decibelov. Je teda zrejmé že veterná turbína svojím hlukom okolitému obyvateľstvu neškodí, jej vplyv sa totiž stratí v prirodzenom šume pozadia [19]

Tab. 3.2 Porovnanie intenzít hluku [16]

Jav	[dB]	Jav	[dB]
Padajúce lístie	10	Kancelária	60
Šepot	20	Interiér auta	80
Spáľňa	30	Počúvanie hudby	90
Veterná turbína	45	Priemysel	100
Domácnosť	50	Zbijačka	120

Obr. 3.2 ukazuje zmenu intenzity hluku v závislosti na rýchlosti vetra. Meranie bolo uskutočnené 300 m od turbíny pri zmene rýchlostí od 1 – 9 m/s, ktorá bola meraná vo výške 10 metrov nad zemou. Meranie prebiehalo po dobu dvoch týždňov. Následne boli dáta preložené štatistickou krivkou používanou pri meraní hluku. Z experimentu bolo zistené, že už v tejto vzdialenosti turbína vydáva hluk na úrovni bežne používanej chladničky v domácnosti [20].



Obr. 3.2 Rýchlosť vetra vs intenzita hluku [20]

Autori ďalej skúmali nebezpečenstvo vzniku infrazvuku. Infrazvuk je mimo počuteľné spektrum a má škodlivý vplyv pre zdravie človeka a iné živé organizmy. Uskutočnené merania nezistili žiadny emitovaný ultrazvuk vo vzdialenosti 600 m od zdroja [16]. Autori štúdie [21] odporúčajú vzdialenosť aspoň 700 m pre predídenie negatívnych vplyvov infrazvuku.

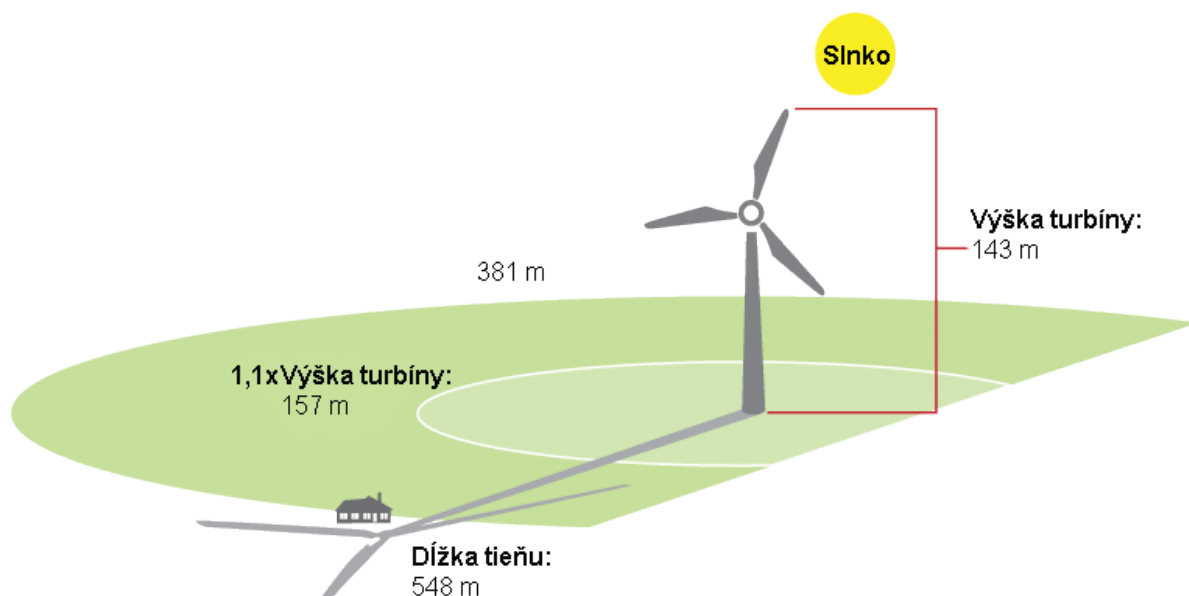
Z vyššie uvedeného teda vyplýva, že obyvatelia by mali byť dostatočne chránení pred škodlivými účinkami spôsobenými emisiami hluku. Odpor obyvateľov býva najčastejšie spôsobený ich zlou informovanosťou o probléme.

### 3.2 Optické emisie

Tak isto ako aj hluk, svetelné emisie môže nepriaznivo vplývať na ľudské zdravie. V horších prípadoch môžu spôsobiť záchvat, bolesť hlavy, stratu rovnováhy, nevoľnosť a dezorientáciu. Je ich možné rozdeliť do dvoch skupín, emisie svetla a emisie tieňa.

Emisie tieňa sa rozdeľujú do dvoch kategórií. Kvázistatické a dynamické tienenie. Pri kvázistatickom tienení vrhá tieň gondola a stožiar veternej turbíny. U dynamického tienenia vytvárajú rotujúce lopatky veternej turbíny tieň, ktorý dopadá na zem alebo okolité budovy, pričom sa tento tieň otáča. Vytvára takzvaný stroboskopický jav. Prvý aj druhý typ vzniká vtedy, keď sa slnko nachádza nízko nad obzorom tj. ráno a večer vid'. obr. 3.3. Pre tento problém majú niektoré veterné stroje dokonca výluku v prevádzke na určité kritické hodiny dňa. Tento jav ale veľmi dobre predikovať v dnešnej dobe už pomocou výpočtovej techniky a tým zamedziť nepriaznivému vplyvu na ľudské obydlia.

Emisia svetla je spôsobená odrazom slnečných lúčov od lopatiek. V takomto prípade dochádza k pravidelnému blikaniu s opakovaním okolo 60 krát za minútu. U malých turbín môže zase dochádzať k stroboskopickému efektu, akoby sa slnečné lúče odrážali od rotujúcich nožov. Tento typ emisie sa môže objavovať prakticky kedykoľvek. Objavuje sa však len zriedkavo za slnečného počasia. K emisii svetla trvajúcej viacero hodín prakticky nedochádza. Významnejšie zdravotné riziko by teda predstavovať nemala. [16] [22]



Obr. 3.3 Emisia tieňa veternej elektrárne [23]

### 3.3 Emisie škodlivých látok

Škodlivé látky produkované pri výrobe elektrickej energie a vypúšťané do okolitého vzduchu, sú stále častejšie riešená téma na rôznych medzinárodných aj lokálnych stretnutiach. Najdiskutovanejším s týchto látok je nepochybne skleníkový plyn CO<sub>2</sub>, ďalej sem patria napr. SO<sub>x</sub> a NO<sub>x</sub>. Mnoho článkov na internete tvrdí, že veterné turbíny majú nulové emisie takýchto škodlivín. Pri samotnej výrobe elektrickej energie je toto tvrdenie pravdivé, avšak veterné turbíny je potrebné vyrobiť, prepraviť a nainštalovať. Táto kapitola sa teda zaoberá škodlivosťami vstupujúcimi do tohto procesu.

Emisie týchto látok sú spojené najmä s výrobou kovov, ktoré sú použité pre konštrukciu veterných turbín a betónu potrebného pri samotnej stavbe. Samozrejme celkové emisie na kW/h sú silne závislé na veľkosti turbíny, jej účinnosti a lokalite, kde je inštalovaná. Turbína inštalovaná na pobreží mora, kde fúka dostatočne silný vietor, bude mať emisie výrazne nižšie, ako turbína inštalovaná vo vnútrozemí, kde vietor dosahuje limitnú hodnotu 5m/s. Tak isto záleží, aký častý servis a životnosť turbín autori jednotlivých prác zohľadňovali. Z tohto dôvodu sa získané hodnoty zväčša pohybujú v určitých intervaloch.

Pre predstavu o množstvách materiálu, ktorý je potrebný na konštrukciu a ukotvenie turbíny v danej lokalite, sú údaje pre vybrané typy turbín priložené v tabuľke 3.3.

Tab. 3.3 Množstvo materiálu a jeho emisie [24]

Vestas V47 660 kW	Hmotnosť [kg]	Materiál	CO <sub>2eq</sub> [kg]
Gondola	21000	Hliník	6,91 · 10 <sup>4</sup>
		Oceľ	1,48 · 10 <sup>4</sup>
Veža	33000	Farba	4,04 · 10 <sup>4</sup>
		Oceľ	8,06 · 10 <sup>3</sup>
Lopatky	1000	Sklolaminát	9,08 · 10 <sup>3</sup>
Základy	354000	Oceľ	4,72 · 10 <sup>5</sup>
		Betón	3,07 · 10 <sup>4</sup>

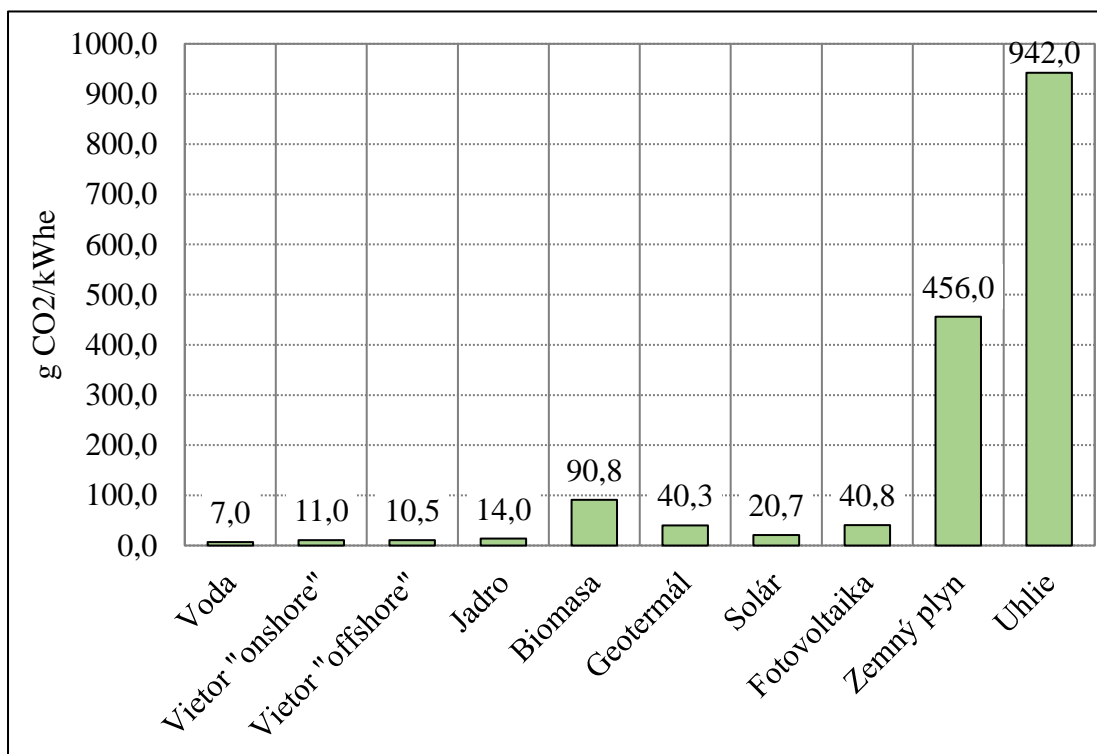
Je vidieť, že sa jedná o značné množstvá materiálu, ktorý je potrebný na zhotovenie turbíny. Pri prepočítaní na životnosť turbíny, ktorá zväčša býva udávaná 20 rokov a zohľadnení množstva vyrobenej energie za toto obdobie, je uhlíková stopa týchto zariadení pomerne nízka.

Potrebné palivo na dopravu takejto turbíny z miesta výroby do danej lokality je samozrejme závislé na vzdialenosti. Pri uvažovanej vzdialenosti 2100 km takáto preprava zanechá uhlíkovú stopu 28498,2 kg CO<sub>2eq</sub>. V tejto hodnote nebolo uvažované množstvo paliva, ktoré sa spáli pri doprave betónu potrebného na základy turbíny.



### 3.3.1 Emisie CO<sub>2</sub>

Oxid uhličitý je plyn, ktorý sa bežne vyskytuje v atmosfére. Je tvorený jedným atómom uhlíka a dvomi atómami kyslíka. Ide o prvok, ktorý je bezfarebný, nehorľavý a je málo reaktívny. Vzniká ako produkt biologických procesov, ako sú dýchanie, kvasenie a najmä horenie. Aj keď tento plyn nie je jedovatý, predstavuje veľký problém, pretože prispieva výrazným spôsobom ku globálnemu otepľovaniu. Mnoho krajín a vedcov tento problém berie veľmi seriózne. Preto boli prijaté rôzne opatrenia, určujúce limitné hodnoty emisií CO<sub>2</sub>. Obrázok 3.4 ukazuje množstvo emisií CO<sub>2</sub>, ktoré vznikne pri výrobe jednej kilowathodiny a tieto hodnoty porovnáva s rôznymi spôsobmi výroby elektrickej energie.



Obr. 3.4 Porovnanie produkovaného CO<sub>2</sub> [Autor]

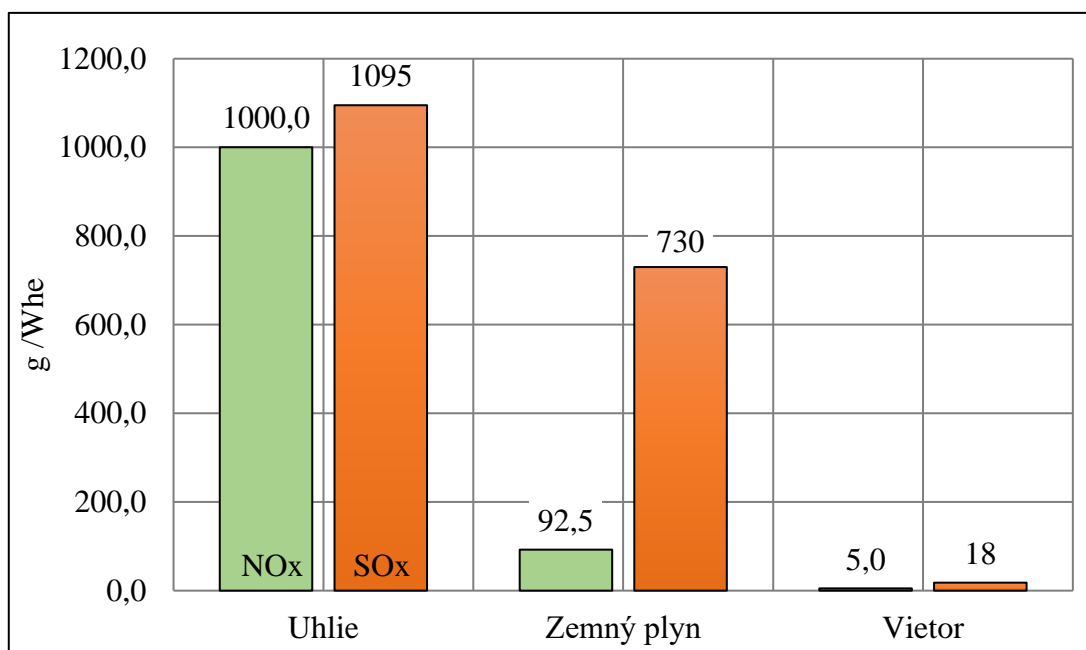
Údaje do grafu 3.4 boli získané z troch nezávislých zdrojov [25] [26] [27]. Hodnoty z jednotlivých zdrojov boli následne spriemerované, preto sa v grafe nenachádzajú žiadne intervaly hodnôt. V grafe je dobre vidieť, že ide o druhý emisne najčistejší zdroj, hneď po vodných elektrárňach. Je ale dobré uvedomiť si nutnosť kombinovať viac ekologických zdrojov energie do funkčných celkov. V opačnom prípade by mohlo dôjsť k situácii, kedy krajina nebude schopná produkovať dostatok elektrickej energie.

Autori ďalej v práci vypočítali, aké množstvo lesa by bolo potrebné, aby absorboval množstvo emisií, ktoré vďaka veternej energii nie je za rok vypustených do ovzdušia. V práci zohľadnili aj hodiny, kedy je turbína mimo prevádzky z dôvodu nedostatku vetra. Bolo zistené, že turbína o výkone 100 kW za rok ušetrí také množstvo emisií, ktoré je schopné absorbovať 24 hektárov zalesnenej pôdy. V práci bolo uvažované, že 1 hektár lesa je schopný absorbovať 3 tony oxidu uhličitého ročne. Veterná turbína pri tejto úspore samozrejme produkuje značné množstvo energie. [20]

### 3.3.2 Emisie NO<sub>x</sub> a SO<sub>x</sub>

Tieto plyny sú nebezpečné z dôvodu, že majú priamy vplyv na zdravie človeka, môžu spôsobovať rôzne ochorenia, ako napríklad respiračné problémy, bolesti hlavy, chronickú únavu a podobne. Pri samotnej prevádzke nedochádza k ich uvoľňovaniu, tieto plyny sa ale, tak isto ako aj CO<sub>2</sub>, vylučujú pri samotnej výrobe a preprave, spaľovaním iných fosílnych palív.

Obrázok 3.5 porovnáva produkciu SO<sub>x</sub> a NO<sub>x</sub>. Hodnoty v grafe boli získané spriemerovaním dostupných rozsahov hodnôt [28]. Pri tejto štúdii autori počítali s priemernou rýchlosťou vetra 6,5 m/s. V celkových emisiách je zarátaná aj samotná montáž zariadení, nie je tu však zohľadnená doprava. V predchádzajúcej tabuľke bolo ale možné vidieť, že doprava nehrá až tak zásadný podiel na produkcii. Je možné teda predpokladať, že tieto hodnoty sa blížila reálnym emisiám pri životnom cykle veterných turbín.



Obr. 3.5 Produkcia NO<sub>x</sub> a SO<sub>x</sub> [Autor]

### 3.3.3 Emisie pevných častíc

Sú to častice, ktoré vznikajú buď prirodzene v prírode pôsobením vetra, vulkánov a pri lesných požiaroch. Vo výrobe elektrickej energie vznikajú hlavne pri spaľovaní uhlíkových palív. Autori práce [16] odhadli zníženie množstva pevných častíc oproti bežnému spaľovaniu uhlia na 40 – 70 g/kWh.

### 3.3.4 Emisie elektro magnetického žiarenia

Prevádzka veterných turbín môže viesť k interferencii zo signálmi televízneho, rádiového a mikrovlnného vysielania. K tomuto javu môže dochádzať dvomi rôznymi spôsobmi.

Turbína pri výrobe elektrickej energie spôsobuje rádio frekvenčný šum o rozsahoch 30 – 200 MHz. Tento šum produkuje elektronika obsiahnutá v turbíne najmä pri systémoch s variabilnou rýchlosťou. V druhom prípade dochádza k rušeniu rádiových vln narážajúcich do lopatiek, tieto vlny sú vplyvom otáčania rotora rozptýlené. Toto môže spôsobiť na televíznych prijímačoch tzv. duchov.

V dnešnej dobe sa tento problém takmer už nevyskytuje. Elektronika obsiahnutá v turbíne je efektívne odtienená. Čo sa týka prerušovania signálu lopatkami, tento problém je aktuálny pri použití ocele alebo iného kovového materiálu. V dnešnej dobe sú lopatky poväčšine konštruované s kompozitných materiálov, ktoré nebránia prechodu týchto vln. [28] [18]

## 3.4 Ostatné vplyvy na životné prostredie

Okrem už spomínaných emisií, veterné elektrárne vplyvajú na okolité prostredie aj inými aspektami. Môžu predstavovať prekážku v migračných trasách vtáctva a netopierov, negatívne ovplyvniť ráz krajiny. Tieto a ďalšie problémy rozoberie nasledujúca kapitola.

### 3.4.1 Vplyv na pôdu

V porovnaní s konvenčnými technológiami veterná energetika požaduje značnú plochu na svoje fungovanie. Tento záber pôdy môžeme rozdeliť do dvoch kategórií. Trvalý záber pôdy a záber pôdy dočasný.

Trvalý záber sa vzťahuje k ploche pod vlastnou elektrárnou a prístupovou cestou vedúcou k veternej farme. Je nutné však poznamenať, že táto zástavba je minimálna a poľnohospodársku pôdu je možné využívať takmer v pôvodnom rozsahu, analogicky ako je tomu pri stĺpoch vysokého napätia. Dá sa povedať, že zabraná plocha je 3 – 5% s celkovej využitej plochy na výrobu elektrickej energie.

Dočasný záber pôdy je plocha potrebná na vybudovanie základov veternej turbíny. Tieto práce sa pohybujú v objemoch 80 – 100 m<sup>3</sup>, ktorú je potrebné odvieť a uskladniť. Ďalším krokom bývajú výkopové práce spojené s pripojením turbíny k sieti elektrického napätia. Dĺžka týchto výkopov sa pohybuje od stoviek metrov až po niekoľko kilometrov, v závislosti od polohy. [16] [17] [18]

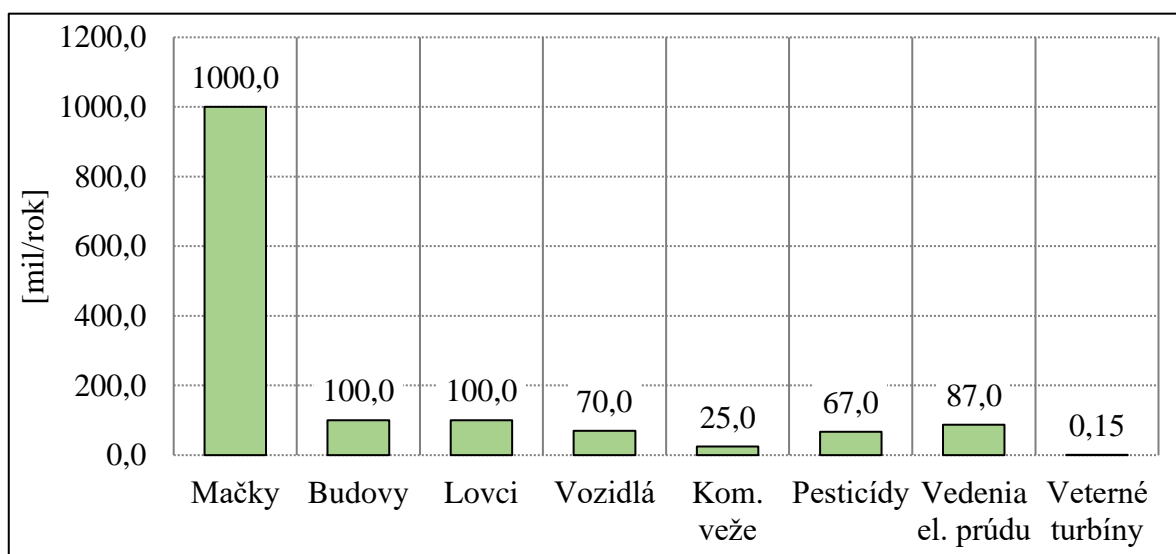
Pri výrobe elektrickej energie rotujúce lopatky okolo seba vytvárajú turbulentné vlny, ktoré môže spôsobovať neprirodzené miešanie spodnej a hornej vrstvy vzduchu v atmosfére. Týmto sa dostáva počas dňa teplý vzduch od zemského povrchu vyššie do atmosféry a chladnejší vzduch zase bližšie k zemskému povrchu, v noci zase naopak. To vedie k miernemu zvýšeniu teploty počas noci. Denná teplota sa však zvyčajne nemení. Autori v práci zaznamenali zvýšenie v meranej teploty o 0,72 °C, prevažne v noci. [16] [17] [18]

### 3.4.2 Vplyv na faunu a flóru

Ako je možné očakávať vplyv na flóru pri samotnej prevádzke elektrárne je viac menej zanedbateľný. Väčší zásah do prírody vzniká pri samotnej realizácii projektu. V tomto prípade je nevyhnutné postupovať podľa príslušných zákonov danej krajiny a požiadať o súhlas s výrubom zelene rastúcej mimo lesa.

Vplyv na faunu býva spravidla zásadnejší. Je potrebné zohľadniť vplyv hluku na hniezdenie vtákov, správanie živočíchov a celkový dosah na druhovú diverzitu v okolí veternej elektrárne. S rozvojom veternej energetiky boli samozrejme normalizované isté postupy, ktoré je nutné dodržiavať, aby sa predišlo nepriaznivým vplyvom.

Jedným s najčastejšie diskutovaných problémov býva ovplyvňovanie prirodzeného prostredia vtáctva. V krajinách s rozvinutejšou energetikou boli vykonané štúdie, skúmajúce pôsobenie veterných elektrární na niektoré druhy. Bolo zistené, že v prvých rokoch prevádzky elektrárne môžu pôsobiť rušivo svojím hlukom na hniezdiace vtáctvo. Po čase okolo 5 rokov sa situáciu normalizovala a hluk sa stal bežnou súčasťou prostredia. V prípade sťahovavého vtáctva je okrem hluku nutné zohľadniť riziko stretu s turbínou pri migrovaní. Pri dobrej viditeľnosti je pravdepodobnosť takmer nulová, riziko vzniká najmä v noci. Pri prvých turbínach sa úmrtnosť pohybovala okolo 8 – 118 vtákov za rok na turbínu. Ďalšími štúdiami správania a zohľadňovaním migračných trás sa tieto čísla v súčasnej dobe pohybujú medzi 0,02 – 0,6 za rok na jednu turbínu.



Obr. 3.6 Porovnanie počtu úmrtí za rok [20]

Obrázok 3.6 zobrazuje porovnanie úmrtia spôsobené rôznymi ľudskými aktivitami a veternými turbínami. Je zrejmé, že množstvo usmrtených vtákov pri výrobe elektrickej energie veternými turbínami nie je veľmi dramatické, v porovnaní s inými ľudskými činnosťami.

Ďalší živočích, ktorý je vo väčšej miere dotknutý prítomnosťou veternej farmy, je netopier. Tento druh bol v prvopočiatoch veternej energie zanedbaný. Súčasnú štúdiu ukazujú dramatickejšie úhyny v lokalitách nachádzajúcich sa v blízkosti lesov, kde sa úmrtia pohybovali až 5,3 – 53,3 netopierov/MW za rok. Pri projektovaní fariem v blízkosti lesov je teda tento fakt nutné brať do úvahy. Konkrétne množstvá úmrtí sú zobrazené v tabuľke 3.4.

Ďalej autori zdôrazňujú nutnosť preskúmania vplyvu offshore elektrární na podmorský život. [17] [16] [20]

Tab. 3.4 Porovnanie úmrtnosti jednotlivých druhov [20]

Jednotka	Vtáci	Dravce	Netopiere
[turbína/rok]	2,3	0,03	3,4
[MW/rok]	3,1	0,04	4,6

### 3.4.3 Dopad na ráz krajiny

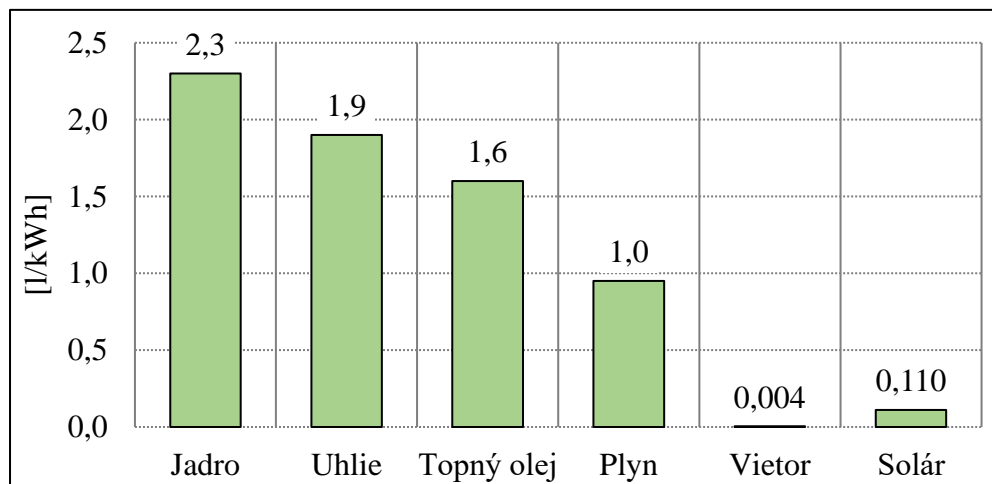
Technické stavby v krajine, ako sú komunikácie, mosty a podobne, sú časťou obyvateľstva a prijímané negatívne, inou zase kladne. Do značnej miery sa tu uplatňuje subjektívny pohľad a estetické kritériá jednotlivca. S rovnakým hodnotením sa stretáva aj umiestnenie veterných elektrární v krajine.

Vplyv veterného parku na vzhľad krajiny je nesporný. V krajinách s rozvinutou veternou energetikou tak samozrejme vznikajú občianske združenia protestujúce proti prítomnosti veterných turbín. Posudzovanie výstavby z estetického hľadiska sa preto stáva čoraz významnejšou súčasťou ich projektovania.

Napríklad najväčší veterný park na Slovensku v obci Cerová, sa teší popularite obyvateľov. Tento park totiž prilákal turistov a rôzne exkurzie, čím sa obec dostala do povedomia. [20] [17] [29]

### 3.4.4 Vplyv na zásoby vody

Pri výrobe takmer všetkých produktov je spotrebované isté množstvo vody, nie je tomu inak ani pri výrobe elektrickej energie. V niektorých rozvojových krajinách, kde by bolo možné využiť veternú energetiku, trpia nedostatkom kvalitnej vody, je teda nutné tento aspekt brať do úvahy. Veterné turbíny samozrejme pri samotnej prevádzke vodu nespotrebovávajú. Dochádza k tomu pri výrobe komponentov potrebných na ich zostavenie. Toto množstvo je znázornené a porovnané s konvenčnými technológiami výroby el. energie v obrázku 3.7. Je vidieť že spotreba v porovnaní s ostatnými technológiami je minimálna. [20]



Obr. 3.7 Dopad výroby el. energie na zásoby vody [20]

## 4 Typy veterných motorov

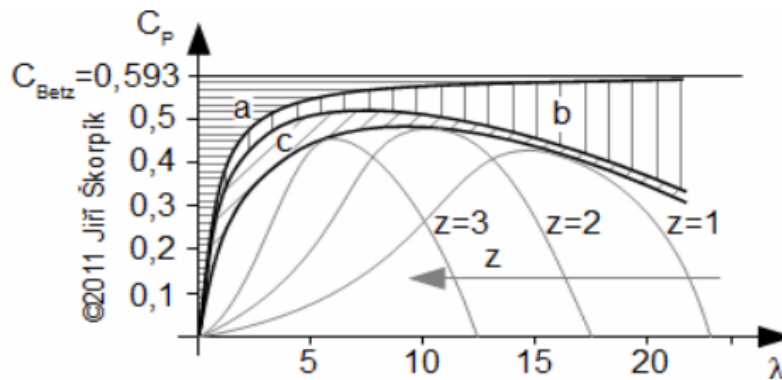
Veterné stroje transformujú kinetickú energiu vetra na energiu práce. Podobne ako všetky zdroje energie, je ich možné rozdeliť podľa rôznych kritérií.

### 4.1 Podľa súčiniteľa rýchlobežnosti

Ide o súčiniteľ, ktorý sa označujem písmenom  $\lambda$ . Jedná sa o bezrozmerné číslo, vyjadrujúce pomer obvodovej rýchlosti na špiči lopatky  $u_{\max}$  a rýchlosti vetra  $c_w$  vid'. rov. 4.1.

$$\lambda = \frac{u}{c_w} [-] \quad \text{Rov.4.1}$$

Pri nižšom súčiniteli rýchlobežnosti je zariadenie schopné pracovať s nižšími rýchlosťami vetra. Z obrázka 4.1 je vidieť, že sa jedná o hodnotu, kedy veterný stroj vykazuje najvyššiu účinnosť. Profilové straty vznikajú pri obtekaní profilu lopatky pracovným médiom. Ďalej pri obtekaní lopatky bez lopatkovej skrine, dochádza za lopatkou k vzniku gradientu tlaku, ktorý iniciuje vznik vírov po celej dĺžke lopatiek. Tieto straty sa nazývajú straty deformáciou prúdovej trubice. Poslednou stratou je potom strata použitím konečného počtu lopatiek.



Obr. 4.1 Vplyv strát na účinnosť  $C_p$  [30]

a – strata deformáciou prúdovnice; b – profilová strata;  
c – strata použitím konečného počtu lopatiek

Hodnota súčiniteľa klesá so stúpajúcim počtom lopatiek rotora a taktiež ho ovplyvňuje šírka a uhol nábehu listov. Rozdelenie veterných strojov podľa súčiniteľa rýchlobežnosti vid'. tab. 4.1. [16]

Tab. 4.1 Rozdelenie podľa súčiniteľa rýchlobežnosti –  $\lambda$ ;

$z$  – počet lopatiek. [16]

Pomalobežné	Stredne rýchlobežné	Rýchlobežné
$\lambda < 1,5$	$\lambda 1,5 - 3,5$	$\lambda > 3,5$
$z = 4 - 40$	$z = 4 - 6$	$z = 1 - 3$

## 4.2 Podľa spôsobu regulácie výkonu

Prvým spôsobom je pasívna regulácia. V tomto prípade sú listy prichytené k rotoru pevne, k regulovaniu výkonu je teda nutné využívať odtrhnutie prúdnic vzduchu od listu rotora. K tomuto javu dochádza pri dosiahnutí maximálnej rýchlosti. Pri prúdení okolo profilu vzniká trenie, ktoré spôsobuje zbrzdzenie vzduchu v medznej vrstve okolo profilu. V dôsledku tohto javu nastane pokles dynamického tlaku v jednotlivých prúdniciach. Ak sa jedná o pokles tlaku pod tlak okolitého prostredia, nastáva spätné prúdenie. To znamená, že nastáva odtrhnutie medznej vrstvy od profilu. Tento jav spôsobuje napríklad zahnutie profilu. Ak takáto regulácia nie je dostatočná, je nutné rotor turbíny mechanicky zbrzdiť hydraulickou brzdou.

Druhým spôsobom je aktívna regulácia. Táto metóda využíva natáčanie celého listu rotora podľa okamžitej rýchlosti vetra tak, aby bol celkový nábeh veterného prúdu v danom okamihu optimálny. Takéto zariadenie je možné používať aj bez prevodovky. [16]

## 4.3 Podľa osy otáčania

Podľa osy otáčania delíme veterné motory na horizontálne a vertikálne. Horizontálne musia vždy smerovať kolmo k smeru vetra, čo spôsobuje nutnosť použitia veterných senzorov a servo motorov. Ich hlavnou výhodou je v súčasnej dobe vyššia účinnosť. Z tohto dôvodu sú v dnešnej dobe najpoužívanejším typom.

Vertikálne veterné turbíny nie je nutné natáčať kolmo k smeru vetra. Tento fakt im dáva výhodu hlavne v lokalitách, kde dochádza k zmene smeru veľmi často. Pri tomto type tiež možnosť umiestnenia generátora a prevodového ústrojenstva na zemskom povrchu značne zjednodušuje a zlacňuje údržbu. Výhodou je tiež, že turbíny je možné umiestniť bližšie k sebe bez toho, aby sa aerodynamicky ovplyvňovali a taktiež produkujú menej hluku. Veľkou nevýhodou však zostáva ich vyššia cena a nižšia účinnosť. [31]

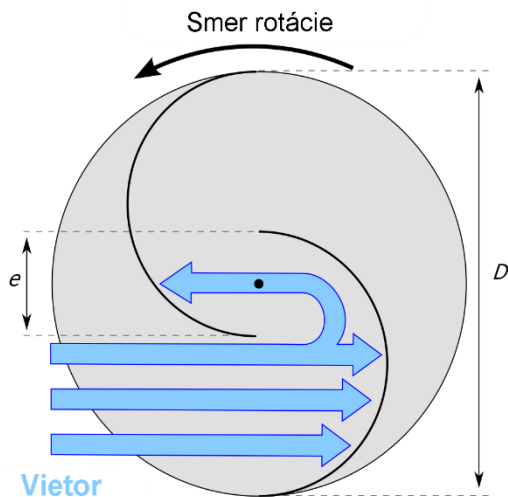
## 4.4 Podľa aerodynamického princípu

Za najdôležitejšie kritérium sa dá považovať aerodynamický princíp. Má totiž pre činnosť veterného motora najväčší význam. Podľa tohto princípu delíme veterné motory na odporové a vztlakové.

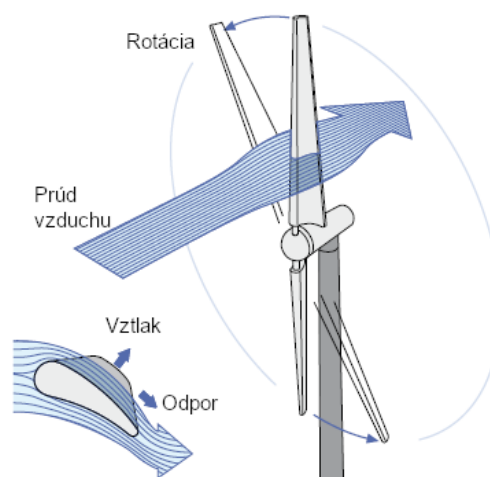
### 4.4.1 Odporové veterné motory

Tento typ patrí medzi najstaršie, môže mať zvislú aj vodorovnú os otáčania. Podstatou je, že plocha postavená do vetra, mu kladie aerodynamický odpor. Prúd vzduchu spomaľuje, pričom vyvoláva silu, ktorá je zvyčajne premieňaná na rotačný pohyb. Prvá funkčná plocha musí mať tvar, kedy je možné dosiahnuť čo najväčší odpor. Naopak prúdenie okolo druhej funkčnej plochy musí vyvolávať čo najmenší odpor.

Asi najznámejším použitím tohto princípu je tzv. Savoniosov veterný motor vid'. obr. 4.2. Najčastejšie sa jedná o polovice valcovej plochy s kruhovou základňou, navzájom sa presahujúce s rôznym pomerom výšok a priemeru rotorov. Lopatkovanie sa vyskytuje aj prizmatické, alebo inak tvarované a profilované, tieto úpravy ale zväčša neprinášajú žiadne zvláštne výhody. Jedná sa spravidla o vertikálne veterné motory. [1]



Obr. 4.2 Savoniosov veterný motor [33]



Obr. 4.3 Princíp aerodynamického vztlaku. [32]

#### 4.4.2 Vztlakové veterné motory

V dnešnej dobe sú najpoužívanejším typom veterných turbín. Pre produkciu rotačného pohybu je využívaná sila, vznikajúca pri obtekaní rotorového listu vzduchom, tzv. aerodynamická vztlaková sila. Táto sila je vyvodzovaná vďaka špeciálne tvarovanému profilu lopatiek, podobne ako je tomu u krídiel lietadla vid' obr. 4.3.

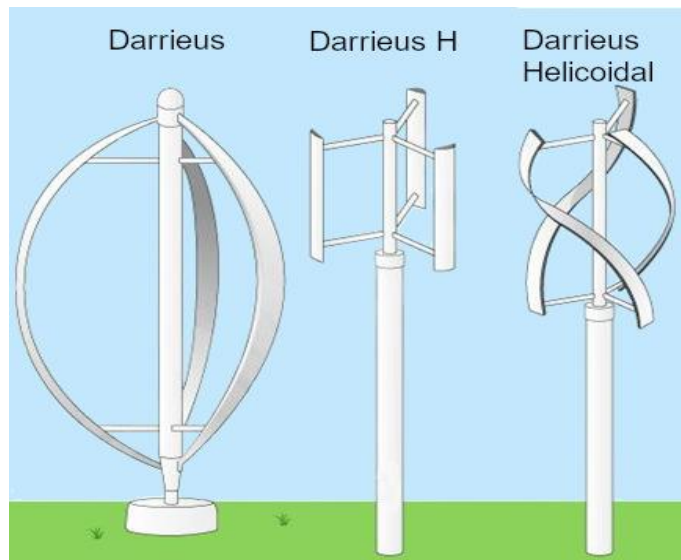
Príkladom pre túto kategóriu sú klasické vrtuľové veterné turbíny s horizontálnou osou otáčania vid'. obr. 4.3. Bežne sú konštruované s tromi lopatkami, podľa požiadaviek na rýchlobežnosť sa tento počet môže ale meniť, od jednej lopatky s protizávažím, až po rotory s veľkým počtom lopatiek (Americký veterný motor). V praxi sa využívajú najmä rotory s tromi lopatkami.



Obr. 4.4 Turbíny s jednou lopatkou[34]

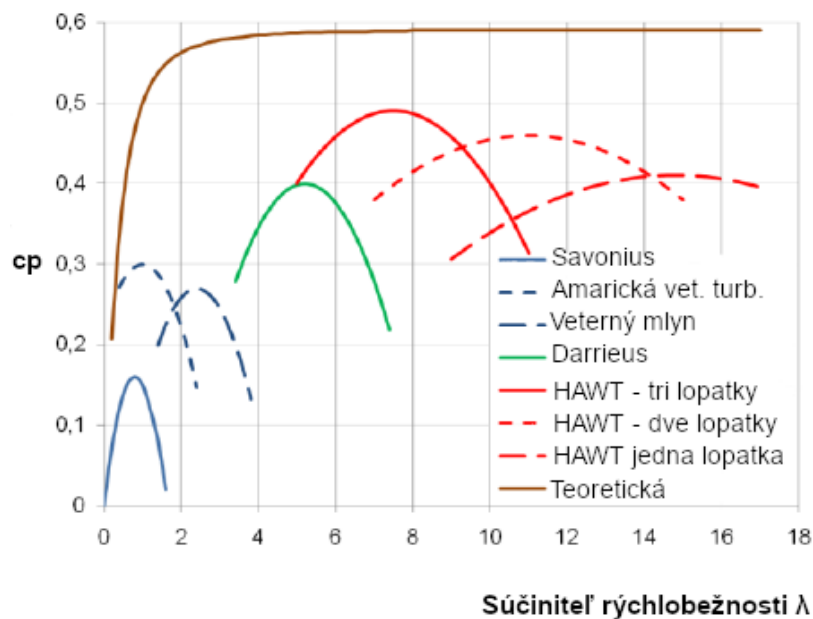


Vztlakové větrné motory je možné zhotovit' aj vertikálnej konštrukcie. Prvá turbína tohto typu bola patentovaná francúzskym inžinierom Darrieusom. Veľkou výhodou je, že takéto zariadenia môžu pracovať bez ohľadu na smer vetra. Rotor má veľmi špecifický tvar, pripomínajúci vajce vid'. obr. 4.5. Možnosti tvarov sú ale rôzne, napr. v tvare písmena H a trojuholníkové usporiadanie. Zaujímavosťou je, že tieto zariadenia zväčša vyžadujú malý generátor k naštartovaniu rotácie. V súčasnej dobe sa dostáva do popredia vylepšená verzia tejto koncepcie „Helica“ veterný motor. [9]



Obr. 4.5 Vertikálne vztlakové turbíny [35]

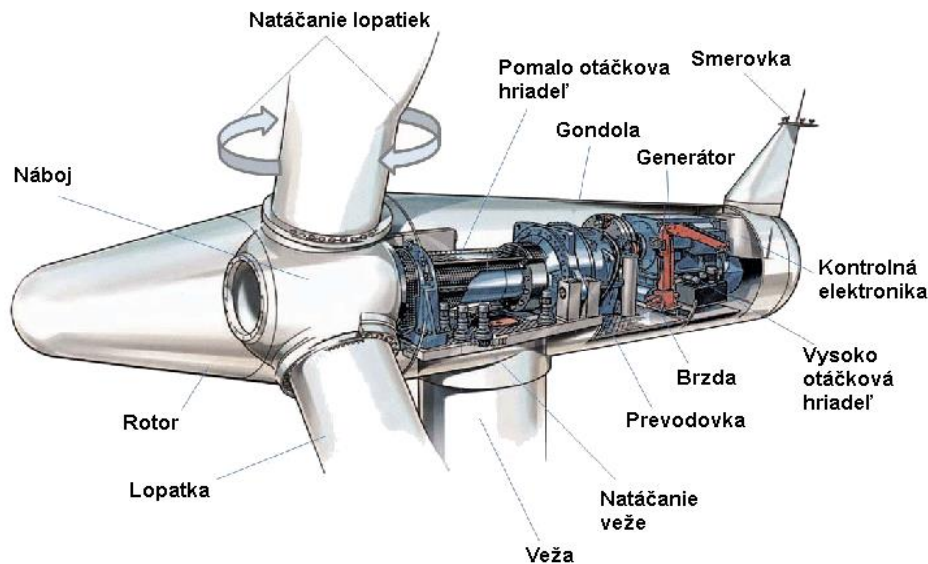
Naledujúci obrázok 4.6 porovnáva účinnosti najpoužívanějších typov turbín. Tu je možné vidieť, prečo sú v súčasnej dobe najpoužívanějšíe práve horizontálne axiálne turbíny, založené na vztlakovom princípe.



Obr. 4.6 Porovnanie účinností veterných motorov [36]

## 5 Komponenty veternej turbíny

Táto kapitola sa zaoberá komponentami, ktoré sú potrebné k fungovaniu veternej elektrárne. K popisu bola vybraná vztlaková horizontálna veterná turbína, pretože v súčasnosti sa jedná o najpoužívanejší typ. Jednotlivé komponenty vid'. obr. 5.1.



Obr. 5.1 Komponenty veternej turbíny [37]

### 5.1 Rotor

Za rotor sa považujú všetky rotujúce súčasti nachádzajúce sa mimo gondoly. Patria sem zvyčajne lopatky rotora, náboj rotora a mechanizmus natáčajúci lopatky. Náboj rotora a mechanizmus natáčania lopatiek reprezentujú bežne vyrábané komponenty v strojnom priemysle. Naopak návrh a výroba lopatiek pripomína viac odvetvie leteckého priemyslu.

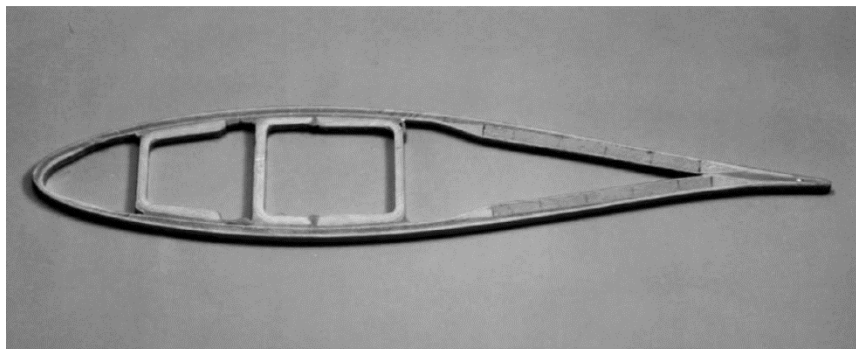
#### 5.1.1 Lopatky

Nakoľko lopatky spadajú do oblasti leteckého priemyslu, pri návrhu nebolo možné použiť už dostupné riešenia, ale návrh bolo nutné vykonať od počiatku. Okrem aerodynamického návrhu sa riešilo aj cyklické zaťaženie lopatiek na ohyb, ktoré je iniciované pri otáčaní lopatiek. Na lopatky tiež pôsobí zaťaženie spôsobené turbulenciami prúdenia a dochádza k starnutiu materiálu v dôsledku poveternostných podmienok. Preto zabezpečenie dostatočnej životnosti lopatiek predstavovalo komplikovanejšiu úlohu, ako u ostatných častí veternej turbíny. Týmto požiadavkám sa samozrejme musel prispôbiť aj materiál. Samotná aerodynamika a tvary profilov sú rozobrané v kapitole 8.

Zo skúseností v leteckom priemysle sú považované za vhodné materiály hliník, titán, oceľ, kompozitné materiály a drevo. Aj keď hliníkové zliatiny používané v leteckom priemysle spĺňajú požadované mechanické vlastnosti, cena na opracovanie lopatiek je príliš vysoká. Tak isto aj titán a vysoko legované ocele nie sú používané pre ich vysokú cenu.

V súčasnosti sa používajú lamináty na rôznych bázach, je ale pravdepodobné že v budúcnosti budú nahradené karbónovými vláknami.

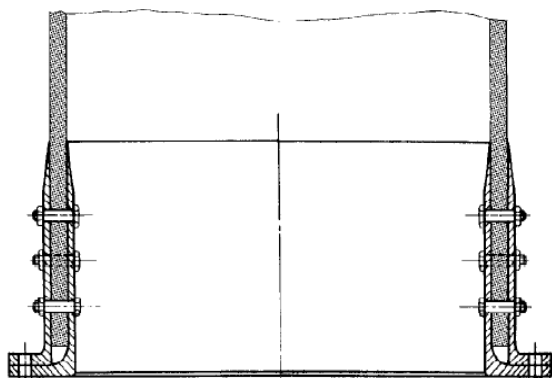
Konstrukcia dnešných lopatiek vychádza zo skúseností leteckého priemyslu. V najjednoduchšom prípade je prierez čepele dutý plášť tvorený hornou a dolnou škrupinou, ktorá má požadovaný aerodynamický tvar. Táto štruktúra dobre znáša zaťaženie na krut, nie je ale dostatočne silná, aby vydržala zaťaženie mimo roviny. Z toho dôvodu sú do vnútra pridávané nosníky, ktoré tento druh zaťaženia preniesú vid'. obr. 5.2. [6] [28]



Obr. 5.2 Konstrukcia lopatky [6]

Ďalším náročným problémom je uchytenie lopatky k náboju rotora, pretože je nutné preniesť sily pôsobiace v kompozitnej štruktúre na ocelové komponenty uchytenia. Táto úloha je zložitá, pretože v tomto mieste je rotor vystavovaný vysokému dynamickému zaťaženiu a je nutné spájať materiály s výrazne odlišnými mechanickými vlastnosťami. V tomto mieste je rotor tiež vystavovaný vysokému dynamickému zaťaženiu. Tento problém sa rieši uchytením ocelevej príruby, tzv. „cross bolts“, lepenými odľahčenými prírubami a lepenými skrutkami.

Riešenie pomocou ocelevej príruby je používané hlavne na starších typoch lopatiek s polyesterovou matricou. Ide o uchytenie, kedy koreň lopatky je uchytený medzi vonkajšou a vnútornou prírubou, ktoré sú navzájom zoskrutkované vid'. obr. 5.3. Pripojenie k náboju je realizované uchytením vonkajšej príruby skrutkami. Nevýhodou tohto spojenia je vysoká hmotnosť a tým pádom vysoké výrobné náklady.



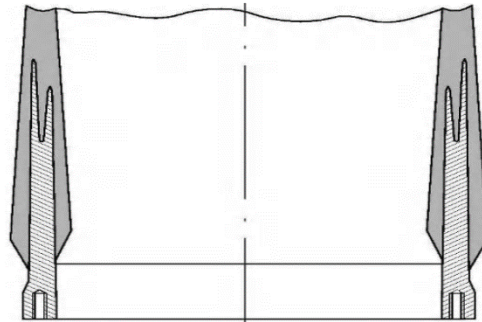
Obr. 5.3 Ocelové príruby [6]



Obr. 5.4 „Cross bolts“ [6]

Spojenie „cross bolts“ bolo pôvodne využívané u helikoptér. Tento spoj bol vyvinutý spoločnosťou MBB (teraz EADS) pre rôzne skúšobné turbíny. Postupom času si tento spoj našiel cestu do komerčného využitia. Podmienkou pre tento spoj je materiál schopný odolávať väčšiemu bodovému zaťaženiu. Spoj je zobrazený na obrázku 5.4.

Alternatívou pre „cross bolt“ je spojenie lepenou vysokopevnostnou hliníkovou prírubou vid'. obr. 5.5. Tento spoj bol vyvinutý spoločnosťou Vestas. Obdobnú variantu používa spoločnosť LM, rozdielom je teleso na ktoré je lopatka nalepená.



Obr. 5.5 Vysokopevnostná hliníková príruha [6]

Najjednoduchšie riešenie z hľadiska dizajnu a úspory hmotnosti predstavuje lepené spojenie skrutiek priamo s koreňom lopatky. Tento typ spojenia sa v súčasnej dobe považuje za riskantný, to sa ale môže zmeniť ďalším vývojom. [6] [28]

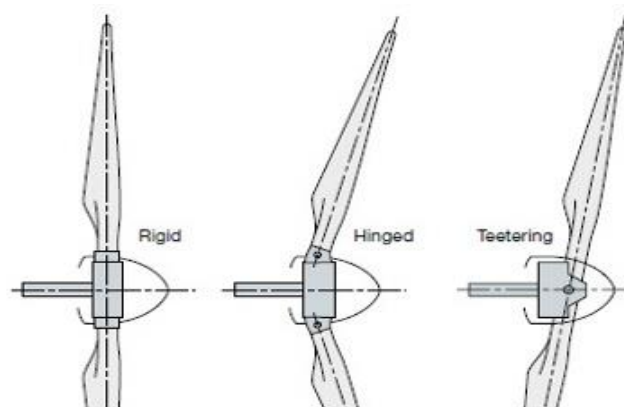
### 5.1.2 Náboj rotora

Náboj je súčasť, ktorá spája lopatky a hlavný hriadeľ veternej turbíny, s prednej časti zväčša býva tzv. „nose“, súčiastka zabezpečujúca aerodynamický tvar veternej turbíny. Používaným materiálom je takmer výlučne oceľ, ktorá je buď zvaraná alebo odlievaná. Poznáme tri hlavné typy rotorov. Vid' obr. 5.6.

Prvým je „Rigid“ náboj. Je určený na držanie hlavných častí, v pevnej polohe vzhľadom k hlavnému hriadeľu. Tento typ je možné skonštruovať zo zabudovaným systémom natáčania lopatiek, iný pohyb, ako otáčanie lopatiek okolo vlastnej osi nie je žiadúci.

„Teering hub“ je náboj používaný pre turbíny s dvomi lopatkami. Pri tomto počte lopatiek dochádza k vzniku aerodynamického zaťaženia, ktoré sa prenáša na hriadeľ. Tento systém tomu zabráňuje pomocou nakláňania lopatiek v smere kolmom na os hriadeľa.

„Hinger hub“ je používaný pre turbíny, ktoré sú orientované v smere vetra, nie proti nemu, ako tomu bežne býva. V takomto prípade je nutné znížiť zaťaženie vznikajúce v silnom vetre. [38]



Obr. 5.6 Rôzne typy rotorov [38]

### 5.1.3 Mechanizmus natáčania lopatiek

Mechanizmus natáčania lopatiek býva uložený v náboji rotora. Umožňuje natáčanie lopatiek okolo vlastnej osi, čo zabezpečuje spravidla dve úlohy. Prvou je nastavovanie uhla lopatky voči vetru, čím dochádza k regulovaniu výkonu a rýchlosti otáčania, tak aby bola dosiahnutá čo najväčšia efektívnosť. Toto sa odohráva zväčša v rozsahu 20 – 25 °.

Druhou úlohou je zabezpečiť aerodynamické brzdenie rotora v prípade nutnosti. Toto zdvíha požiadavku na rozsah uhlov takmer na 90 °, v tomto prípade je totiž potrebné natočiť lopatky smerom, ktorým vietor prúdi.

## 5.2 Gondola

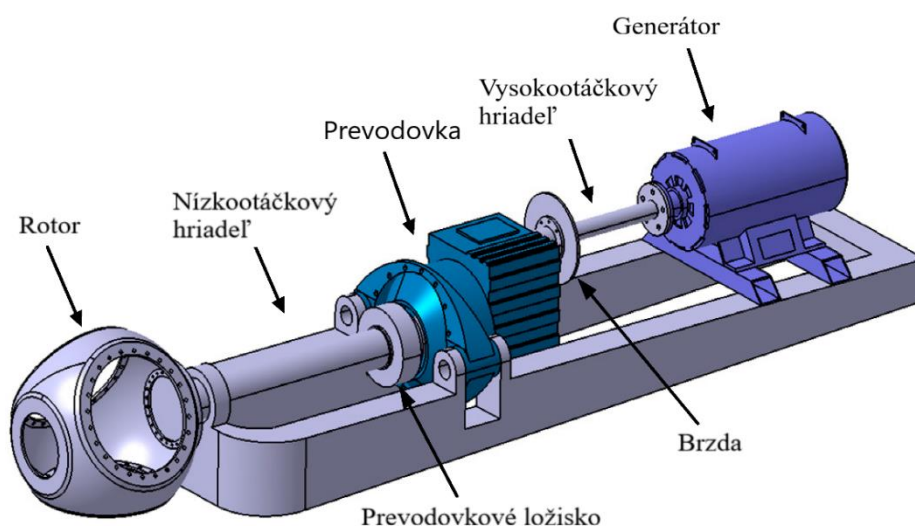
Gondola je kryt pre hlavné komponenty veternej turbíny, skladá sa z hlavného rámu a krytu gondoly.

Úlohou krytu gondoly je chrániť komponenty nachádzajúce sa vnútri pred poveternostnými vplyvmi. Nachádza sa tu riadiaca elektronika, hlavný hriadeľ, prevodovka, brzda, vysoko otáčkový hriadeľ, generátor a systém pre natáčanie gondoly okolo vlastnej osi v prípade zmeny smeru vetra.

Hlavný rám musí poskytovať dostatočnú tuhosť pre uchytenie prevodovky, generátora, núdzovej brzdy a miesto pre uloženie potrebných ložísk, preto býva zhotovený väčšinou z ocele. [39]

### 5.2.1 Prevodovka

Hlavná hriadeľ na ktorý je prichytený rotor turbíny, býva len zriedka priamo napojený na generátor, pri použití viac pólového generátora je to ale možné. Bežnejším riešením je zaradenie prevodky vid' obr. 5.7, ktorá zvyšuje nízke otáčky z rotora turbíny na požadované hodnoty pre súčasné generátory. V niektorých prípadoch môže ísť o prevodové pomery až 1:100, v závislosti od typu generátora. Najčastejšie sú používané planétové a prevodovky s paralelnými hriadeľmi.



Obr. 5.7 Bežne usporiadanie pohonu turbíny [40]

Na prevodovke je vo väčšine prípadov uchytená brzda vid'. obr. 5.7. Jej úlohu je zabezpečiť zastavenie turbíny v prípade extrémnych poveternostných podmienok, kedy je aerodynamická brzda nedostačujúca. V inom prípade by mohlo dôjsť k poškodeniu alebo zničeniu turbíny. Bežne sú používané kotúčové alebo spojkové mechanické brzdy. [38]

### 5.2.2 Generátor

Generátor je komponent, kde dochádza k premene rotačnej energie na elektrickú. Pre veterné turbíny sú používané asynchrónne aj synchrónne generátory.

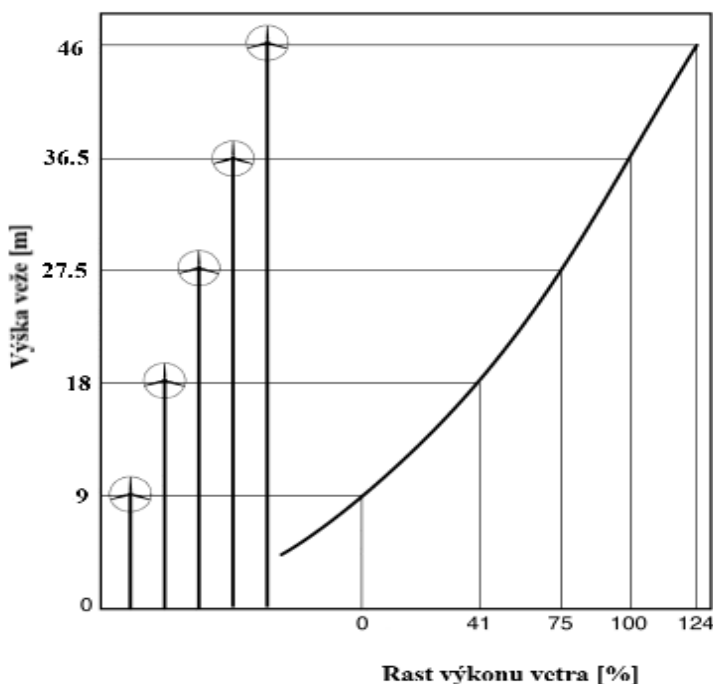
Asynchrónne generátory sú bežným typom generátorov na elektrárenských zariadeniach. Pri tomto type je nutné odoberať zo siete budiace napätie na vytvorenie magnetického poľa na statore tzv. jalový výkon. Výhodou týchto zariadení je ich nižšia cena, spoľahlivosť, jednoduchý rozbeh, pripojenie na sieť a regulácia výkonu. Naopak nevýhodou je malé rozpätie otáčok, kde je možné vyrábať elektrickú energiu a nutnosť použitia prevodovky.

Viac pólové synchrónne generátory budené elektromagnetmi je možné používať bez prevodovky. Viac pólové stroje musia mať ale nutne väčšiu veľkosť a taktiež je nutné použitie meniča frekvencie na plný výkon generátora. Veľkou výhodou je možnosť prevádzkovania elektrárne v širokom rozsahu otáčok a výrazne nižšia hmotnosť gondoly. Nevýhodou je vysoká hmotnosť permanentných magnetov a teda aj cena takýchto zariadení. [16] [38]

### 5.3 Veža

Jedná sa o konštrukciu, ktorá nesie gondolu a rotor veternej turbíny. Poznáme tri typy. Tubulárne, prútové a trubkové oceľové stožiare.

Výška veže je veľmi dôležitá pre využitie potenciálu vetra v danej lokalite. Priemerná rýchlosť vetra sa zvyšuje s rastúcou vzdialenosťou od zemského povrchu. V tejto výške je prúdenie stabilnejšie. Približné zvýšenie výkonu zobrazuje obrázok 5.8.

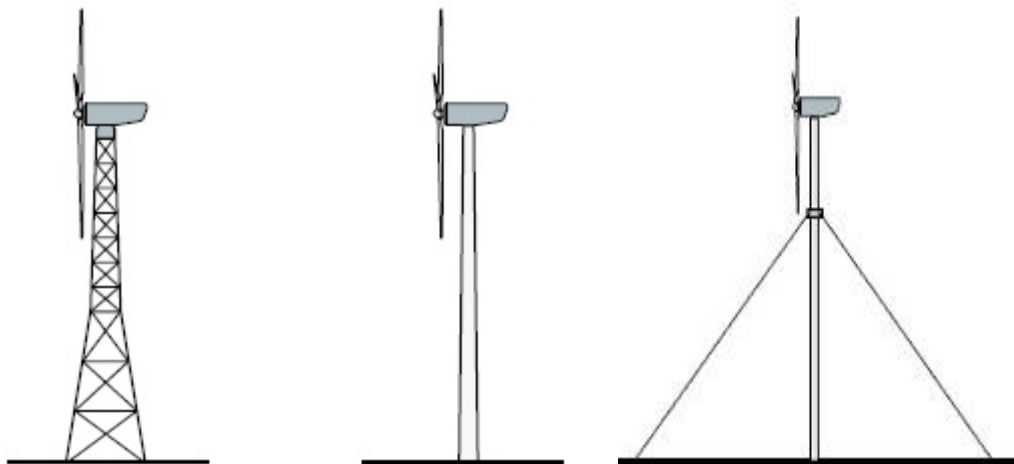


Obr. 5.8 Zmena výkonu vetra s rastúcou výškou veže [41]

Velké turbíny sú v dnešnej dobe inštalované skoro výhradne na vežiach s tubulárnou konštrukciou kónického tvaru. Tento typ je považovaný svojím vzhlľadom za najatraktívnejší, nevyžaduje veľké množstvo skrutkových spojov, ktoré by bolo nutné pravidelne kontrolovať a schodisko, prípadne výťah je možné inštalovať vo vnútornej dutine, čím je takmer znemožnené vyšplhanie nepovolanej osoby ku gondole. Používaný materiál je valcovaná oceľ. Zriedka je možné sa stretnúť aj z betónovou konštrukciou.

Ďalšou možnosťou je veža prútovej konštrukcie. Výhodou predstavuje jednoduchá doprava. Montáž prebieha až na mieste, podobne ako u stožiarov vysokého napätia. Ďalším faktorom, ktorý predstavuje značnú výhodou je cena, pre tento typ je potrebné asi polovičné množstvo materiálu ako na tubulárnu konštrukciu. Nevýhodou predstavuje vizuálne hľadisko tejto konštrukcie.

Pri malých výkonoch je možné použiť klasický oceľový stĺp. Podľa výšky je nutné zväžiť použitie oporných lán pre zaistenie stability vid' obr. 5.9. Výhodou riešenia s lanami je značné zmenšenie základov a možnosť jednoduchého prístupu v prípade potreby servisu, stačí uvoľniť laná a stožiar uchytený na lanách jednoducho nakloniť do vodorovnej polohy. [42]



Obr. 5.9 Používané veže větrných turbín.

Zľava do prava: Prúťová, tubulárna a veža s opornými lanami. [38][6]

## 5.4 Základy

Vežu veternej turbíny je potrebné pevne spojiť so zemským povrchom, tak aby toto spojenie odolalo aj extrémnym poveternostným podmienkam.

### 5.4.1 Onshore základy

Označenie onshore sa používa pre turbíny inštalované na pevnine. V takomto prípade sa jedná spravidla o železobetónové základy zakopané pod zemský povrch. Jednotlivé prevedenia sa líšia podľa veľkosti veternej turbíny a firmy realizujúcej inštaláciu základov.



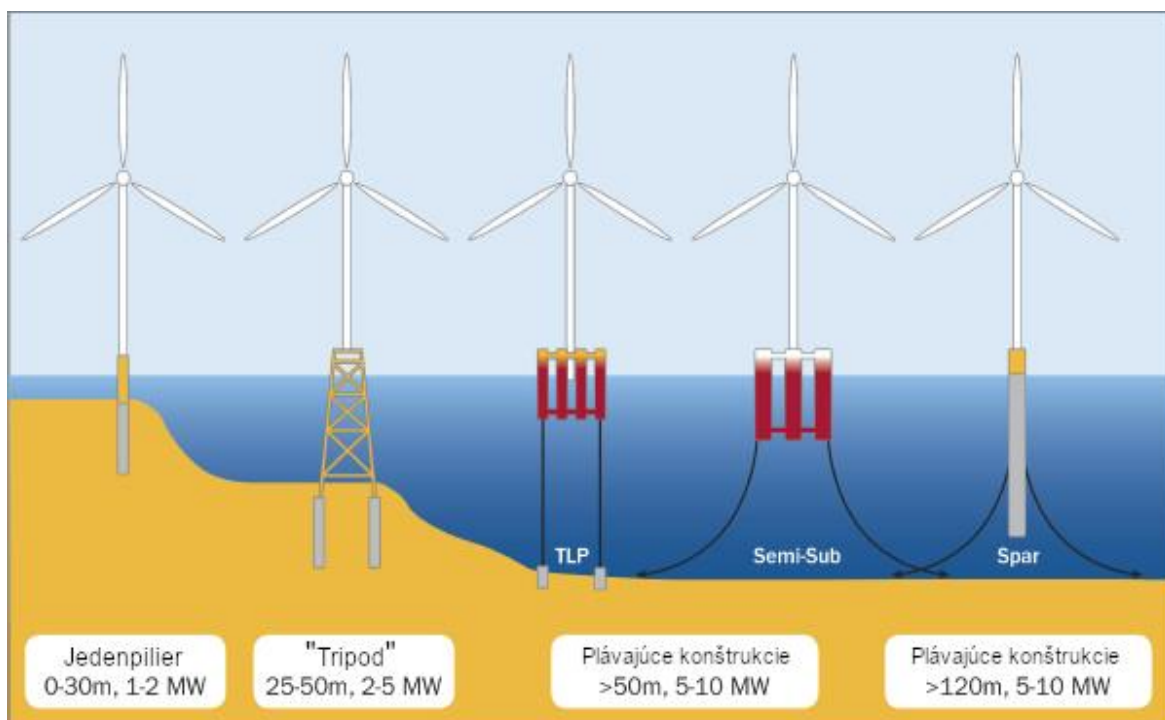


Obr. 5.10 Příklad nesprávného dimenzovania základov [43]

### 5.5 Offshore základy

Je zřejmé že pro turbíny nachádzajúce sa na mori musia základy spĺňať iné požiadavky ako v prípade umiestnenia na pevnine. Najpoužívanejšie typy základov sú na obrázku 5.11. Výber sa uskutočňuje podľa potrebnej hĺbky, výkonu a podložia, do ktorého je ich nutné kotviť.

Najčastejšie používaným typom základov je „monopile“ vid. obr. 5.11. Jedná sa o oceľovú trubicu o priemere až 5 m, ktorá je pomocou hydraulického kladiva zatĺčená do morského dna, do hĺbky okolo 35m. Obdobne sú aj základy typu „tripod“ a „jacket“ kotvené do morského dna pomocou zatĺčenia rôzneho počtu pilot. [43]



Obr. 5.11 Najpoužívanejšie typy offshore základov [44]



## 6 Malé větrné turbíny

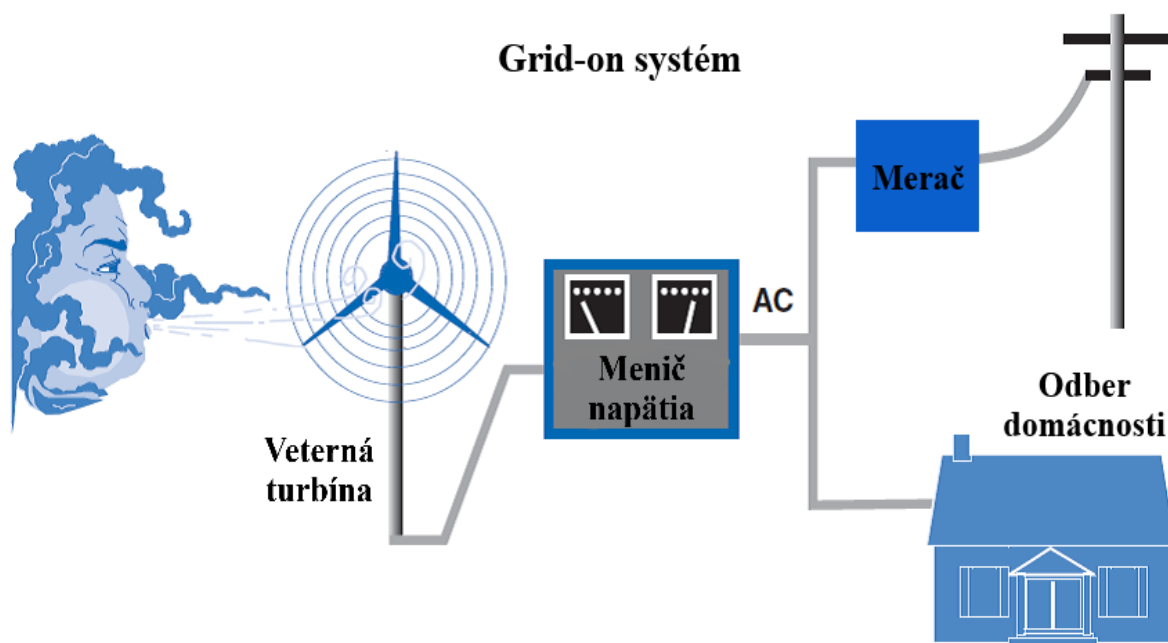
Podľa smernice ministerstva životného prostredia o zariadeniach s maximálnym výkonom 5 kW, alebo priemerom rotora do 3,5 m môžeme hovoriť o mikro elektrárnach. Táto kapitola sa bude zaoberať uplatnením v praxi a prehľadom komerčne ponúkaných zariadení.

### 6.1 Využitie malých větrných turbín

Malé větrné turbíny nachádzajú uplatnenie hlavne na obytných domoch, kde predstavujú alternatívny zdroj energie, alebo predstavujú jediný zdroj energie v lokalitách bez pripojenia na verejnú elektrickú sieť napr. záhradkárske oblasti a pod. Sú tu ale isté odporúčané minimálne rozmery pozemkov a to 40 árov čo nie je málo. Tiež treba zohľadniť možnosť rušenia susedov hlukom, malé turbíny by nemali prekročiť 45 dB, čo nepredstavuje problém ani pre nočné hodiny. Pre posúdenie vhodnosti lokality je samozrejme nutné poznať priemernú ročnú rýchlosť vetra vid' kapitola 6. Zapojenie zariadení je možné realizovať rôznymi spôsobmi.

#### 6.1.1 Systém zapojený do siete „Grid-on“

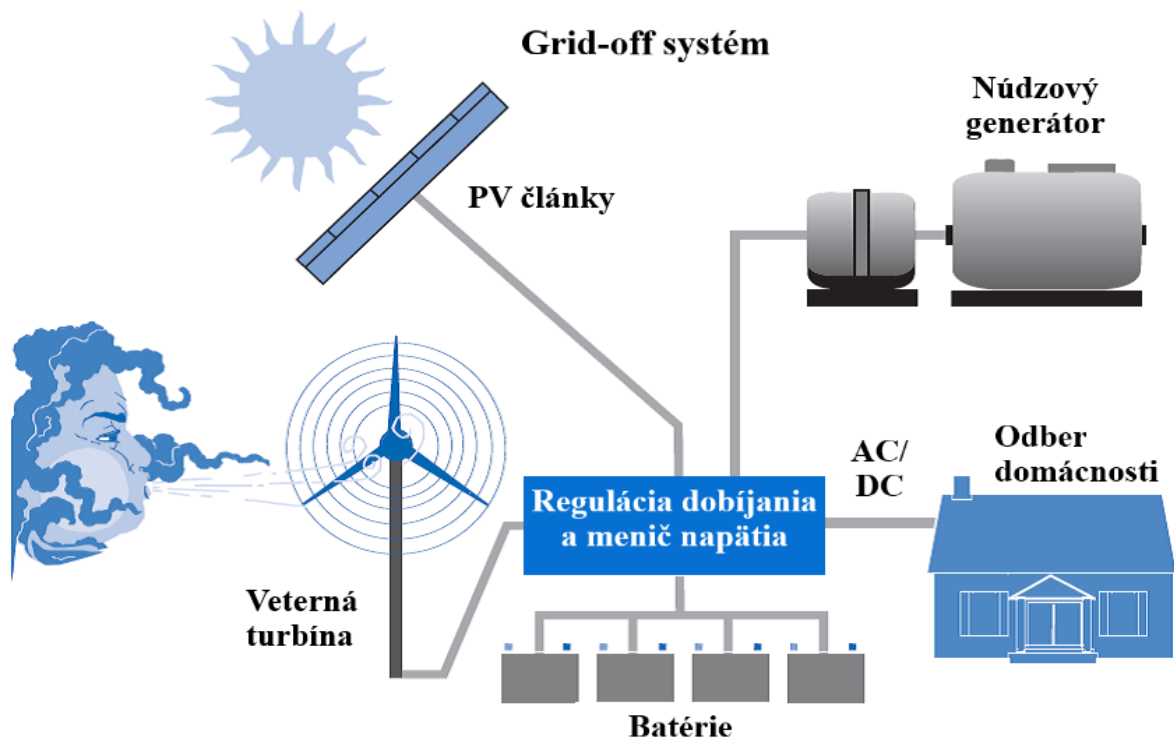
Takto zapojená větrná turbína je pripojená na verejnú elektrickú sieť, prebytočná elektrická energia je predávaná za výkupnú cenu do tejto siete. Ceny sú stanovené každým štátom samostatne, cena v Slovenskej republike je jedna z najnižších spomedzi všetkých štátov v Európskej únii. Je teda vhodné zvážiť použitie grid-off systému. Podrobnejšie je tento problém rozobraný v kapitole 10. Tiež je nutné brať do úvahy, že prevádzkovateľ siete nemusí povoliť pripojenie tohto zariadenia do siete. Tento systém je samozrejme možné spojiť z batériovým úložiskom, elektrická energia sa nepredáva, odber z elektrickej siete nastáva len v prípade potreby. Takéto riešenie je ale značne neekonomické, nakoľko cena batérií je pomerne vysoká a ich účinnosť by spôsobila ďalšie straty v systéme. [45] [46]



Obr. 6.1 Schéma „Grid-on“ systému [46]

### 6.1.2 Systém nezávislý od sítě „Grid-off“

Tento druh systému nie je pripojený k verejnej elektrickej sieti. Prebytočná energia musí byť uskladňovaná v batériovom úložisku dostatočnej kapacity, podľa výkonu a veľkosti objektu. Z tohoto úložiska je potom energia čerpaná podľa potreby. V prípade nedostačujúceho výkonu a vybitia akumulátorov nastupuje elektrický generátor, ktorý je vo väčšine prípadov poháňaný fosílnymi palivami. Tento systém býva veľmi často kombináciou veternej turbíny a solárnych panelov, nakoľko sa veľmi dobre dopĺňajú. V letnom období na zemský povrch dopadá dostatok slnečnej energie. Vtedy je veterná aktivita miernejšia. Naopak v zime na zemský povrch dopadá menej slnečnej energie, veterná aktivita je ale vyššia. Typický príklad „Grid off“ siete je zobrazený na obrázku 6.2. Takýto systém je ekonomickým riešením, ak nie je iná možnosť pripojenia na sieť, prípadne realizácia by bola veľmi drahá. Táto koncepcia je vhodná tiež vtedy, ak užívateľ požaduje vlastnú produkciu el. energie alebo je požadované produkovať energiu s nižšou uhlíkovou stopou. Samozrejme aj tento systém je možné pripojiť na verejnú sieť a na miesto použitia akumulátorov predávať prebytočnú energiu. [46] [47] [48]





Obr. 6.2 Schéma „Grid-off“ systému [46]

## 6.2 Komerčne ponúkané turbíny

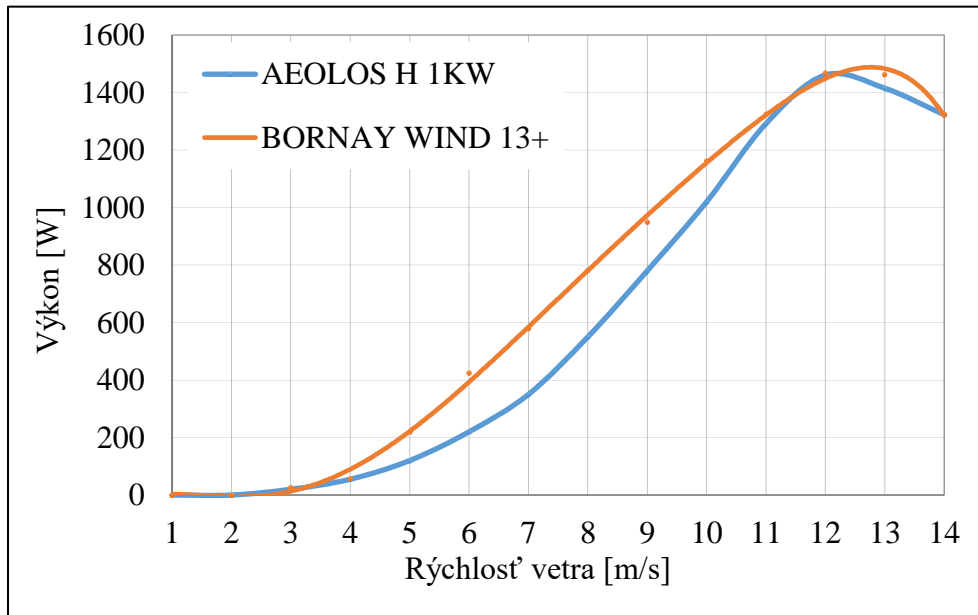
Ponuka týchto zariadení nie je až tak široká ako by sa dalo očakávať. Je pomerne ťažké nájsť dôveryhodného výrobcu. Na trhu ale existuje značné množstvo čínskych zariadení, ktorých kvalitu a uvádzané parametre by bolo vhodné overiť. Tieto čínske zariadenia sú preto z prehľadu vynechané, aj keď ich cena je viac než atraktívna. Podľa ponúkaného rozmedzia výkonu sú vybrané zariadenia čo najbližšie k výkonu 1,2 kW.

Vybrané boli dve veterné turbíny. Tieto zariadenia sú vyrábané zavedenými firmami s dlhoročnými skúsenosťami, v obore malých veterných turbín. Firma Aeolos je na trhu od roku 1986, má na svojom konte 7 patentov v tejto oblasti. Spoločnosť Bornay sa v tejto oblasti pohybuje po dobu 40 rokov. Vybrané bolo riešenie s dvomi a tromi listami rotora. Údaje dostupné na stránkach výrobcov sú uvedené v obr. 6.3 [49] [50]

	<b>AEOLOS H - 1KW</b>	
	<b>Turbína:</b>	
	Počet lopatiek [-]	3
	Nominálny výkon [W]	1000
	Min. rýchlosť [m/s]	3
	Max. rýchlosť [m/s]	25
	Hmotnosť [kg]	60
	Hlučnosť [dB]	30 ( pre 5 m/s)
	<b>Rotor:</b>	
	Priemer [m]	3,2
	Otáčky [ot/m]	350
	Materiál lopatiek	Sklenené vlákna
	<b>Garancia:</b>	
	Životnosť [rok]	20
	Záruka [rok]	5
	<b>BORNAY WIND 13+</b>	
	<b>Turbína:</b>	
	Počet lopatiek [-]	2
	Nominálny výkon [W]	1500
	Min. rýchlosť [m/s]	3
	Max. rýchlosť [m/s]	14
	Hmotnosť [kg]	41
	Hlučnosť [m/s]	-
	<b>Rotor:</b>	
	Priemer [m]	2,86
	Otáčky [ot/m]	600
	Materiál lopatiek	Sklenené vlákna
	<b>Garancie:</b>	
	Životnosť [rok]	-
	Záruka [rok]	3

Obr. 6.3 Základné parametre vybraných zariadení [49] [50] [[51]

Graf 6.4 porovnáva zmenu výkonu turbín v závislosti na rýchlosti vetra. Zaujímavé je, že obe turbíny majú takmer rovnaký nominálny výkon, pričom uvedený je s rozdielom 500 W. Z grafu je tiež vidieť že dvoj listové riešenie od spoločnosti Bornay dosahuje lepšiu účinnosť pri menších rýchlostiach prúdenia. Druhé zariadenie ale dosiahne svoj maximálny výkon rýchlejšie.



Obr. 6.4 Priebeh výkonu v závislosti na rýchlosti vetra [49] [50]

## 7 Výber lokality

Lokalita bola zvolená na základe žiadosti známeho, ktorý požaduje overenie rentability podobnej inštalácie na pozemku nachádzajúceho sa v obci Dedina mládeže vid'. obr. 7.1 (GPS 47.953144 s.š.; 18.007350 v.d.).



Obr. 7.1 Umiestnenie Lokality [51]

Zo satelitnej snímky je možné vidieť, že toto miesto nie je príliš tienené okolitou zástavbou. Členitosť krajiny je tiež priaznivá, nakoľko toto územie spadá do Podunajskej nížiny, ktorá sa radí do území s vyššou priemernou rýchlosťou vetra. Najbližšia metrologická stanica sa nachádza vo vzdialenosti 16,5 km v meste Hurbanovo (GPS 47,8733 s.š; 18,1944 v.d.) vid'. obr. 7.2. V tomto mieste udáva veterná mapa (obr.2.7) ročnú priemernú rýchlosť 3 m/s. Samozrejme boli získané údaje od Slovenského hydrometeorologického ústavu (ďalej len SHMÚ), pravdivosť veternej mapy tak bude overená. Poloha meteorologickej stanice nie je úplne ideálna, nakoľko je situované priamo v obci a je teda čiastočne tienená zástavbou. Tento fakt je nutné brať do úvahy. Pre lepšie posúdenie vybranej lokality, by ale bolo nutné vykonať meranie priamo v mieste inštalácie.



Obr. 7.2 Poloha lokality [52]

## 7.1 Spracovanie získaných hodnôt

Dáta boli získané od SHMÚ pre lokalitu Hurbanovo. Hodnoty rýchlosti vetra boli merané tri krát denne a to o 7:00, 14:00, 17:00, po dobu jedného kalendárneho roka tj. 366 dní vo výške 10 m nad zemským povrchom. Výška nebude korigovaná na inú, nakoľko výrobcovia malých veterných strojov ponúkajú najčastejšie stožiare práve o výške 10 m. Tieto dáta je teda možné spracovať vybranou štatistickou metódou. Pre porovnanie budú použité dve metódy.

## 7.2 Absolútna početnosť („četnosť“)

O získaných hodnotách je možné hovoriť, ako o neroztriedenom štatistickom súbore  $(x_n, \dots, x_n)$ . Je teda zrejmé, že tieto hodnoty je ďalej nutné usporiadať. Usporiadaný štatistický súbor získame pokrytím variačného oboru systémom disjunktných intervalov, potom bude určená četnosť hodnôt nachádzajúcich sa v jednotlivých intervaloch. Táto metóda je vhodná pre základný pohľad na získané hodnoty. [53]

Rozsah štatistického súboru:

$$n = 366 \cdot 3 = 1095 \text{ [-]} \quad \text{Rov.7.1}$$

Variačný ober:

$$x_i \in \langle 0; 10 \rangle \quad \text{Rov.7.2}$$

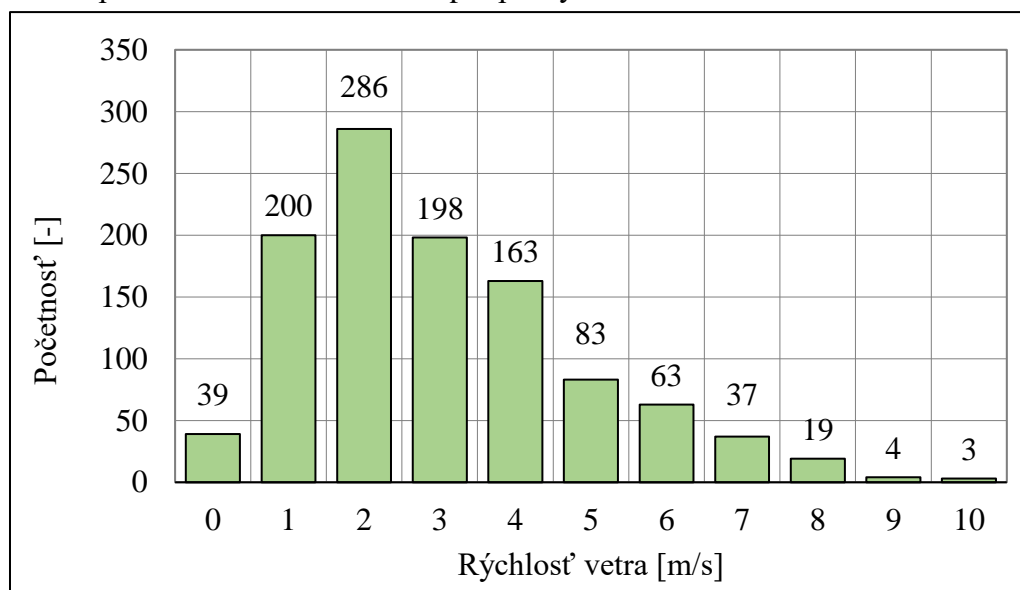
Počet tried:

$$m = 1 + 3,3 \cdot \log(n) = 1 + 3,3 \cdot \log(1095) = 11,03 \doteq 11 \text{ [-]} \quad \text{Rov.7.3}$$

Dĺžka tried:

$$h = \frac{x_n - x_1}{m} = \frac{10 - 0}{11} \doteq 0,91 \text{ [-]} \quad \text{Rov.7.4}$$

Získané početnosti zobrazuje obrázok 7.3. Intervaly volené ako celé čísla, z dôvodu že hodnoty od SHMÚ boli poskytnuté v celých číslach. SHMÚ uvádza, že takto zaokrúhlené údaje sú nimi bežne používané a iné nie sú schopní poskytnúť.



Obr. 7.3 Absolútna početnosť pre zvolenú lokalitu [autor]

### 7.3 Weibullove rozdelenie

Ide o štatistické rozdelenie bežne používané a v literatúre odporúčané pre oblasť veternej energetiky. Je možné uplatniť viac postupov výpočtu alebo použiť špecializované softwary. Pri použití tejto metódy je získaná distribučná funkcia, ktorá poskytuje spojitú informáciu o nameraných hodnotách. Pomocou distribučnej funkcie je možné získať hustotu veternej energie. Čo značne uľahčuje porovnávanie lokalít a určovanie finančnej návratnosti inštalácie.

Distribučná funkcia o dvoch parametroch je daná:

$$f(c_w) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{c_w}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{c_w}{c}\right)^k} [-] \quad \text{Rov.7.5}$$

Kde  $c$  je parameter mierky,  $k$  je tvarový parameter a  $c_w$  je rýchlosť vetra. Parametre  $c$  a  $k$ , je možné vypočítať rôznymi metódami. V tejto práci bude použitá metóda maximálnej pravdepodobnosti. Ide o spôsob výpočtu, kedy je nutné interakčnou metódou odhadnúť výsledok tvarového parametra, s čo z najväčšou presnosťou. Hodnota parametra sa pohybuje spravidla pre všetky svetové lokality v rozmedzí 1,2 – 2,75 pre prvotný odhad pri iterovaní bola volená hodnota 2. Ďalšie iterácie boli vykonané pomocou „riešiteľa“ v programe Microsoft excel. Presnosť bola získaná z rozdielu medzi jednotlivými iteráciami. [54] [55]

Tvarový parameter ( $n$  – počet nenulových hodnôt):

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \cdot \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} = 1,82 [-] \quad \text{Rov.7.6}$$

Presnosť:

$$\Delta = |k_{j+1} - k_j| = 8,99 \cdot 10^{-7} [-] \quad \text{Rov.7.7}$$

Parameter mierky:

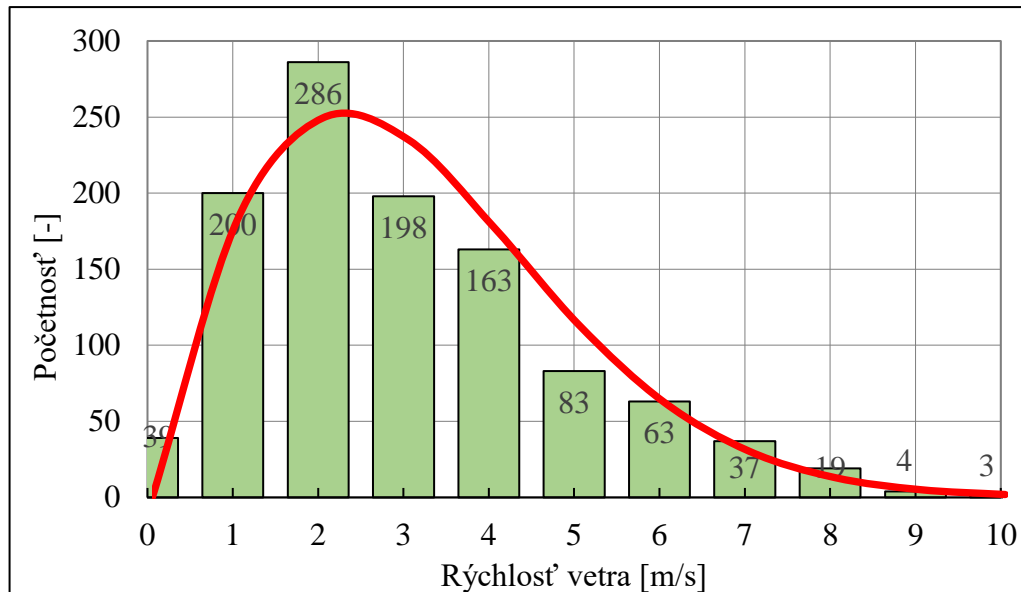
$$c = \left( \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}} = 3,51 [-] \quad \text{Rov.7.8}$$

Výsledná tvar distribučnej funkcie:

$$f(c_w) = \frac{1,82}{3,51} \cdot \left(\frac{c_w}{3,51}\right)^{1,82-1} \cdot e^{-\left(\frac{c_w}{3,51}\right)^{1,82}} [-] \quad \text{Rov.7.9}$$

Takto získaná distribučná funkcia poskytuje spojitú informáciu o rýchlostiach na zvolenej lokalite. Obrázok 7.4 ukazuje porovnanie absolútnej početnosti a distribučnej funkcie. Krivka distribučnej funkcie bola získaná, dosadením rýchlostí od 1 m/s do 10 m/s. Čo znamená, že zobrazuje celý rozsah rýchlostí skúmanej lokality. Následne bola pre násobená počtom hodnôt 1095 pre lepšie porovnanie údajov.





Obr. 7.4 Porovnanie distribučnej funkcie a absolútnej početnosti [autor]

#### 7.4 Výpočet hustoty energie

Pri pohľade na obrázok 7.4 je zrejmé, že priemerná rýchlosť na zvolenej lokalite je pomerne nízka a zďaleka nedosahuje minimálnych požadovaných hodnôt tj. 5 m/s. Pri samotnom geometrickom návrhu lopatky to ale prekážať nebude, nová lokalita tak hľadaná nebude.

Pre porovnanie jednotlivých lokalít sa v obore veternej energetiky používa hustota energie pre zvolené časové obdobie. Nakoľko získané údaje sú v rozmedzí jeden kalendárny rok, toto obdobie bude jeden rok. Výkon je možné vypočítať podľa rovnice 2.4, ako sumu jednotlivých denných priemerných rýchlostí. Hustota vzduchu bola zvolená na základe priemernej ročnej teploty 11 °C a nadmorskej výšky 109 m.n.m. Hodnota hustoty je podľa portálu TZB info potom 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Pre získanie hustoty energie je nutné prenásobiť tieto hodnoty dĺžkou jedného dňa v sekundách tj. 24·60·60. Takto získaná hodnota prezentuje maximálne množstvo energie, ktoré je možné získať za jeden kalendárny rok na ploche 1 m<sup>2</sup>. [54] [55] [56] [57]

Hustota energie:

$$E = \sum_{i=1}^n P_w \cdot \Delta t = \left( \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n c_w^3 \right) \cdot \Delta t = 1,25 \cdot 10^9 \text{ [J/m}^2 \cdot \text{rok]} \quad \text{Rov.7.10}$$

$$E = \frac{1,25 \cdot 10^9}{3600 \cdot 1000} = 346,41 \text{ [kwh/rok]} \quad \text{Rov.7.11}$$

Pre výpočet hustoty energie podľa Weibulla je tak isto použitá základná rovnica výkonu 2.4. Táto rovnica je prenásobená so získanou distribučnou funkciou.



Získaný tvar potom vyzerá nasledovne.

$$P_{weibull} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} c_w^3 \cdot f(c_w) \cdot d_v \quad [W/m^2] \quad \text{Rov.7.12}$$

Po úprave:

$$P_{weibull} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w^3 \cdot \Gamma \cdot \left(1 + \frac{3}{k}\right) = 39,47 \quad [W/m^2] \quad \text{Rov.7.13}$$

Kde  $\Gamma$  je gamma funkcia. Tento problém bol riešený pomocou softwaru wolfram alpha. Ďalej je nutné prepočítať takto získanú hodnotu na obdobie jeden rok. To bolo vykonané vynásobením tejto hodnoty počtom sekúnd v jednom roku tj.  $366 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60$ .

$$E_{weibull} = P_{weibull} \cdot \Delta t = 1,248 \cdot 10^9 \quad [J/m^2 \cdot rok] \quad \text{Rov.7.14}$$

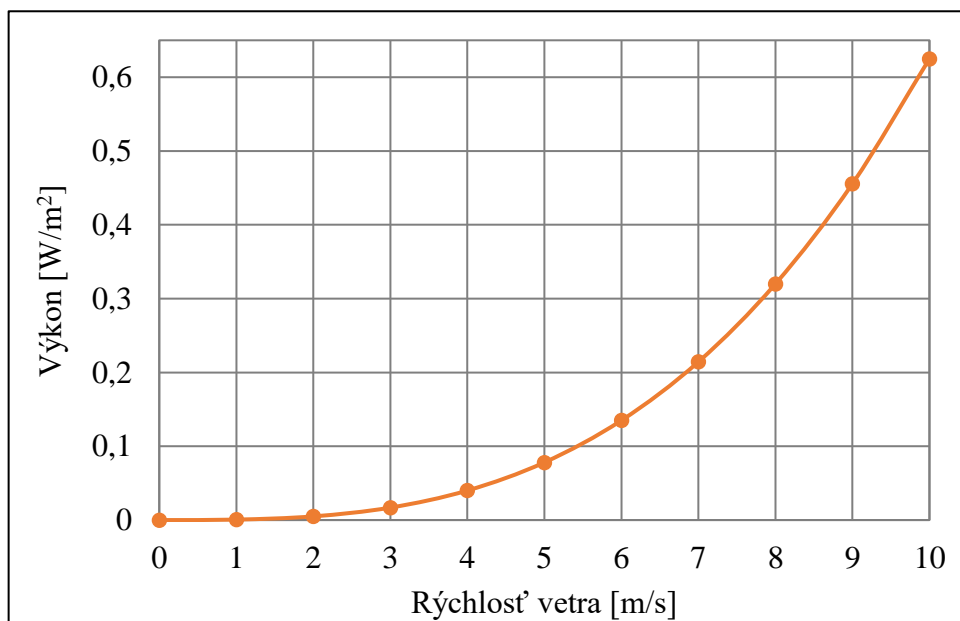
Prevod na kWh:

$$E_{weibull} = \frac{1,248 \cdot 10^9}{3600 \cdot 1000} = 346,67 \quad [kWh/m^2 \cdot rok] \quad \text{Rov.7.15}$$

Takto získaná hodnota sa mierne líši od výsledku z rov.7.11. Je to pravdepodobne spôsobené tým, že ide o náhradnú distribučnú funkciu, ktorá namerané údaje zjednodušuje pre vytvorenie spojitej krivky. Každá štatistická metóda má samozrejme svoju mieru nepresnosti. Tento rozdiel je ale minimálny.

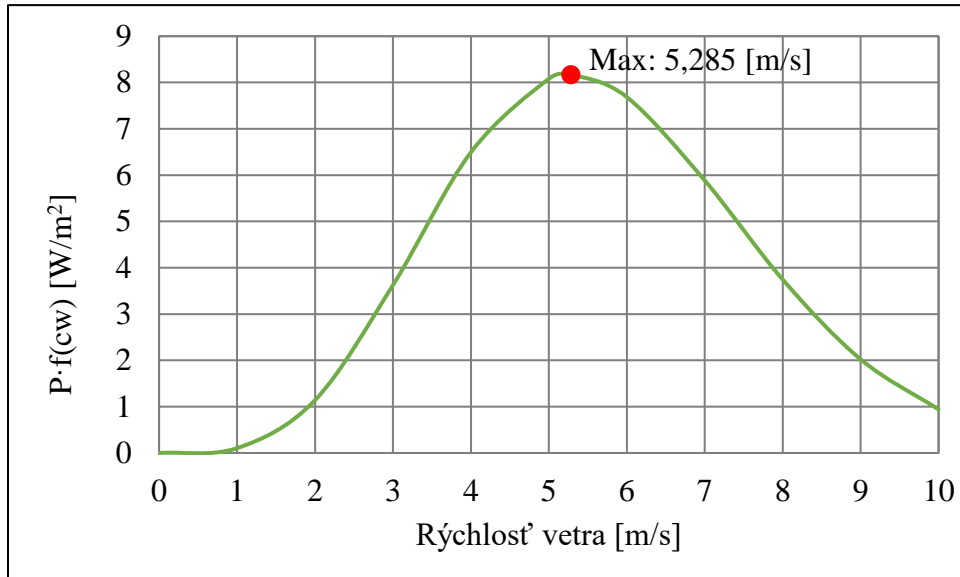
## 7.5 Výpočet návrhovej rýchlosti

Pri návrhu aerodynamiky lopatiek veternej turbíny je veľmi dôležité zvoliť správnu rýchlosť, na ktorú budú lopatky počítané. Je totiž potrebné nájsť prienik maximálneho výkonu vetra, ktorý je opäť počítaný podľa vzťahu 2.4 a početnosti výskytu vetra za zvolené obdobie. Takto bude nájdená rýchlosť, pri ktorej bude vyrobené maximálne množstvo energie za obdobie jeden rok. Obrázok 7.5 zobrazuje výkon pri rôznych rýchlostiach.



Obr. 7.5 Rast výkonu s rastúcou rýchlosťou [autor]

Súčinom distribučnej funkcie rov. 7.9 a rovnice výkonu (rov.2.4), vznikne krivka zohľadňujúca početnosť prvkov v štatistickom súbore a množstvo výkonu, ktoré je možné pri jednotlivých rýchlostiach vyrobiť. Hodnota rýchlosti v maxime tejto krivky bude braná ako návrhová rýchlosť pre ďalšie výpočty.



Obr. 7.6 Ekonomická rýchlosť vetra [autor]

## 8 Aerodynamický návrh podľa teórie lopatkovej mreže – krútené lopatky

Postup výpočtu je odvodený pomocou webu Ing. Jiřího Škorpíka Ph.D [30] a knihy Lopatkové Stroje od Jaroslava Kadrnožku [58].

### 8.1 Postup výpočtu

Postup výpočtu spočíva vo zvolení odhadovanej účinnosti lopatiek  $c_p$ . Pomocou tejto odhadnutej hodnoty je možné vypočítať maximálny polomer lopatiek. Z odvodených vzťahov je následne vypočítaná geometria lopatiek a zistená nová hodnota účinnosti  $c_p$ . Pomocou tejto hodnoty bol zopakovaný celý postup výpočtu. Bol tak získaný nový maximálny polomer a geometria lopatiek. Výsledné hodnoty sú uvedené v tab. 8.1.

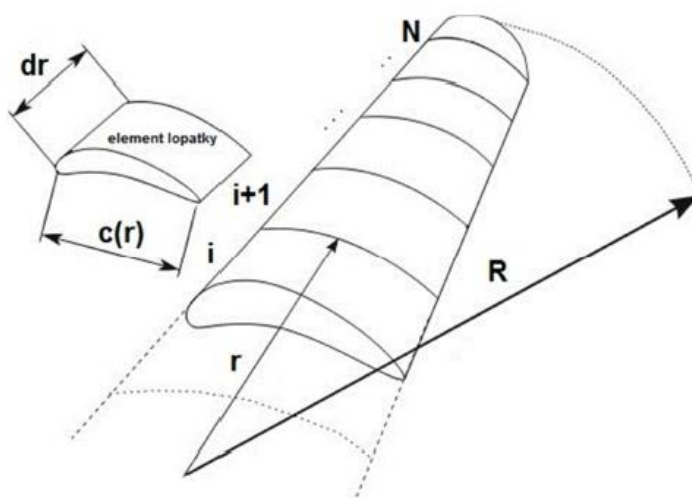
Overenie postupu bolo vykonané pomocou vzorového príkladu, dostupného na webe Ing. Škorpíka Ph.D. Postup bol použitý rozdielny, z dôvodu ľahšieho prispôsobenia pre výpočet prizmatických lopatiek. Po porovnaní výsledkov oboch postupov, boli dosiahnuté totožné výsledky, je ho teda možné považovať za správny.

### 8.2 Teória osamoteného profilu

Pri riešení prúdenia v lopatkových strojoch sú používané poznatky aerodynamiky a termodynamiky. Rozvinutie poznatkov s týchto odvetví viedlo k vzniku vednej disciplíny nazývanej vnútorná aerodynamika. Postupne boli odvodené tri typy teórií, ktoré sú používané k riešeniu aerodynamiky lopatkových strojov.

Jednou z týchto teórií je teória lopatkovej mreže. Vychádza z predstavy lopatkovej mreže v ktorej sú lopatkové profily vhodne usporiadané. Podľa pomernej rozteče prejde táto teória na klasickú jednodimenzionálnu teóriu, alebo na teóriu osamoteného profilu. Pre lopatkové stroje s malým počtom lopatiek je používaná práve teóriu osamoteného profilu.

Tento postup vychádza z poznatkov leteckého priemyslu, z teórie krídla a listu vrtule. Pri tomto postupe je možné lopatku rozdeliť na  $N$  elementov (viď. obr. 8.1). Pri výpočte je uvažované, že jednotlivé elementy sa navzájom neovplyvňujú.

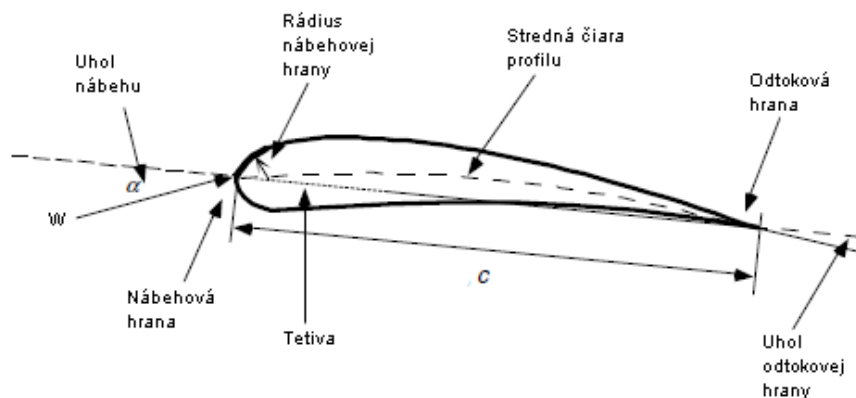


Obr. 8.1 Rozdelenie na elementy.  $c$  – dĺžka tetivy [59]

Sily pôsobiace na jednotlivé elementy je potom možné určiť pomocou vztakového a odporového koeficientu. Tieto koeficienty je nutné získať experimentálne pre každý profil. Ich hodnota sa mení v závislosti na nábehovom uhle  $\alpha$ , bližšie viď. kap 8.3. [59]

### 8.3 Výber aerodynamického profilu

Aerodynamické profily sú štruktúry zo špeciálnym geometrickým tvarom, vďaka ktorému generujú mechanickú silu. Táto sila je generovaná pri relatívnom pohybe profilu a okolitej tekutiny. Prúd vzduchu nad hornou časťou lopatky je zrýchľovaný, v dôsledku čoho dochádza k poklesu tlaku. Táto strana lopatky je nazývaná sacia. Naopak na spodnej strane lopatky dochádza k zvyšovaniu tlaku, ide teda o tlakovú stranu lopatky. Základné parametre sú zobrazené na obr. 8.2.



Obr. 8.2 Základné tvarové parametre [28]

Najdôležitejšie parametre určujúce kvalitu aerodynamického profilu sú, vztakový ( $C_l$ ) odporový koeficient ( $C_d$ ), ktoré určujú schopnosť profilu produkovať vztlak a veľkosť odporových strát. Sú definované nasledovne.

Vztakový koeficient:

$$C_l = \frac{\frac{F_l}{r}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c} [-] \quad \text{Rov.8.1}$$

Odporový koeficient:

$$C_d = \frac{\frac{F_d}{r}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c} [-] \quad \text{Rov.8.2}$$

Hodnoty týchto koeficientov sú získavané experimentálnym meraním v aerodynamickom tuneli na skúmanom profile. Oba koeficienty sú závislé na type prúdenia, je potrebné rozlíšiť, či ide o turbulentné alebo laminárne prúdenie, tieto javy charakterizuje Reynoldsovo číslo.

Reynoldsovo číslo:

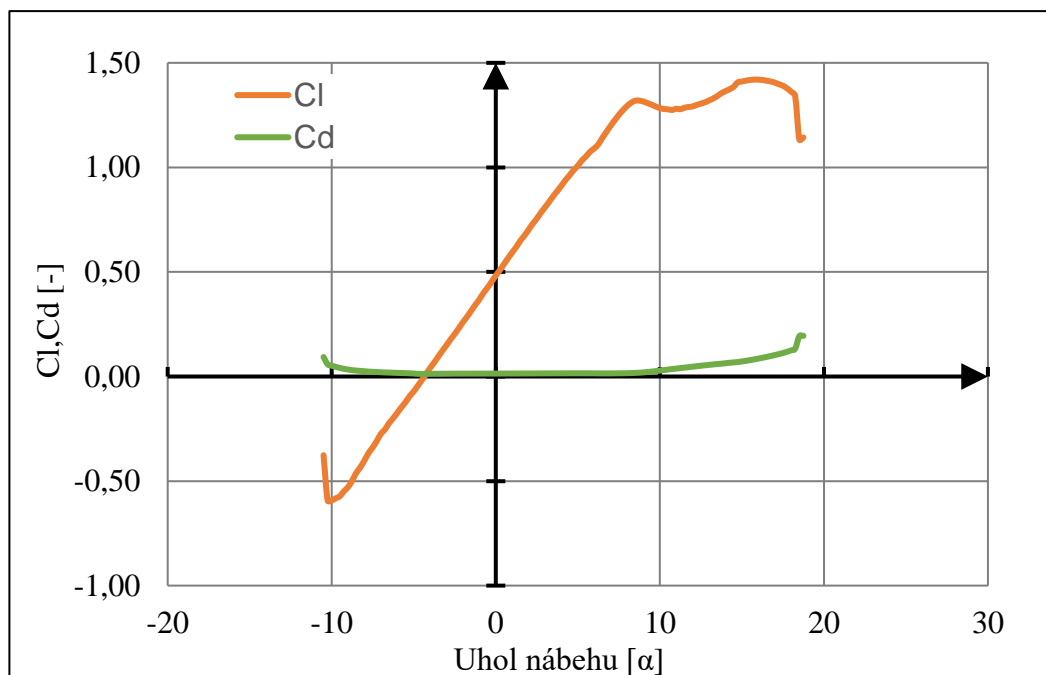
$$Re = \frac{w \cdot c}{\nu} [-] \quad \text{Rov.8.3}$$

Vo vzťahu 8.15 sa vyskytuje dĺžky tetivy  $c$ , nie je teda možné hodnotu vypočítať. Z tohto dôvodu je nutné hodnotu zvoliť a po ukončení výpočtu overiť. Ak to bude nutné, výpočet sa zopakuje.

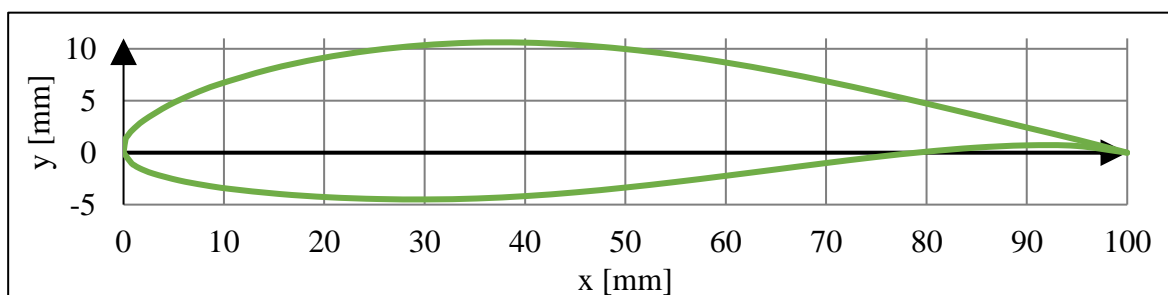
Pre správnu voľbu profilu je nutné brať do úvahy stratu vlastností vplyvom nalepovania nečistôt, na nábežnú hranu a pevnostné požiadavky, ktoré sú odlišné od bežných leteckých profilov. Z tohto dôvodu bola vyvinutá špeciálna rada pre veterné turbíny s označením NACA 6. V tejto práci teda bolo vyberané práve z týchto profilov.

Hodnota reynoldsovho čísla bola zvolená podľa literatúry na  $Re = 200\,000$ . Následne boli aerodynamické aj geometrické parametre získané z databázy profilov [60].

Dáta pre vybraný profil NACA 63(2)-615:

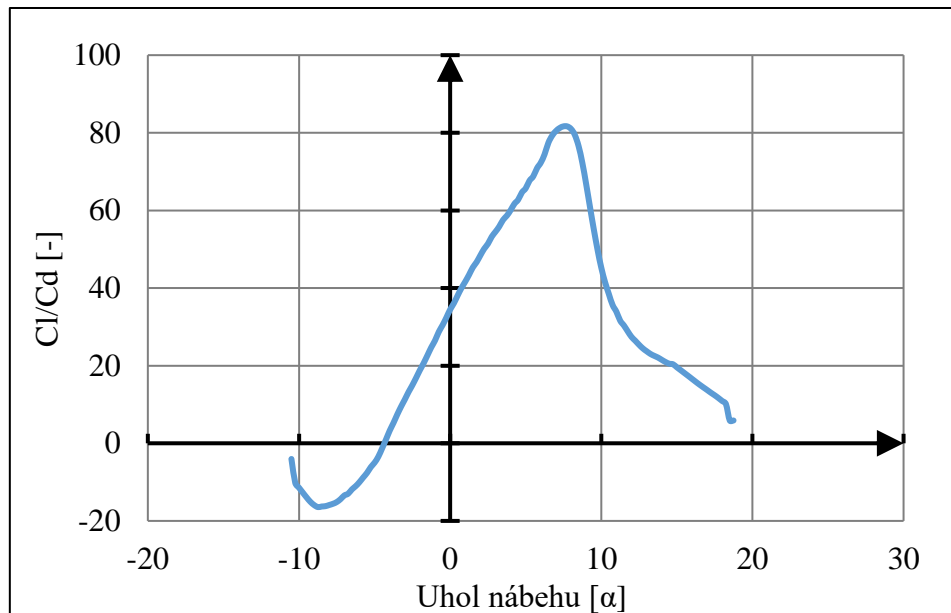


Obr. 8.3 NACA 63(2)-615 – Koefficienty  $C_l$  a  $C_d$  pri zmene  $\alpha$  [60]



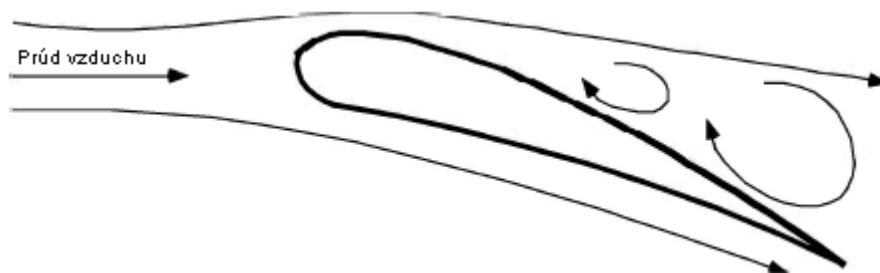
Obr. 8.4 NACA 63(2)-615 – Geometrický tvar pre  $c = 100$  [60]

Graf 8.5 ukazuje priebeh pomeru vztlakového a odporového koeficientu. Táto hodnota je hlavným ukazovateľom pri výbere. Maximálna hodnota zabezpečí zisk maximálnej možnej vztlakovej sily, pri minimálnej sile odporu prúdenia. Z grafu je vidieť, že maximum je dosahované pri hodnote  $\alpha=7,5$ . Pre túto hodnotu boli následne odčítané hodnoty  $C_l$  a  $C_d$ . Za touto hodnotu však nastáva prudký pokles vlastností. Dochádza k odtrhnutiu medznej vrstvy od profilu, v dôsledku čoho profil prudko stráca vztlak.



Obr. 8.5 NACA 63(2)-615 Pomer  $C_l/C_d$ [60]

Efekt odtrhnutia od medznej vrstvy sa využíva pri princípe aerodynamickej brzdy. K tomuto javu dochádza na sacej strane lopatky. Pri obtekaní profilu dochádza k poklesu tlaku v blízkosti profilu, v dôsledku zvyšovania rýchlosti prúdenia okolo profilu. Ak je lopatka príliš krátka, zvýšenie tlaku na konci profilu nie je dostatočné, nastáva spätné prúdenie. Dochádza teda k odtrhnutiu medznej vrstvy od profilu. Princíp zobrazuje obr. 8.6. [30] [6]



Obr. 8.6 Princíp odtrhnutia od medznej vrstvy [28]

Je teda vhodné zvoliť uhol nábehu mierne nižší, toto opatrenie zabezpečí menšie výkyvy vo výkone veterného stroja. Nábehový uhol teda volím podľa odporúčaní v literatúre: [31]

$$\alpha = 6,5 [^\circ]$$

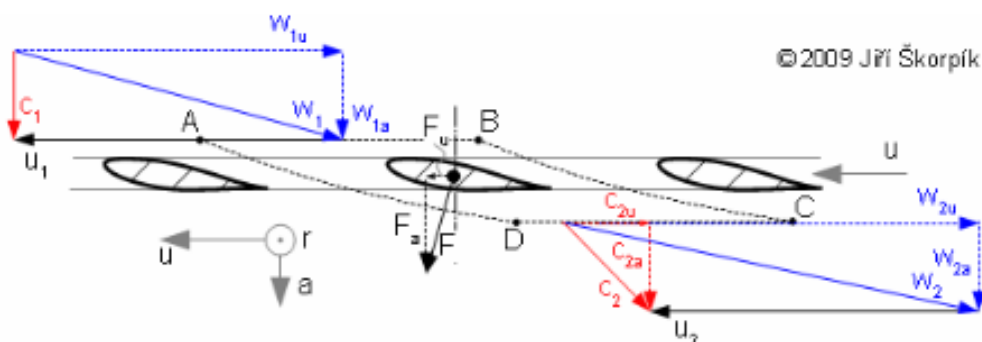
Rov.8.4

#### 8.4 Maximální polomer rotora

Pre zistenie maximálneho polomeru je najskôr nutné odvodiť optimálny výkon. Výkon prenesený na hriadeľ turbíny je možné spočítať podľa rovnice 8.5. Pri zisťovaní optimálneho výkonu je uvažované prúdenie bez strát. [58]

$$P = \omega \cdot M_k [W] \quad \text{Rov.8.5}$$

Obvodová silu  $F_u$ , je možné určiť z Eulerovej rovnice, pomocou metódy kontrolného objemu, na ktorý sú uplatnené základné zákony. Zákon zachovania hmotnosti, hybnosti a energie.



Obr. 8.7 Kontrolný objem [30]

S definovaným elementárnym objemom je možné vzťah pre výkon ďalej upraviť. Nakoľko elementárny objem je uvažovaný pre jednu lopatku. Obvodovú silu je nutné vynásobiť počtom lopatiek B:

$$dP = \omega \cdot dM_k = \omega \cdot r \cdot B \cdot dF_u = u \cdot B \cdot dF_u [W] \quad \text{Rov.8.6}$$

Kde je obvodová sila definovaná nasledovne [61]:

$$dF_u = \dot{m} \cdot (c_{1u} - c_{2u}) [N] \quad \text{Rov.8.7}$$

Vzťah pre hmotnostný tok kontrolným objemom je možné vyjadriť v prípade, že uvažujeme rotor ako disk o elementárnej šírke (viď obr. 8.1) nasledovne:

$$d\dot{m} = \frac{1}{B} c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot dr [kg \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.8.8}$$

Pre prúdenie bez strát v čisto axiálnom stupni platí:

$$a_{opt} = l_u = u \cdot (c_{1u} - c_{2u}) [J \cdot kg^{-1}] \quad \text{Rov.8.9}$$

Dosadením rovníc 8.8 a 8.9 do rovnice 8.7 je získaný vzťah pre výpočet optimálnej obvodovej sily:

$$dF_u = \frac{a_{opt}}{u} \cdot \frac{1}{B} c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot dr [N] \quad \text{Rov.8.10}$$

Mernú optimálnu prácu podľa Betzovej teórie (viď. kap.10), vzťah pre výpočet mernej práce:

$$a_{opt} = \frac{4}{9} \cdot c_w^2 [J \cdot kg^{-1}] \quad \text{Rov.8.11}$$

Vzťah pre rýchlosť  $c_A$ , bez uvažovanie strát, je podľa Betzovej teórie možné napísať v tvare:

$$c_A = \frac{2}{3} \cdot c_w [m \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.8.12}$$

Dosadením rovníc do rovnice 8.6, je získaný vzťah pre optimálnu prácu veternej turbíny. Ide o prácu pri maximálnej účinnosti podľa Betzovej teórie bez uvažovania strát:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \cdot c_w^3 \cdot \rho \cdot ds \cdot \eta [W] \quad \text{Rov.8.13}$$

V rov. 8.13 predstavuje hodnota  $16/27$  maximálnu teoretickú účinnosť, označovanú ako  $c_p$  a  $\eta$  účinnosť elektrického generátora. Požadovaný výkon je známy zo zadania diplomovej práce. Vzťah je teda možné upraviť pre získanie maximálneho polomeru. Integračný člen  $ds$  je v tomto prípade možné vyjadriť vzťahom pre obsah medzikružia. Po dosadení a upravení vzťah vyzerá nasledovne:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{opt}}{\rho \cdot \pi \cdot c_w^3 \cdot c_p \cdot \eta}} [m] \quad \text{Rov.8.14}$$

Zadaný výkon:

$$P_{opt} = 1200 [W] \quad \text{Rov.8.15}$$

Návrhová rýchlosť vetra bola vypočítaná v kapitole 7 nasledovne:

$$c_w = 5,258 [m \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.8.16}$$

Tak isto aj hustota vzduchu pre teplotu na danej lokalite bola počítaná v kapitole 7:

$$\rho = 1,225 [kg \cdot m^{-3}] \quad \text{Rov.8.17}$$

Elektrická účinnosť predstavuje účinnosť premeny výkonu turbíny na elektrický výkon. Bola zvolená mierne nižšia hodnota, nakoľko bežne údaje zodpovedajú menovitému zaťaženiu. Vetrná turbína sa však pohybuje v širších rozsahoch (bežná hodnota 0,95 – 0,96):



$$\eta = 0,9 [-]$$

Rov.8.18

Ďalej je nutné zvolit' hodnotu účinnosti premeny veternej energie na mechanickú prácu  $c_p$ , pre prvotný odhad. Hodnota bola zvolená podľa bežne uvádzaných hodnôt pre takéto zariadenia [5]:

$$c_p = 0,5 [-]$$

Rov.8.19

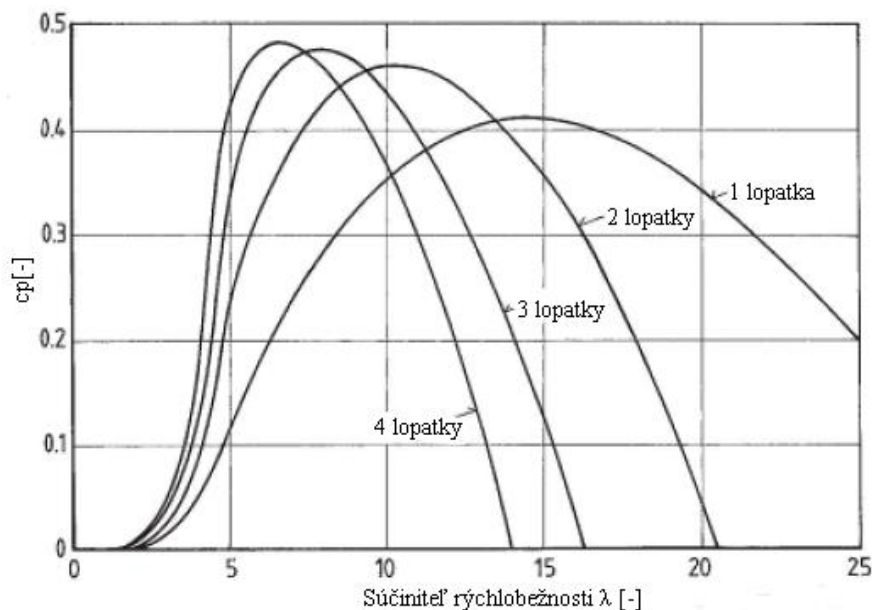
Dosadením zvolených hodnôt je možné získať prvotný odhad polomeru. Pre jednoduchosť je hodnota polomeru uvedená už s finálnou hodnotou  $c_p$ . To platí aj pre ostatné hodnoty.

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot 1200}{1,225 \cdot \pi \cdot 5,258^3 \cdot 0,5 \cdot 0,9}} = 3,0386 [m]$$

Rov.8.20

### 8.5 Voľba počtu lopatiek

Pred zahájením výpočtu je potrebné zvolit' počet lopatiek B. Z obrázku 8.8 je zrejmé, že počet lopatiek súvisí zo súčiniteľom rýchlobežnosti. Najvyššie účinnosti je možné dosahovať pomocou strojov zo 4 lopatkami, takéto riešenie je ale náročnejšie na použitý materiál. Zvolené sú teda tri lopatky o rýchlobežnosti, kedy je dosahovaná najvyššia účinnosť [6]:



Obr. 8.8 Účinnosť  $c_p$  v závislosti na rýchlobežnosti  $\lambda$  [6]

Zvolený súčiniteľ rýchlobežnosti:

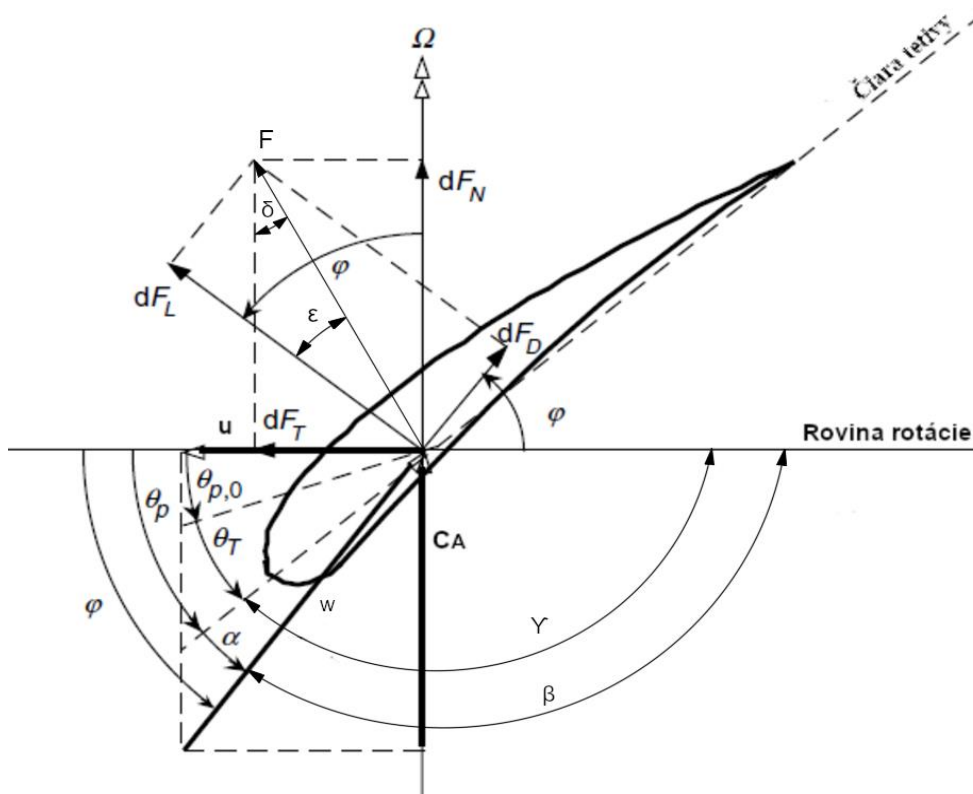
$$\lambda = 8 [-] \quad \text{Rov.8.21}$$

Počet lopatiek:

$$B = 3 [-] \quad \text{Rov.8.22}$$

### 8.6 Výpočet geometrie krútených lopatiek

Základným parametrom, ktorý definuje tvar lopatky dĺžka tetivy  $c$  (vid'. obr.8.2). Tento parameter je potrebné správne navrhnuť, z dôvodu, že ak je dĺžka nedostatočná, lopatka nie je schopná transformovať všetku energiu vetra na obvodovú prácu. Naopak, pri príliš dlhej lopatke dochádza k zvyšovaniu odporových strát. Aby bolo možné výpočet odvodiť, je nutné charakterizovať základné veličiny profilu lopatky.



Obr. 8.9 Charakteristika profilu [28]

$F_L$  – vztlaková sila;  $F_d$  – odporová sila;  $F_a$  – axiálna sila;  $F_u$  – obvodová sila;  $u$  – obvodová rýchlosť;  $\varphi$  – uhol relatívneho smeru prúdu vzduchu na element;  $\alpha$  – uhol nábehu pre osamotený profil;  $\varepsilon$  – kľzavý uhol;  $w$  – relatívna rýchlosť;  $\beta$  – uhol relatívnej rýchlosti;  $\gamma$  – nastavenie profilu v lopatkovej mreži;  $C_A$  – absolútna rýchlosť v axiálnom smere;  $\Omega$  – uhlová rýchlosť lopatky;  $\delta$  – uhol sklonu výslednej sily od axiálneho smeru;  $\vartheta_p$  – uhol odklonu od uhlu rotácie;  $\vartheta_T$  – uhol krútenia lopatky;  $\vartheta_{p,0}$  – uhol odklonu konca lopatky od roviny rotácie

Pri odvodení dĺžky tetivy je možné vychádzať zo vztlakovej sily. Tú je možno vyjadriť z rovnice 8.1, v nasledujúcom tvare:

$$dF_l = \frac{1}{2} \cdot c_l \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \text{ [N]} \quad \text{Rov.8.23}$$

Z obrázku 8.9 je možné odvodiť:

$$dF_l = dF \cdot \cos(\varepsilon) \text{ [N]} \quad \text{Rov.8.24}$$

Tiež výslednú silu F:

$$dF = \frac{dF_u}{\sin(\delta)} \text{ [N]} \quad \text{Rov.8.25}$$

Dosadením rovníc 8.24 a 8.25 do rovnice 8.23 je získaný nasledujúci vzťah:

$$\frac{dF_u}{\sin(\delta)} \cdot \cos(\varepsilon) = \frac{1}{2} \cdot c_l \cdot \rho \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \text{ [N]} \quad \text{Rov.8.26}$$

Obvodovú silu je možné rozpísať pomocou rov.8.10

$$dF_u = \frac{a_{opt}}{u} \cdot \frac{1}{B} c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot dr \text{ [N]} \quad \text{Rov.8.27}$$

Ďalším dosadením a vyjadrením dĺžky tetivy získame vzťah pre jej výpočet. Písmeno i vyjadruje postup výpočtu rozdelením na elementy:

$$c = \frac{4 \cdot \pi \cdot a_{opt,i}}{B \cdot c_l} \cdot \frac{r_i}{u_i \cdot w_i} \cdot \frac{c_A \cdot \cos(\varepsilon)}{w_i \cdot \sin(\delta)} \text{ [m]} \quad \text{Rov.8.28}$$

Nasledujúce vzťahy sú odvodené z obr. 8.9. Prvým je relatívna rýchlosť:

$$w_i = \sqrt{c_A^2 + u_i^2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Rov.8.29}$$

Uhol sklonu výslednej sily od axiálneho smeru:

$$\delta_i = \phi_i - \varepsilon \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Rov.8.30}$$

Uhol relatívneho prúdu smeru prúdu vzduchu na element:

$$\phi_i = \arctg\left(\frac{c_A}{u_i}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Rov.8.31}$$

$$\beta_i = \arccos\left(-\frac{u}{w_i}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Rov.8.32}$$

Uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži je potom:

$$\gamma_i = \beta_i + \alpha \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Rov.8.33}$$

Klízavý uhol je možné spočítať [58]:

$$\varepsilon = \arctg\left(\frac{C_d}{C_l}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad \text{Rov.8.34}$$

Obvodová rýchlosť je vyjadrená z rov. 4.1, súčiniteľ rýchlobežnosti je upravený pre jednotlivé elementy:

$$u_i = c_w \cdot \lambda_i = c_w \cdot \frac{r_i}{R} \cdot \lambda \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad \text{Rov.8.35}$$

Na základe odporúčaných hodnôt pre výpočet podľa BEM teórie je zvolený počet elementov:

$$N = 10 \text{ [-]} \quad \text{Rov.8.36}$$

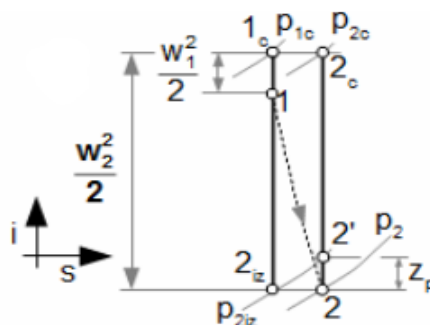
Polomer jednotlivých elementov je nutné počítať na ich stred. Odvođený bol nasledujúci vzťah:

$$r_i = R \cdot \left[ \frac{R}{N} \cdot (i - 1) + \frac{1}{2} \cdot \frac{R}{N} \right] \text{ [-]} \quad \text{Rov.8.37}$$

## 8.7 Profilové straty

Pre zistenie skutočnej práce, ktorú je veterný stroj schopný dodať, je nutné určiť straty, ktoré znižujú jeho účinnosť. Teória lopatkovej mreže uvažuje len zo stratami profilovými, ktoré vznikajú v dôsledku odporu medzi tekutinou obtekajúcou profil a jeho povrchom. Zanedbané sú straty vírením za rotorom (vid'.kap.10) a strata konečným počtom lopatiek. Pre ich zistenie by bolo nutné vykonať experiment. [27]

Odporová strata profilu spôsobuje rozdielny výstupný tlak, ako pri izoentropickom prúdení vid'. obr. 8.10. V dôsledku tohto rozdielu dochádza k poklesu obvodovej sily a rastu axiálnej zložky sily na lopatku. Toto spôsobuje vyššie zaťaženie lopatiek na ohyb a na ložiská veterného stroja. Nasledujúce vzťahy sú odvođené pomocou webu [61].



Obr. 8.10 I-s konfuzorovej lopatkovej mreže [61]

Dej způsobující profilové straty je možné popísat vztahom:

$$s \cdot dr \cdot \Delta p_z = dF_a - dF_{a,iz} [N] \quad \text{Rov.8.38}$$

Zo silového trojuholníka je možné odvodiť :

$$dF_a - dF_{a,iz} = \frac{dF_a}{\sin(\beta)} [N] \quad \text{Rov.8.39}$$

Odporová sila obdobne ako vztlaková:

$$dF_a = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot w_i^2 \cdot c_i \cdot dr [N] \quad \text{Rov.8.40}$$

Z I-s diagramu (obr.8.11) je možné odvodiť:

$$zp = \frac{1}{\rho} \cdot \Delta p_z [J \cdot kg^{-1}] \quad \text{Rov.8.41}$$

Dosadením následnou úpravou je získaný vztah:

$$zp = \frac{C_d \cdot w_i^2 \cdot c_i}{2 \cdot \sin(\beta) \cdot s} [J \cdot kg^{-1}] \quad \text{Rov.8.42}$$

Rozteč mreže je definovaná nasledovne:

$$s = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{B} [m] \quad \text{Rov.8.43}$$

Výsledný vztah je teda:

$$zp = \frac{C_d \cdot w_i^2}{2 \cdot \sin(\beta)} \cdot \frac{B \cdot c_i}{2 \cdot \pi \cdot r} [J \cdot kg^{-1}] \quad \text{Rov.8.44}$$

## 8.8 Výsledné hodnoty

Použitím vztahů v kapitolách 8.6 a 8.7 boli spočítané výsledné hodnoty geometrie. Výkres lopatky je priložený v prílohe A.

Tab. 8.1 Vypočítané hodnoty pre krútené lopatky - TLM [autor]

i	ri [-]	ui [m/s]	wi [m/s]	ci [m]	φi [°]	α [°]	Υ [°]	zp [J/kg]	a <sub>skut</sub> [J/kg]
1	2.89	39.96	40.11	0.10	5.01	6.5	181.49	2.138	10.15
2	2.58	35.75	35.93	0.10	5.60	6.5	180.90	1.882	10.40
3	2.28	31.55	31.74	0.12	6.34	6.5	180.16	1.636	10.65
4	1.98	27.34	27.57	0.13	7.31	6.5	179.19	1.399	10.89
5	1.67	23.14	23.40	0.15	8.62	6.5	177.88	1.171	11.12
6	1.37	18.93	19.25	0.18	10.49	6.5	176.01	0.953	11.33
7	1.06	14.72	15.13	0.23	13.39	6.5	173.11	0.745	11.54
8	0.76	10.52	11.08	0.31	18.43	6.5	168.07	0.550	11.74
9	0.46	6.31	7.22	0.46	29.05	6.5	157.45	0.383	11.90
10	0.15	2.10	4.09	0.80	59.04	6.5	127.46	0.363	11.92

## 8.9 Výsledný mechanický výkon

Pre vypočítanie účinnosti veterného stroja je potrebné poznať prácu, ktorú sú schopné navrhnuté lopatky dodať. Rovnica 8.11 definuje mernú optimálnu prácu veternej turbíny. Odčítaním profilových strát od tejto hodnoty je získaná merná práca vrátane strát. Tento výpočet opäť prebehne pre všetky počítané elementy.

$$a_{skut,i} = a_{opt} - z_{pi} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad \text{Rov.8.45}$$

Výsledný mechanický výkon je získaný prenásobením hmotnostným tokom, ktorý prechádza cez plochu každého elementu vid' obr. 8.13:

$$d\dot{m} = c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot ds \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.8.46}$$

Obsah elementu je možné rozpisat' nasledovne. Člen „R/N“ určuje šírku elementu a „ri“ definuje jeho stred:

$$\dot{m}_i = c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot r_i \cdot \frac{R}{N} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.8.47}$$

Dosadením je získaný vzťah pre výpočet výkonu jednotlivých elementov:

$$P_{skut,i} = (a_{opt} - z_{pi}) \cdot c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot r_i \cdot \frac{R}{N} \quad [W] \quad \text{Rov.8.48}$$

Výsledný mechanický výkon je získaný súčtom všetkých elementov. Posledný element nie je počítaný, nakoľko v realite lopatka končí 10 – 15 % od osy hriadeľa a plynulo nadväzuje na päť lopatky. Dôvodom k tomu riešeniu je pomerne malý energetický prínos, veľká dĺžka tetivy, veľké skrútenie (viď obr.8.10) a vysoké straty pri zmene od návrhového stavu [30]:

$$P_{skut} = \sum_{i=1}^9 P_{skut,i} = 1333,33 \text{ [W]} \quad \text{Rov.8.49}$$

### 8.10 Elektrický výkon

V zadání bol požadovaný výkon 1200 W, to je však elektrický výkon. Ten je možné získať prenasobením účinnosťou  $\eta$  generátora veternej turbíny.

$$P_{el} = P_{skut} \cdot \eta = 1200 \text{ [W]} \quad \text{Rov.8.50}$$

### 8.11 Účinnosť veternej turbíny

Účinnosť veternej turbíny, býva v praxi definovaná pomocou rov. 2.6. Jedná sa teda o pomer mechanického výkonu a výkonu vetra na danej lokalite.

$$c_p = \frac{P_{skut}}{P_{vietor}} [-] \quad \text{Rov.8.51}$$

Výkon vetra je možné spočítať podľa rovnice 2.4. Ide však o merný výkon. Vzťah preto treba prenasobiť plochou, ktorú lopatky zaberajú.

$$P_{vietor} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w^3 \cdot \pi \cdot R^2 = 2582,56 \text{ [W]} \quad \text{Rov.8.52}$$

Výsledná účinnosť veternej turbíny je potom:

$$c_p = \frac{P}{P_{vietor}} = \frac{1333,33}{2582,56} = 0,516 [-] \quad \text{Rov.8.53}$$

### 8.12 Overenie Reynoldsovho čísla

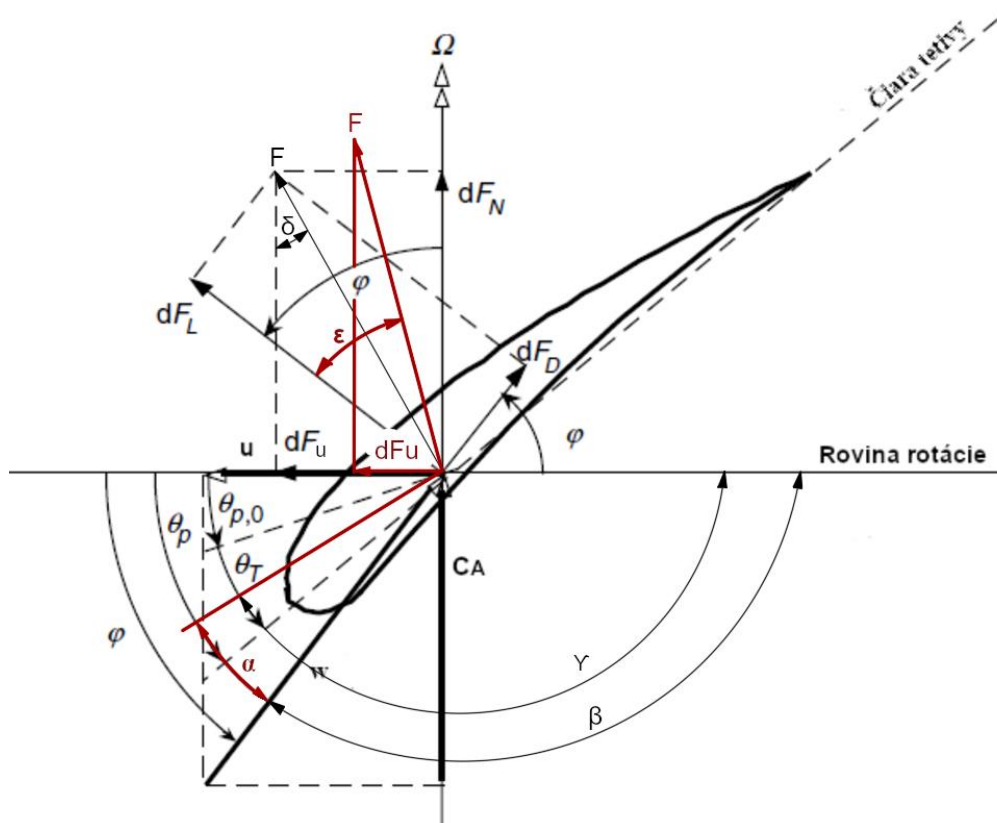
Overenie správnosti voľby reynoldsovho čísla bolo vykonané dosadením do rov.8.3. Nasledujúca rovnica zobrazuje hodnoty pre  $i=5$ :

$$Re = \frac{w_i \cdot c_i}{\nu} = \frac{23,39 \cdot 0,15}{14,47 \cdot 10^{-6}} = 245983 [-] \quad \text{Rov.8.54}$$

Hodnoty pre ostatné elementy sú veľmi podobné. Pôvodná zvolená hodnota bola  $Re = 200\,000$ . Ďalšie meranie zvoleného profilu je dostupné až pre hodnotu  $500\,000$ . Hodnotu nie je nutné meniť.

## 9 Aerodynamický návrh podľa teórie lopatkovej mreže – prizmatické lopatky

Ide o lopatkovanie, kde je použitý pre celý priemer lopatky rovnaký uhol nastavenia v lopatkovej mreži. To spôsobí, že nábehový uhol  $\alpha$ , bude ideálny len pre počítaný referenčný polomer. V dôsledku toho dochádza k znižovaniu obvodovej sily a zvyšovaniu profilových strát. Výsledná účinnosť teda klesá. Princíp zmeny vid'. obr. 9.1. Výhodou sú nižšie výrobné náklady z dôvodu jednoduchšej geometrie. Pre menšie veterné stroje je tento variant pomerne často používaný, nakoľko mierne zväčšenie polomeru nemá zásadný vplyv na použiteľnosť veternej turbíny.



Obr. 9.1 Charakteristika profilu a zmena hodnôt pre prizmatické lopatky [28]

$F_l$  – vztlaková sila;  $F_d$  – odporová sila;  $F_a$  – axiálna sila;  $F_u$  – obvodová sila;  $u$  – obvodová rýchlosť;  $\varphi$  – uhol relatívneho smeru prúdu vzduchu na element;  $\alpha$  – uhol nábehu pre osamotený profil;  $\varepsilon$  – kĺzavý uhol;  $w$  – relatívna rýchlosť;  $\beta$  – uhol relatívnej rýchlosti;  $\gamma$  – nastavenie profilu v lopatkovej mreži;  $C_A$  – absolútna rýchlosť v axiálnom smere;  $\Omega$  – uhlová rýchlosť lopatky;  $\delta$  – uhol sklonu výslednej sily od axiálneho smeru

### 9.1 Postup výpočtu

Tak isto ako aj pri krútených lopatkách, je potrebné zvoliť predpokladanú hodnotu účinnosti  $c_p$ . S touto hodnotou je následne vykonaný celý výpočet. Po dopočítaní skutočnej účinnosti, je celý výpočet zopakovaný s novou hodnotou, čím je získaná presná hodnota polomeru a geometrie lopatiek. Použitý aerodynamický profil je totožný. Tak isto ako v prípade krútených lopatiek, sú všetky uvedené hodnoty počítané s výslednou hodnotou  $c_p$ . Výpočet bol opäť vykonaný pre  $N$  elementov.



## 9.2 Maximální polomer lopatiek

Pre zistenie polomeru je možno použiť rovnaké rovnice, ako v prípade krútených lopatiek. V tejto kapitole teda nebudú odvodzované. Pre odvodenie vid'. kap. 8.4. Všetky zvolené hodnoty sú totožné ako pre prípad krútených lopatiek.

Výsledný polomer:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{opt}}{\rho \cdot \pi \cdot c_w^3 \cdot c_p \cdot \eta}} = 3,2077 \text{ [m]} \quad \text{Rov.9.1}$$

## 9.3 Výpočet geometrie prizmatických lopatiek

Pre prípad prizmatických lopatiek nie je navrhovaná geometria pre každý element samostatne. Je spočítaná iba pre referenčný polomer. Pre všetky skúmané elementy je potom použitá rovnaká dĺžka tetivy  $c$  a uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži  $\gamma$ . Princíp zmeny parametrov ukazuje obr. 9.1. Grafy

Referenčný polomer je spočítaný nasledovne. Kde  $r_l$  je polomer lopatky,  $r_h$  je spočítaná ako 10 % z priemeru  $R$  [58]:

$$r_{ref} = \sqrt{\frac{r_l^2 + r_h^2}{2}} = 2,2795 \text{ [m]} \quad \text{Rov.9.2}$$

## 9.4 Straty

Okrem profilových strát pri takýchto lopatkách vznikajú aj straty spôsobené zmenou obvodovej sily  $F_u$  (vid'.obr9.1)

### 9.4.1 Zmena obvodovej sily

Zmena obvodovej sily je spôsobená zmenou nábehové uhlu  $\alpha$ , v dôsledku čoho sa zmenia koeficienty  $C_l$  a  $C_d$ . Je ich teda nutné pre každý element odčítať samostatne. Pomocou týchto hodnôt je možné získať vztlakovú silu (podľa rov 8.23), z ktorej je možné vyjadriť výslednú silu  $F$  (rov. 8.24).

Výsledná sila  $F$ :

$$dF = \frac{dF_l}{\cos(\varepsilon)} \text{ [N]} \quad \text{Rov.9.3}$$

Obvodová sila z goniometrie:

$$dF_u = dF \cdot \sin(\delta) \text{ [N]} \quad \text{Rov.9.4}$$

Vypočítané hodnoty sú zobrazené v tabuľke 9.2.

## 9.5 Merná práca

Vykonaná práca však nebude optimálna, je potrebné ju prepočítať z ohľadom na zmenu obvodovej sily. Vychádzať je možné zo vzťahu 8.45.

Výkon je definovaný:

$$dP = \omega \cdot dM_k \text{ [W]} \quad \text{Rov.9.5}$$

Krútiaci moment:

$$dMk = \omega \cdot dF_u \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}\text{]} \cdot \quad \text{Rov.9.6}$$

Uhlová rýchlosť:

$$\omega = \frac{u_i}{r_i} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad \text{Rov.9.7}$$

Po dosadení je možno písať vzťah pre výkon:

$$P_{priz,i} = F_u \cdot u_i \text{ [W]} \quad \text{Rov.9.8}$$

Pre výpočet je potrebný merný výkon, kde hmotnostný tok pre kontrolný objem podľa rov.8.8:

$$a_{priz,i} = \frac{P_{priz,i}}{\dot{m}} \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]} \quad \text{Rov.9.9}$$

Vypočítané hodnoty vid' tab. 9.2. Hodnota  $a_{opt}$ , predstavuje porovnanie s krútenými lopatkami.

### 9.5.1 Profilové straty

V tomto prípade je možné postupovať totožne ako u krútených lopatiek vid' kap. 8.7. Jediným rozdielom sú iné hodnoty odporového koeficientu, spôsobené zmenou nábehového uhlu  $\alpha$ . Vypočítané hodnoty vid' tab. 9.2.

## 9.6 Výsledné hodnoty

Dosadením hodnôt do odvodených vzťahov boli získané výsledné hodnoty pre prizmatické lopatky. Posledné dve hodnoty uhla nábehu sú príliš vysoké. Hodnoty sú v tomto mieste mimo rozsah údajov dostupných pre skúmaný profil. Dá sa predpokladať, že pri týchto hodnotách dochádza k príliš veľkým stratám a meranie tak nemá význam. Výkres lopatky je priložený v prílohe B.

Tab. 9.1 Vypočítané hodnoty pre prizmatické lopatky - TLM [autor]

i	ri [-]	$\alpha$ [°]	$\varepsilon$ [°]	Fl [N]	$F_{u,priz}$ [N]	$F_{u,krút}$ [N]	zp [J/kg]	$a_{priz}$ [J/kg]
<b>Ref</b>	<b>2.28</b>	<b>6.50</b>	<b>0.74</b>	<b>185.35</b>	<b>19.21</b>		<b>1.54</b>	<b>10.01</b>
1	3.05	4.82	0.88	299.82	21.60	23.04	2.83	10.33
2	2.73	5.41	0.84	248.35	20.61	20.61	2.27	11.02
3	2.41	6.15	0.78	200.56	19.44	18.19	1.74	11.78
4	2.09	7.12	0.71	163.01	18.73	15.76	1.32	13.10
5	1.76	8.43	0.74	125.04	17.13	13.34	1.08	14.16
6	1.44	10.30	1.40	80.44	12.70	10.91	1.35	12.83
7	1.12	13.20	2.47	50.21	9.50	8.49	1.55	12.34
8	0.80	18.25	5.61	26.16	5.78	6.06	1.96	10.51
9	0.48	28.87	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx
10	0.1603	58.85	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx

## 9.7 Mechanický výkon

Jeho hodnotu je možné spočítať jednoducho, dosadením do rovnice 8.48. Za optimálnu prácu bude však dosadená merná práca pre prizmatické lopatky.

$$P_{skut,i} = (a_{priz,i} - z_{pi}) \cdot c_A \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot r_i \cdot \frac{R}{N} [W] \quad \text{Rov.9.10}$$

Výsledná hodnota podľa:

$$P_{skut} = \sum_{i=1}^9 P_{skut,i} = 1333,33 [W] \quad \text{Rov.9.11}$$

## 9.8 Elektrický výkon

Podľa vzťahu 8.50, je obdržaná požadovaná hodnota zo zadania.

$$P_{el} = P_{skut} \cdot \eta = 1200 [W] \quad \text{Rov.9.12}$$

### 9.9 Účinnost veternej turbíny

Totožný postup, ako pre krútené lopatky vid' kap. 8.10.

Výkon vetra:

$$P_{vietor} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w^3 \cdot \pi \cdot R^2 = 2878,12 [W] \quad \text{Rov.9.13}$$

Účinnosť:

$$c_p = \frac{P_{skut}}{P_{vietor}} = \frac{1333,33}{2878,12} = 0,463 [-] \quad \text{Rov.9.14}$$

## 10 Aerodynamický návrh podľa BEM teórie – krútené lopatky

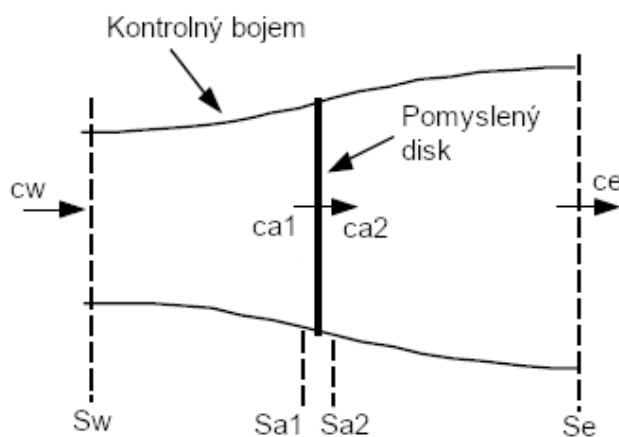
Jedná sa o teóriu, ktorá je odvodená vedcami Betzom a Glauertom.. Tento postup je v zahraničnej literatúre uvádzaný najčastejšie. Postup je odvodený na základe zdrojov [28] a [6].

### 10.1 Postup výpočtu

Postup výpočtu je vykonaný pomocou vzorového výpočtu v literatúre [28]. Jedná sa o iteratívny postup, kedy je vypočítaný počiatočný odhad geometrie zo zvolenej účinnosťou  $c_p$ . Potom je možné pomocou iterácií dopočítať presnejšie hodnoty geometrie. Všetky potrebné hodnoty boli zvolené, rovnako ako v prípade kapitoly 8.

### 10.2 Jednodimenzionálna hodnostná teória

Ide o jednoduchý lineárny model, ktorý je založený na teórii hybnosti a slúži k odvodeniu ideálneho výkonu, ťahovej sily a optimálnej účinnosti veterného stroja. Postup bol odvodený v roku 1926 Alberotm Betzom.



Obr. 10.1 Kontrolný objem[autor]

Pri odvodení bolo vychádzané z predpokladu, že vzruch prechádza idealizovaným veterným rotorom, v ktorom nedochádza k mieseniu vzduchu. Vzduch pritom prúdi iba kontrolným objemom podľa obrázku 10.1.

Uvažované predpoklady pri výpočte sú, nekonečný počet lopatiek, homogénny nestlačiteľný tok, žiadne straty trením, rovnomerný ťah cez disk, žiadne vírenie za turbínou, statický tlak ďaleko za rotorom je rovný statickému tlaku ďaleko pred rotorom.

#### 10.2.1 Ťahová sila

Zmena hybnosti v kontrolnom objeme vytvára silu na pomyslený disk. Táto sila je nazývaná ako ťah. Zo základných vzorcov pre hybnosť je možné vyjadriť vzťah pre ťah.

$$T = c_w(\rho \cdot S_w \cdot c_w) - c_e(\rho \cdot S_e \cdot c_e) [N] \quad \text{Rov.10.1}$$

Pre ustálenie prúdenie je hmotnostný tok pred turbínou a za turbínou rovnaký. Je teda možné napísať:

$$T = \dot{m} \cdot (c_w - c_e) [N] \quad \text{Rov.10.2}$$

Pre kontrolný objem je možná napísať Bernolliho rovnicu, je nutné napísať dva tvary nakoľko pomyslený disk koná prácu.

Tvar pred pomyselným diskom:

$$p_w + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_e^2 = p_{A1} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_{A2}^2 \text{ [Pa]} \quad \text{Rov.10.3}$$

Tvar za pomysleným diskom:

$$p_{A2} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_{A2}^2 = p_e + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_e^2 \text{ [Pa]} \quad \text{Rov.10.4}$$

Z predpokladov plynie:

$$c_w = c_e \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Rov.10.5}$$

Axiálna rýchlosť tesne pred a rotorom:

$$c_A = c_{A1} = c_{A2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Rov.10.6}$$

Tak isto aj pre kontrolný objem:

$$S_A = S_{A1} = S_{A2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Rov.10.7}$$

Potom je možné napísať vzťah pre ťahovú silu nasledovne:

$$T = \frac{1}{2} \cdot S_A \cdot (c_w^2 - c_e^2) \text{ [N]} \quad \text{Rov.10.8}$$

### 10.2.2 Uhlový indukčný faktor

V tomto momente, je vhodné definovať axiálny indukčný faktor, z dôvodu aby účinnosť  $c_p$ , bola vyjadrená pomocou rýchlosti vetra  $c_w$ , ktorá je známa z merania na danej lokalite. Parameter tiež definuje mieru spomalenia prúdu na veternej turbíne. Ak nadobudne hodnotu  $1/2$ , rýchlosť za turbínou dosiahne nulovú hodnotu a túto teóriu nie je možné aplikovať.

Axiálny uhlový faktor je definovaný:

$$a = \frac{c_w - c_e}{c_w} \text{ [-]} \quad \text{Rov.10.9}$$

Pre axiálnu rýchlosť platí:

$$c_A = c_w \cdot (1 - a) \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Rov.10.10}$$

Potom výstupná rýchlosť:

$$c_e = c_w \cdot (1 - 2a) [m \cdot s^{-1}] \quad \text{Rov.10.11}$$

### 10.2.3 Vyjadrenie účinnosti

Ako je vidieť v rovnici 2.6, pre výpočet účinnosti je nutné poznať výkon turbíny, ten je možné získať jednoducho vďaka ťahovej sile. Výkon vetra je potom opäť z rovnice 2.4.

Výkon je definovaný

$$P = T \cdot c_A [W] \quad \text{Rov.10.12}$$

Po dosadení a upravení pomocou vzťahov pre indukčný faktor:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_A \cdot c_w^3 \cdot 4a \cdot (1 - a)^2 [W] \quad \text{Rov.10.13}$$

Účinnosť:

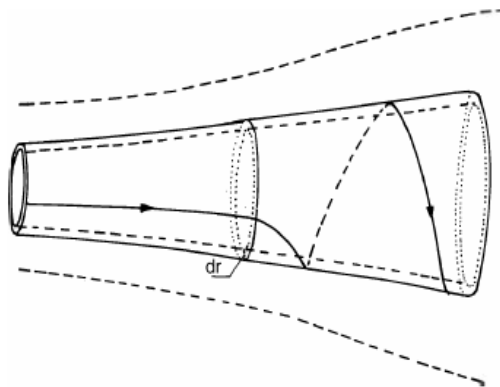
$$c_p = \frac{P_{VT}}{P_{vietor}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_A \cdot c_w^3 \cdot 4a \cdot (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_w^3 \cdot S_A} = 4a \cdot (1 - a)^2 [-] \quad \text{Rov.10.14}$$

Nájdением maxima tejto funkcie je získaná hodnota maximálnej účinnosti, podľa Betzovej teórie:

$$c_p = 4a \cdot (1 - a)^2 = \frac{16}{27} [-] \quad \text{Rov.10.15}$$

### 10.2.4 Radiálny indukčný faktor

Tesne pred rotorom je axiálne prúdenie možno uvažovať. Za rotorom však vzniká rotujúci prúd vzduchu, ktorý sa otáča opačným smerom, ako rotor veternej turbíny. Tento vír vzniká v dôsledku reakcie na krútiaci moment generovaný na lopatkách veternej turbíny. Generovanie rotačnej kinetickej energie v prúde vzduchu za turbínou vedie k menšiemu energetickému zisku na rotore.



Obr. 10.2 Ukážka vírenia za rotorom [28]

Generovanie rotačnej kinetickej energie v prúde vzduchu spôsobuje znižovanie energie, ktorú je možné získať na rotore. Pre nízkootáčkové stroje produkujúce väčší krútiaci moment je táto strata väčšia.

Tento jav zohľadnil vo svojich výpočtoch Glauert. Zmenu tlaku pred a za turbínou je podľa tejto teórie možné napísať v nasledujúcom tvare:

$$p_{A1} - p_{A2} = \rho \cdot \left( \Omega + \frac{1}{2} \cdot \omega \right) \cdot \omega \cdot r^2 \text{ [Pa]} \quad \text{Rov.10.16}$$

Ťah v uhlovom smere na element dT:

$$dT = (p_{A1} - p_{A2}) \cdot dS_A = \left[ \rho \cdot \left( \Omega + \frac{1}{2} \cdot \omega \right) \cdot \omega \cdot r^2 \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \text{ [N]} \quad \text{Rov.10.17}$$

Uhlový faktor je definovaný:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \text{ [Pa]} \quad \text{Rov.10.18}$$

Dosadením do rovnice pre ťah, je získaný vzťah:

$$dT = 4 \cdot a' \cdot (1 + a') \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \text{ [N]} \quad \text{Rov.10.19}$$

Porovnaním rovníc pre ťah bez započítania spätnej rotácie 10.8 a so započítanou spätnou rotáciou 10.19, je získaná nasledujúca rovnica, ktorá popisuje pomer tečnej rýchlosti lopatky k rýchlosti vetra:

$$\lambda_r^2 = \frac{\Omega^2 \cdot r^2}{c_w^2} = \frac{a \cdot (1 - a)}{(1 + a')} \text{ [-]} \quad \text{Rov.10.20}$$

Po odmocnení získavame lokálny súčiniteľ rýchlobežnosti. Dosadením vzťahu pre súčiniteľ rýchlobežnosti (rov.4.1), je získaná závislosť medzi týmito súčiniteľmi.

$$\lambda_r = \frac{\Omega \cdot r}{c_w} = \frac{\lambda \cdot r}{R} \text{ [-]} \quad \text{Rov.10.21}$$

Ďalším odvodzovaním je možné dostať vzťah pre účinnosť, zohľadňujúcu vplyv rotujúceho víru. Vzťah odvodil Glauber v nasledujúcom tvare [5]:

$$cp = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_0^\lambda a' \cdot (1 - a) \cdot \lambda_r^3 d\lambda_r \text{ [-]} \quad \text{Rov.10.22}$$

### 10.3 Maximálny polomer

Pre výpočet polomeru maximálneho polomeru je možné použiť vzťah z rov.8.20.

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot 1200}{1,225 \cdot \pi \cdot 5,258^3 \cdot 0,49 \cdot 0,9}} = 3,1279 \text{ [m]} \quad \text{Rov.10.23}$$



#### 10.4 Charakteristika premenných

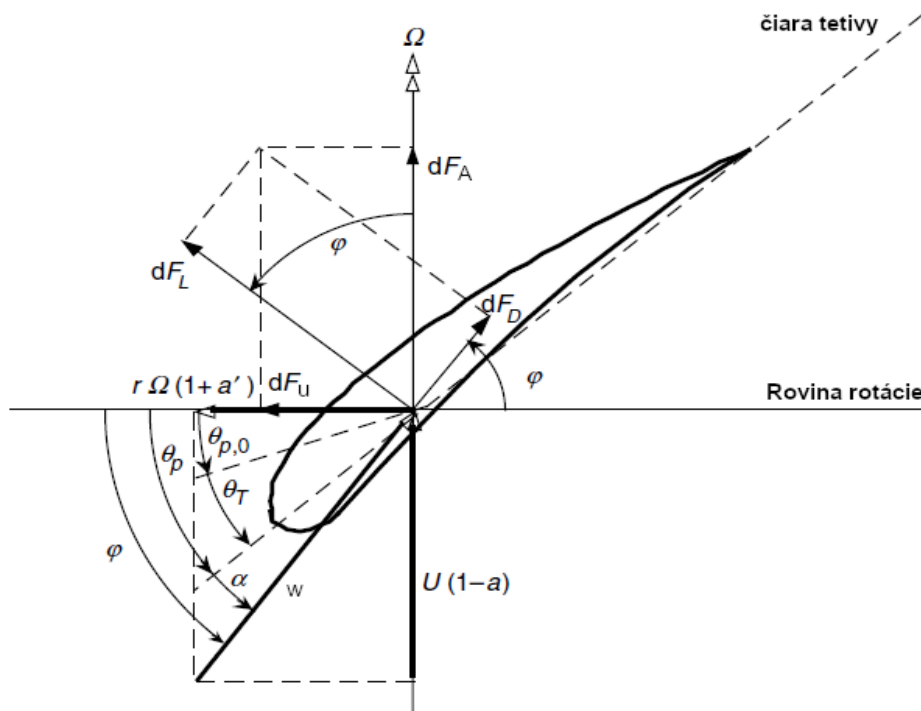
Všetky hodnoty pre ktoré bolo nutné vykonať prvotný nástrel, boli zvolené totožné ako v kapitole 8 a 9. Profil bol opäť rozdelený na  $N$  elementov. V literatúre [28] je odporúčané vybrať hodnotu v rozmedzí 10 až 20 elementov.

Počet elementov:

$$N = 10 [-]$$

Rov.10.24

Jednotlivé premenné definované vzhľadom k aerodynamickému profilu sú zobrazené v nasledujúcom obrázku.



Obr. 10.3 Charakteristika premenných [28]

$F_L$  – vztlaková sila;  $F_d$  – odporová sila;  $F_A$  – axiálna sila;  $F_u$  – obvodová sila;  $u$  – obvodová rýchlosť;  $\varphi$  – uhol relatívneho smeru prúdu vzduchu na element;  $\alpha$  – uhol nábehu pre osamotený profil;  $w$  – relatívna rýchlosť;  $\beta$  – uhol relatívnej rýchlosti;  $\Omega$  – uhlová rýchlosť lopatky;  $\vartheta_p$  – uhol odklonu od uhlu rotácie;  $\vartheta_T$  – uhol krútenia lopatky;  $\vartheta_{p,0}$  – uhol odklonu konca lopatky od roviny rotácie

Pomerne zložitým odvodzovaním je možné dospieť k vzťahom potrebným k samotnému výpočtu, pre ich pomerne veľký rozsah odvedenie nie je uvedené. Kompletné odvedenie a návod pre výpočet je dostupný [5]. Výpočet bol vykonaný podľa tohto návodu.

## 10.5 Výpočet geometrie

Pomerne zložitým odvodzovaním je možné dospieť k vzťahom potrebným k samotnému výpočtu, pre ich pomerne veľký rozsah odvodenie nie je uvedené. Tieto odvodenia vychádzajú z hodnotnej teórie. Kompletné odvodenie a návod pre výpočet je dostupný [6]. Je teda možné písať nasledujúce vzťahy. Aerodynamický profil bol zvolený totožný ako v kap.8.

Uhol relatívnej rýchlosti:

$$\phi_i = \frac{2}{3} \cdot \tan^{-1} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) [^\circ] \quad \text{Rov.10.25}$$

Dĺžka tetivy:

$$c_i = \frac{8 \cdot \pi \cdot r_i}{B \cdot c_{l,design}} \cdot (1 - \cos\phi_i) [m] \quad \text{Rov.10.26}$$

Uhol odklonu od roviny rotácie:

$$\theta_{p,i} = \phi_i - \alpha_{design,i} [^\circ] \quad \text{Rov.10.27}$$

Uhol krútenia elementu:

$$\theta_{T,i} = \theta_{p,i} - \theta_{p,0} [^\circ] \quad \text{Rov.10.28}$$

Pomocou uhlu nábehu je možné odčítať hodnoty vztlakového a odporového koeficientu, pre zvolený aerodynamický profil viď kap.8.

Pre výpočet účinnosti je nutné poznať axiálny a radiálny uhlový faktor, ktorých presné hodnoty je možné zistiť iteračnou metódou. Prvotný odhad je vykonaný pomocou vypočítanej geometrie a odčítaného odporového koeficientu. Výpočet prebieha opäť podľa návodu, podľa nasledujúcich vzťahov. Týmto postupom budú získané aj presnejšie hodnoty geometrie.

Axiálny uhlový faktor:

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{4 \cdot \sin^2(\phi_{i,1})}{\sigma_{i,design} \cdot c_{l,design} \cdot \cos\phi_{i,1}} \right]} [-] \quad \text{Rov.10.29}$$

Kde lokálna hustota lopatkovej mreže:

$$\sigma_i = \frac{B \cdot c_i}{2 \cdot \pi \cdot c_i} [-] \quad \text{Rov.10.30}$$

Radiální uhlový faktor:

$$a'_{i,1} = \frac{1 - 3 \cdot a_{i,1}}{(4 \cdot a_{i,1}) - 1} [-] \quad \text{Rov.10.31}$$

S takto získanými hodnotami je možné začít iteračný proces. Tento proces končí, při dosažení dostatočně nízkého rozdílu mezi vypočítanou a předloženou hodnotou axiálního a radiálního uhlového faktora. Pro výpočet boli použité nasledujúce vzťahy.

Uhol relatívnej rýchlosti:

$$\tan \phi_{i,j} = \frac{c_w \cdot (1 - a_{i,j})}{\Omega \cdot r \cdot (1 + a'_{i,j})} = \frac{(1 - a_{i,j})}{\lambda_{r,i} \cdot (1 + a'_{i,j})} [^\circ] \quad \text{Rov.10.32}$$

Korekčný faktor sily F, odvodení Prandtlom. Zavádza sa pre zohľadnenie strát, tvorenými vírením za rotorom.

$$F_{i,j} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cdot \cos^{-1} \cdot \left[ \exp \left( - \left\{ \frac{\left(\frac{B}{2}\right) \cdot \left[1 - \frac{r_i}{R}\right]}{\left(\frac{r_i}{R}\right) \cdot \sin \phi_i} \right\} \right) \right] [-] \quad \text{Rov.10.33}$$

Uhol nábehu, pre aktuálne hodnoty z goniometrie:

$$\alpha_{i,j} = \phi_{i,j} - \theta_{p,i} [^\circ] \quad \text{Rov.10.34}$$

V tomto kroku je potrebné pomocou nového uhlu nábehu odčítať aktuálne hodnoty vztlakových a odporových koeficientov pre každý element lopatky.

Lokálny ťahový faktor:

$$C_{T,i,j} = \frac{\sigma_i \cdot (1 - a_{i,j})^2 \cdot (c_{l,i,j} \cdot \cos \phi_{i,j} + c_{d,i,j} \cdot \sin \phi_{i,j})}{\sin^2 \phi_{i,j}} [-] \quad \text{Rov.10.35}$$

Podľa vypočítanej hodnoty lokálneho ťahového faktora, je zvolený postup pre výpočet axiálneho a radiálneho uhlového faktora.

Pre hodnoty  $C_{T,i,j} < 0,96$

Axiálny uhlový faktor:

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{4 \cdot F_{i,j} \cdot \sin^2(\phi_{i,1})}{\sigma_i \cdot c_{l,i,j} \cdot \cos \phi_{i,1}} \right]} [-] \quad \text{Rov.10.36}$$

Pre hodnoty  $C_{T,i,j} < 0,96$

Axiálny uhlový faktor:

$$a_{i,j+1} = \left( \frac{1}{F_{i,j}} \right) \cdot \left[ 0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427 \cdot (0,889 - C_{T,i,j})} \right] [-] \quad \text{Rov.10.37}$$

Radiálny uhlový faktor je počítaný v oboch prípadoch rovnako:

$$a'_{i,j+1} = \frac{1}{\frac{4 \cdot F_{i,j} \cdot \cos(\phi_{i,1})}{\sigma_i \cdot c_{l,i,j}} - 1} [-] \quad \text{Rov.10.38}$$

Proces sa opakuje, až kým nie je dosiahnutý dostatočne malý rozdiel medzi vypočítanými hodnotami v predchádzajúcom kroku a aktuálnom kroku, z rovníc 10.37, 10.38 a 10.39. Uhol nastavenia profilu bol spočítaný z goniometrie

$$\gamma_{i,j} = 180 - (\phi_{i,j} - \alpha_{i,j}) [^\circ] \quad \text{Rov.10.39}$$

## 10.6 Výsledné hodnoty

Vypočítané hodnoty sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke. Hodnoty axiálneho a radiálneho uhlového faktora nadobudli dostatočnú presnosť spravidla po 9 krokoch. Hodnoty pre element 10, nebolo možné vypočítať, nakoľko uhol nábehu  $\alpha$  sa dostal mimo rozsah merania z aerodynamického tunela počas iteračného postupu. Výkres lopatky je priložený v prílohe C.

Tab. 10.1 Výsledné hodnoty po iterácii [autor]

i	r <sub>i</sub> [-]	φ <sub>i,1</sub> [°]	c <sub>i</sub> [m]	φ <sub>i,j</sub> [°]	α <sub>i,j</sub> [°]	γ <sub>i,j</sub> [°]	a <sub>i,j+1</sub> [-]	a' <sub>i,j+1</sub> [-]	Δa [-]	Δa' [-]
1	2.97	5.00	0.08	4.97	6.48	181.50	0.34	0.005	4.7E-06	6.8E-08
2	2.66	5.58	0.09	5.56	6.48	180.92	0.33	0.005	4.7E-06	5.7E-08
3	2.35	6.31	0.10	6.29	6.48	180.19	0.33	0.006	3.4E-06	5.4E-08
4	2.03	7.26	0.12	7.23	6.47	179.24	0.34	0.008	2.3E-06	5.9E-08
5	1.72	8.54	0.14	8.49	6.45	177.96	0.34	0.011	1.2E-06	2.2E-07
6	1.41	10.35	0.17	10.28	6.43	176.15	0.34	0.017	1.0E-06	1.1E-07
7	1.09	13.10	0.21	12.98	6.37	173.40	0.34	0.027	8.2E-07	3.0E-07
8	0.78	17.71	0.27	17.47	6.26	168.79	0.34	0.051	1.0E-07	1.0E-06
9	0.47	26.54	0.36	25.94	5.90	159.96	0.34	0.125	5.7E-07	1.5E-06
10	0.16	45.47	0.3427	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx	x.xx

### 10.7 Výpočet účinnosti

Opět je možné postupovat podle návodu v literatuře [28]. Pro výpočet byl použitý následující vzt'ah. Vzt'ah je počítané len pre hodnoty 9, nakoľko je opäť nutné zohľadniť vplyv rotoru veternej turbíny.

$$C_p = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=1}^9 F_{i,j} \cdot \sin^2(\phi_{i,j}) \cdot (\cos\phi_{i,j} - \lambda_{r,i} \cdot \sin\phi_{i,j}) \cdot$$

*Rov.10.41*

$$(\sin\phi_{i,j} + \lambda_{r,i} \cdot \cos\phi_{i,j}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{C_{d,i,j}}{C_{l,i,j}} \right) \cdot \cot\phi_{i,j} \right] \cdot \lambda_{r,i}^2 [-]$$

Po dosadení

$$C_p = 0,487 [-]$$

*Rov.10.42*

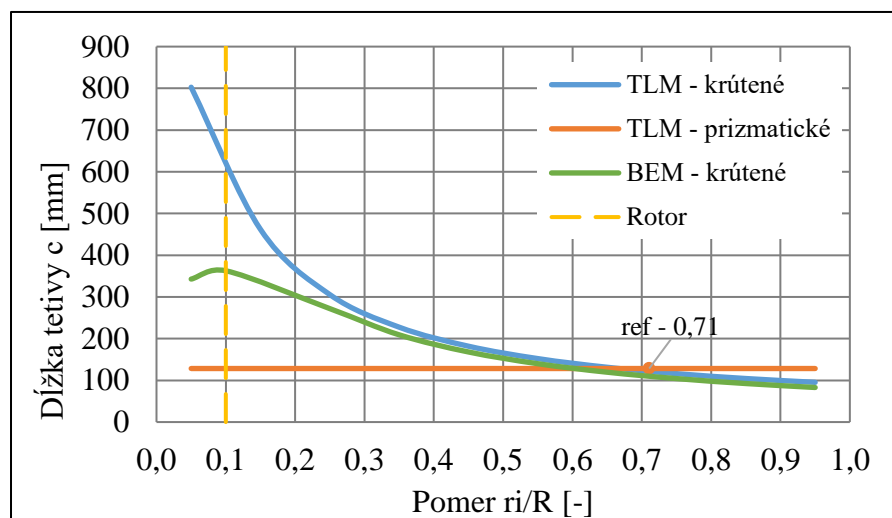
## 11 Porovnanie navrhnutých geometrií

Získané výsledky jednotlivých skúmaných geometrií je potrebné porovnať, aby bolo možné vybrať najvhodnejšie riešenie.

### 11.1 Dĺžka tetivy

V grafe 11.1 je zobrazené porovnanie dĺžky tetív pre jednotlivé navrhované geometrie. Žltá čiara vyznačuje ukončenie navrhovaných lopatiek, v tomto mieste sa končí aerodynamický profil a plynulo nadväzuje na päť lopatiek. Táto hodnota bola zvolená na 10 % z priemeru rotora na základe odporúčania vid'.kap.8.8. Pre krútené lopatky navrhnuté pomocou TLM, by bolo vhodné zvážiť ukončenie už pri hodnote 20 %, z dôvodu rýchlo rastúcej dĺžky tetivy. Pri veľkých polomeroch sú dĺžky tetív krútených lopatiek pre oba postupy takmer totožné.

Prizmatické lopatky majú tvar rovnej čiary, nakoľko dĺžka tetivy bola spočítaná len pre referenčný polomer, tá bola použitá pre všetky skúmané elementy. Uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži

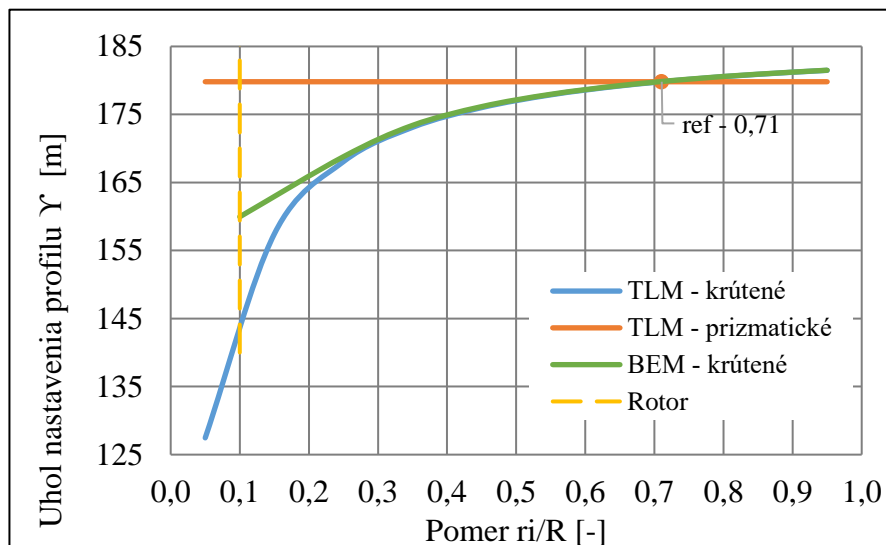


Obr. 11.1 Porovnanie dĺžky tetivy [autor]

### 11.2 Uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži

Tak isto ako pri dĺžke tetivy, aj v tomto prípade krútené lopatky z oboch postupov pri veľkých polomeroch vykazujú takmer totožné hodnoty. Pri malých polomeroch je možno pozorovať rýchly nárast krútenia lopatiek. Lopatky navrhnuté teóriou TLM vykazujú v mieste ukončenia aerodynamickej časti lopatky pomerne veľké skrútenie, opäť by tak bolo vhodné zvážiť ukončenie už pri hodnote 20 % polomeru. Je nutné však poznamenať, že posledný element v teórii BEM nebolo možné ziterovať, v mieste ukončenia rotora by tak mal byť mierne väčší uhol.

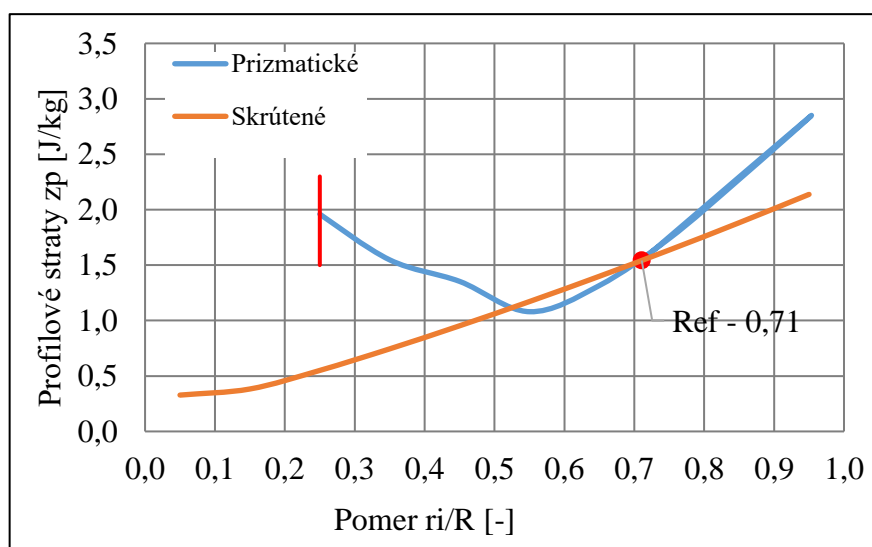
Prizmatické lopatky majú opäť tvar priamky, nakoľko uhol nastavenia bol správne navrhnutý len pre referenčný polomer.

Obr. 11.2 Porovnanie uhlu nastavenia profilu  $\gamma$  [autor]

### 11.3 Profilové straty

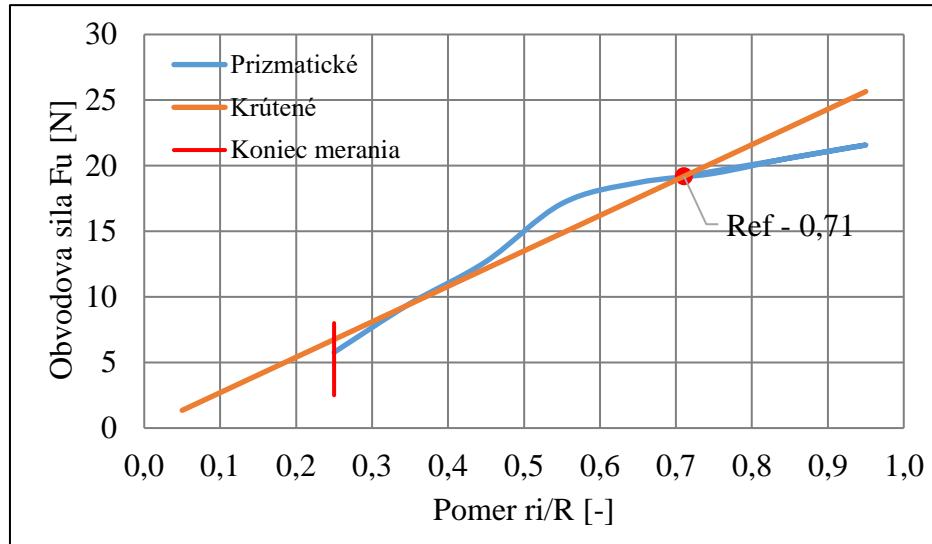
V tomto bode je možné porovnať len lopatky počítané teóriou lopatkovej mreže, nakoľko pre BEM teóriu tieto straty počítané neboli. V miestach, kde boli prizmatické lopatky navrhnuté správne, teda v blízkosti referenčného polomeru, sú krivky pomerne blízko. S rastúcou vzdialenosťou od referenčného polomeru dochádza k zmene nábehového uhlu  $\alpha$ . V dôsledku tejto zmeny rastie hodnota odporového koeficientu  $C_d$  a klesá hodnota vztlakového koeficientu  $C_l$ . Za vyznačenou červenou hranicou nadobúda uhol nábehu  $\alpha$  hodnoty, pre ktoré profil nebol meraný v dôsledku príliš vysokého odporu a malého vztlaku.

Menšie straty u prizmatických lopatiek, v oblasti za referenčným polomerom smerom k päte lopatky sú spôsobené zvolením uhlu nábehu  $\alpha$ , kedy ešte nie je dosahovaný maximálny pomer vztlakového a odporového koeficientu pre krútené lopatky (kap.8.3).

Obr. 11.3 Porovnanie profilových strát  $z_p$  [autor]

## 11.4 Obvodová síla

Vzt'ah medzi obvodovými silami prizmatických a krútených lopatiek má obdobný charakter, ako priebeh profilových strát. Tak isto vyššia obvodová síla za referenčným polomerom je spôsobené voľbou nábehového uhlu pod hranicou maxima vid'. kap. 8.3.



Obr. 11.4 Obvodové sily prizmatických a krútených lopatiek [autor]

## 11.5 Výkonová charakteristika

Výkonovú charakteristiku je možné odvodiť zo vzťahu pre výkon veternej turbíny 8.13. Hodnota 16/27 symbolizuje maximálnu možnú účinnosť veterného stroja bez strát. Pre navrhnuté geometrie bude táto hodnota nahradená vypočítanou účinnosť  $c_p$ , pre každú skúmanú geometriu.

Elektrický výkon:

$$P_{el} = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot c_w^3 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \eta \text{ [W]} \quad \text{Rov.11.1}$$

Pre všetky geometrie bola uvažovaná konštantná účinnosť. To znamená, že zariadenie musí pracovať s konštantnou rýchloběžnosťou (vid'.rov.4.1), pre ktorú bola navrhnutá aerodynamika. Pre zachovanie rýchloběžnosti na konštantnej hodnote je nutná zmena otáčok rotora. V tomto momente sa stretáva aerodynamický návrh s návrhom vhodných elektronických zariadení, prípadne prevodovky, ktoré by boli schopné zabezpečiť produkciu elektrickej energie pri zmene otáčok. Toto je však nad rámec tejto diplomovej práce.

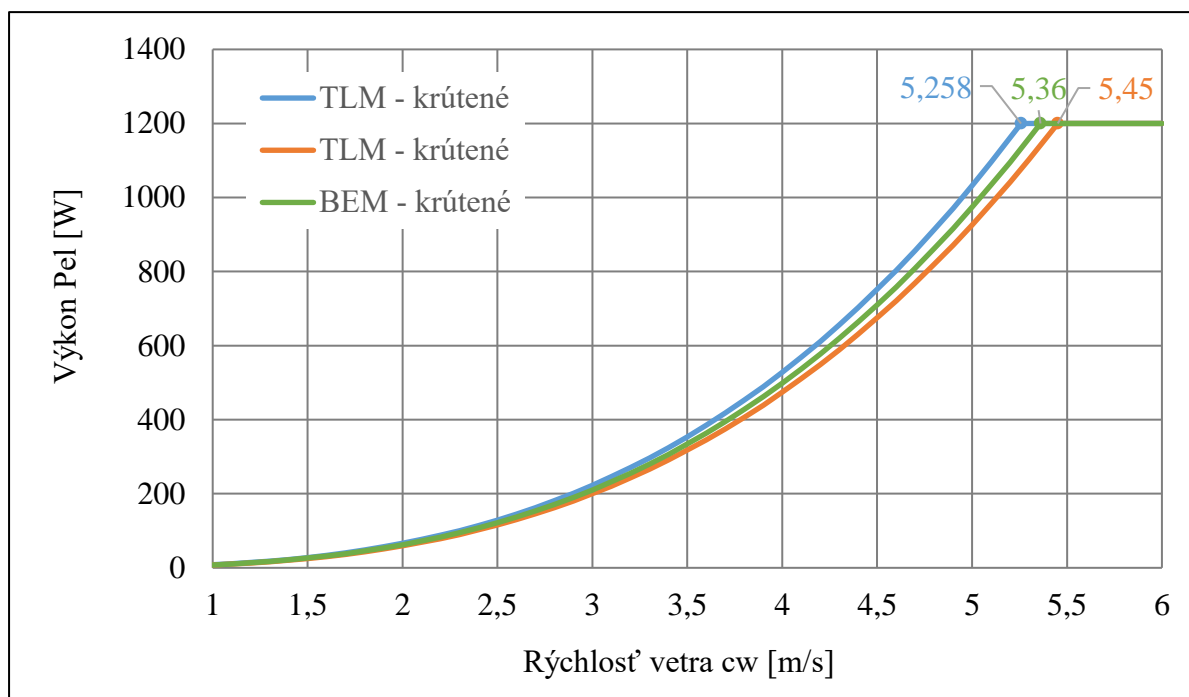
Všetky počítané geometrie dosahujú rovnaký menovitý výkon 1200, pri ekonomickej rýchlosti vid'. graf 7.4. To znamená, že krivky výkonu sú totožné. Pre možnosť porovnania je teda nutné uvažovať rovnaký maximálny polomer. Ten bol zvolený na základe výsledkov z kap.8.3.

Zvolená hodnota polomeru:

$$R = 3,04 \text{ [m]} \quad \text{Rov.11.2}$$



V prípade zvoleného skúmaného polomeru sa charakteristiky odlišujú, v hodnote kedy dosiahnu menovitý výkon. Pri zhotovení bol uvažovaný rozbeh turbíny už od nulovej rýchlosti, čo v realite pre odpor mechanických častí nie je možné. To by výslednú krivku mierne upravilo.



Obr. 11.5 Výkonová charakteristika krútených lopatiek [autor]

### 11.6 Množstvo vyrobenej energie za rok

Vyrobenú energiu za rok je možné spočítať z Weibullovoho rozdelenia. V kapitole 7, bola odvodená hustota energie, ktorú je možné získať na zvolenej lokalite v priebehu jedného roka na jednom metri štvorcovom vid'rov.7.15. Prenásobením tejto hodnoty účinnosťou a povrchom skúmaných geometrií, je získané množstvo energie, ktorú sú schopné vyrobiť v priebehu jedného roka. Výsledná vyrobená energia je pre všetky geometrie rovnaká, mení sa len polomer ich lopatiek.

Množstvo energie vyrobené krútenými lopatkami podľa TLM:

$$E = E_{weibull} \cdot S \cdot c_p = 5185 \text{ [kWh} \cdot \text{rok]}$$

Rov.11.3

### 11.7 Ekonomické zhodnotenie

Porovnanie finančnej náročnosti jednotlivých riešení vychádza z priemeru cien zariadení ponúkaných dvoma výrobcami. K väčšiemu množstvu cien sa nepodarilo dostať. Výkonovo ide o porovnateľné zariadenia, ale nakoľko boli navrhované inú rýchlosť vetra, majú polovičný polomer, ako skúmaná geometria. Cena turbíny v prípade skúmaných lopatiek je preto vyššia. U prizmatických lopatiek bola uvažovaná polovičná hodnota pre zohľadnenie nižšej ceny výroby.

Tab. 11.1 Porovnanie cien [62] [63] [64]

	<b>Bornay 1500 W</b>	<b>Automaxx 1200 W</b>	<b>Priemer</b>	<b>BEM krútené</b>	<b>TLM krútené</b>	<b>TLM priz.</b>
Turbína	3 970 €	1 625 €	2 798 €	3 839 €	3 809 €	3 298 €
Regulátor	727 €	500 €	614 €	614 €	614 €	614 €
Veža	1 072 €	1 072 €	1 072 €	1 072 €	1 072 €	1 072 €
Doprava	200 €	100 €	150 €	150 €	150 €	150 €
Batéria	4 000 €	4 000 €	4 000 €	4 000 €	4 000 €	4 000 €
Montáž	500 €	500 €	500 €	500 €	500 €	500 €
Investícia	<b>10 469 €</b>	<b>7 797 €</b>	<b>9 133 €</b>	<b>10 175 €</b>	<b>10 145 €</b>	<b>9 633 €</b>

Z hodnôt v tab.11.1 je možné vypočítať dobu návratnosti. Ročný zisk bol spočítaný z priemernej ceny energie v Slovenskej republike 0,15 €/kWh. Pri výpočte sa predpokladá, že vyrobená energia bude uskladnená v batériách. Náklady na údržbu boli zvolené na 2 %, z celkovej investície ročne. Z týchto hodnôt bola určená návratnosť investície s prihliadnutím na štátnu dotáciu a bez nej.

Tab. 11.2 Doba návratnosti [autor]

	<b>BEM krútené</b>	<b>TLM krútené</b>	<b>TLM priz.</b>
Investícia [€]	10 175	10 145	9 633
Energia [kWh/rok]	5 185	5 185	5 185
Ročný zisk [€/rok]	777.8	777.8	777.8
Údržba [€/rok]	203.5	202.9	192.7
Dotácia [€]	1 680	1 680	1 680
Návratnosť - dotácia [rok]	14.79	14.73	13.59
Návratnosť - bez dotácie [rok]	17.72	17.65	16.46

Je nutné podotknúť, že toto ekonomické zhodnotenie je len približné z dôvodu nedostatku údajov, veľká časť parametrov preto bola zvolená. Pre zistenie rozdielu medzi navrhovanými geometriami sú získané hodnoty však dostatočné. Z tab.11.2 plynie, že je lepšie zvoliť prizmatické lopatky. To síce vedie k väčšiemu výslednému polomeru, pri takto malom výkone je tento rozdiel zanedbateľný.

## 12 Závěr

Veterný potenciál Slovenskej republiky sa ukázal, ako podpriemerný v rámci štátov Európskej únie. Pri jeho využití by mohol pokryť len 3 % spotreby elektrickej energie. Nakoľko na území sa v súčasnosti nachádzajú iba dve veterné elektrárne o výkone 3,14 MW, zostáva tu stále miesto pre rozvoj tohto odvetvia vid'.kap.2.5.

Dopad veternej energetiky na životné prostredie bol skúmaný z viacerých hľadísk. Ukázalo sa, že akustické a optické emisie sú pri dodržaní odporúčanej vzdialenosti od ľudských obydli zanedbateľné. Tak isto aj vplyv na faunu a flóru, stav podzemných vôd a pôdu je minimálny pri rešpektovaní určitých pravidiel, vid'. kap.3. Skúmané bolo tiež množstvo vyprodukovaných emisií vzhľadom na životný cyklus zariadenia. Ukázalo sa, že produkované množstvá škodlivín sú výrazne nižšie ako pri použití konvenčných technológií vid'. grafy 3.4 a 3.5. Pre celkové posúdenie by však bolo nutné zohľadniť produkované emisie inými energetickými zariadeniami v prípade nedostatku vetra.

Lokalita bola vybraná v oblasti Podunajskej nížiny, kde je možné predpokladať mierne vyššiu veternú aktivitu ako na väčšine územia vid'. kap.2.5. Pre zvolenú lokalitu boli následne získané dáta veternosti od Slovenského hydrometeorologického ústavu. Tieto údaje boli spracované pomocou Weibullovoho rozdelenia, ktoré je bežne používané v oblasti veternej energetiky. Ukázalo sa, že rýchlosti na zvolenej lokalite sú pod odporúčanými limitmi pre ekonomickú návratnosť inštalácie, vid'.kap.7.4 a 7.5. Potvrďuje sa tak nízky energetický potenciál Slovenskej Republiky.

Získaná ekonomická rýchlosť bola použitá pre návrh aerodynamiky lopatiek. Počítané boli krútené a prizmatické lopatky pomocou teórie lopatkovej mreže (TLM) a krútené lopatky pomocou „blade element momentum theory“ (BEM). Najvyššiu účinnosť dosahujú podľa očakávaní krútené lopatky (TLM), nakoľko boli uvažované len profilové straty. Zanedbané boli straty vírením za rotorom a konečným počtom lopatiek (vid'.kap.8.7) Z tohto dôvodu krútené lopatky podľa BEM vykazujú účinnosť až o 2,9 % nižšiu. Teóriu BEM je teda možné považovať za presnejšiu, čo potvrdzuje aj použitá literatúra. Podobný pokles účinnosti je možné predpokladať aj u prizmatických lopatiek.

Pri malých polomeroch hlavne krútené lopatky TLM vykazujú značné predĺženie tetivy a zväčšenie uhlu nastavenia profilu v lopatkovej mreži, bolo by tak vhodné zvážiť ich ukončenie a napojenie na päť lopatky už pri hodnote pomeru polomerov 0,2 vid'. kap. 11.1 a 11.2. Výkonové charakteristiky sa nelíšia, nakoľko bol zadaný požadovaný výkon. Dochádza len k zmene polomeru lopatiek.

Z ekonomického hľadiska sa javia ako najvhodnejšie prizmatické lopatky. Táto geometria vykazuje najnižšiu účinnosť, to však vedie iba k zmene polomeru lopatiek. Rozdiel polomerov pre krútené TLM a prizmatické je 0,1691 m. Pri priemere veternej turbíny cez 6 m je tento rozdiel možné považovať za zanedbateľný. Je však nutné poznamenať, že zariadenia o priemere rotoru cez 6 m sú pre použitie v zástavbe príliš veľké. Mohli by spôsobovať nadmerný hluk, optické emisie a v prípade poruchy spôsobiť značné ublíženie na zdraví.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RYCHETNÍK, Václav. Větrné motory a elektrárny. 1. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-010-1563-7.
- [2] Proč fouká a jak vzniká vítr?. *In-pocasi* [online]. Praha: InMeteo, 2015, 2015.03.30 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-jak-vznika/>
- [3] Atmosféra. *Slideserve* [online]. 2.12.2012 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/ethel/a-t-m-o-s-f-r-a>
- [4] Danish wind industry association: Roughness and Wind Shear. *Drømstørre* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://xndrmsttre64ad.dk/wpcontent/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/shear.html>
- [5] History of the Anemometer: Mechanical Anemometer. *Thoughtco*[online]. 2017.04.04 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/history-of-the-anemometer-1991222>
- [6] HAU, Erich. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics. 2nd [English] ed. New York: Springer, c2006, 783 p. ISBN 35-402-4240-6.
- [7] CROME, Horst. Technika využití energie větr: Svépomocná stavba větrných zařízení. 1. Ostrava-Plesná: HEL, 2008. ISBN 3-922964-78-8.
- [8] Coupling aerodynamic loading to structural analysis of wind turbines through numerical simulation. *Researchgate* [online]. Natal: ABCM, 2011, 28.10.2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/281378227\\_Coupling\\_aerodynamic\\_loading\\_to\\_structural\\_analysis\\_of\\_wind\\_turbines\\_through\\_numerical\\_simulation](https://www.researchgate.net/publication/281378227_Coupling_aerodynamic_loading_to_structural_analysis_of_wind_turbines_through_numerical_simulation)
- [9] T. Al-Shemmeri. *Wind turbines*, 2010. 1st edition. Bookboon.com. ISBN 978-87-7681-692-6.
- [10] ELEKTRÁRNE:sVETERNÉ ELEKTRÁRNE. *Kves.uniza* [online]. Žilina: Elektrotechnická fakulta, 2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EEENERGETIK/A/ELEN-3\\_2.htm#3.2.3](http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/elektroenergetika1/ELEN2007/EEENERGETIK/A/ELEN-3_2.htm#3.2.3)
- [11] BURTON, Tony. Wind Energy Handbook, Second Edition: Aerodynamics of horizontal axis wind turbines. 2. 2011. ISBN 9780470699751.
- [12] Větrná energetika na Slovensku je stále v plienkach. *Energieprevas* [online]. EpV [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://energieprevas.sk/eko/21>

- [13] Veterná energia v Európe a na Slovensku. *Resonance* [online]. Bratislava: RESONANCE, 2014, 27.3.2014 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://resonance.sk/veterna-energia-v-europe-na-slovensku/>
- [14] Veterná energia. *Atlasoze* [online]. Bratislava: Energetické centrum [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.atlasoze.sk/vietor.html>
- [15] Veterná elektrárneň. *Obeccerova* [online]. Cerová [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.obeccerova.sk/o-cerovej/veterna-elektarren/>
- [16] JANÍČEK, František. *Obnoviteľné zdroje energie 1: Technológie pre udržateľnú budúcnosť*. 1. Bratislava: STU, 2007. ISBN 978-80-969-969777-0-3.
- [17] SHIFENG, Wang. *Renewable and Sustainable Energy Reviews: Impacts of wind energy on environment: A review* [online]. 4.2.2014, , 437-443 [cit. 2018-05-16]. DOI: 2015.04.137. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004074?via%3Dihub>
- [18]
- [19] Wind: How Loud Is A Wind Turbine?. *Ge* [online]. 2014, 2.8.104 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.ge.com/reports/post/92442325225/how-loud-is-a-wind-turbine/>
- [20] SAIDUR, R. *Renewable and Sustainable Energy Reviews: Environmental impact of wind energy* [online]. 17.5.2011 [cit. 2018-05-16]. DOI: 15 (2011) 2423–2430. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111000669?via%3Dihub>
- [21] KIREEVA, IS. *Hygienic problems in the location of modern wind electric power stations in their design* [online]. 2013 [cit. 2018-05-16]. DOI: 15 (2011) 2423–2430. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24624820>
- [22] Veterné farmy a elektrárne. *Elektrosmog* [online]. 2015, 14.5.2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://elektrosmog.voxo.eu/veterne-elektarne>
- [23] Shadow-Flicker [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.windawareireland.com/shadow-flicker/>
- [24] Matteo M. *Applied Energy: A new model for environmental and economic evaluation of renewable energy systems: The case of wind turbines* [online]. 10.2.2017, , 739-752 [cit. 2018-05-16]. DOI: 2016.11.124. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916317561?via%3Dihub>
- [25] BRUCKNER, Thomas. *Technology-specific Cost and Performance Parameters* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf)

- [26] *Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. Melford, 2011 [cit. 2018-05-16]. ISBN 978-92-9169-131-9. Dostupné z:  
[https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN\\_FD\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf)
- [27] SOVACOOOL, Benjamin K. *Energy Policy: Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey* [online]. 21-4-2008, , 2940– 2953 [cit. 2018-05-16]. DOI: 36 (2008) 2940– 2953. Dostupné z:  
[https://www.nirs.org/wp-content/uploads/climate/background/sovacool\\_nuclear\\_ghg.pdf](https://www.nirs.org/wp-content/uploads/climate/background/sovacool_nuclear_ghg.pdf)
- [28] MANWELL, M.F, J.G MCGOWAN a A. L. ROGERS. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition*. 2. Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-01500-1.
- [29] STUDENÍK, Jiří a Michal SVITAVSKÝ. *Energie větru, vody, biomasy: Větrné elektrárny a životní prostředí*. Code Creator, 1016. ISBN 978-80-88058-08-3.
- [30] *Větrné turbíny a ventilátory* [online]. Brno: fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2018-05-16]. ISSN ISSN 1804-8293. Dostupné z:  
<http://www.transformacni-technologie.cz/22.html>
- [31] Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR: Druhy větrných turbín. *Oenergetice* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
<http://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [32] Operation principle of wind turbines. *Tesla-institute* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
<http://www.tesla-institute.com/index.php/renewable-energy-articles/211-operation-principle-of-wind-turbines>
- [33] Existing Designs. *Blogspot* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
<http://suburbine.blogspot.cz/p/background-info.html>
- [34] HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINE: SINGLE-BLADE. *Archiexpo* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
<http://www.archiexpo.com/prod/ades/product-125833-1289133.html>
- [35] CENTRAL EÒLICA. *Centraalselectriques* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
<https://centraalselectriques.weebly.com/central-eograveliques.html>
- [36] GERARD, Bois a Bayeiô CLAUDE. *UNSTEADY SIMULATION OF FLOW IN MICRO VERTICAL AXIS WIND TURBINE* [online]. 2010 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/234719434\\_UNSTEADY\\_SIMULATION\\_OF\\_FLOW\\_IN\\_MICRO\\_VERTICAL\\_AXIS\\_WIND\\_TURBINE](https://www.researchgate.net/publication/234719434_UNSTEADY_SIMULATION_OF_FLOW_IN_MICRO_VERTICAL_AXIS_WIND_TURBINE)
- [37] Diagram. *Pinterest* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z:  
<https://cz.pinterest.com/pin/272749321158991902/>

- [38] SMALL WIND TURBINES. *Cleanenergybrands* [online]. [cit. 2018-05-16].  
Dostupné z:  
<http://www.cleanenergybrands.com/shoppingcart/knowledgemanager/questions/157/101+renewable+-+small+wind+turbines>
- [39] KARIMIRAD, M. *Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms*. Switzerland: Springer, 2014. DOI: DOI 10.1007/978-3-319-12175-8\_2.
- [40] *Omafra* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: QIAN, Peng, Xiandong MA a Dahai ZHANG. Estimating Health Condition of the Wind Turbine Drivetrain System [online]. 12.10..2017 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.3390/en10101583. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1583/htm>
- [41] CLARKE, S. Electricity Generation Using Small Wind Turbines at Your Home or Farm. *Omafra* [online]. 2003, 2003 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.omafr.gov.on.ca/english/engineer/facts/03-047.htm>
- [42] Wind Turbine Towers. *Drømstørre* [online]. Danish Wind Industry Associatio, 200,n. l., 19.9.2003 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/tower.htm>
- [43] MICELI, Francesco. Wind farms construction. *Windfarmbop* [online]. 2018, 20.4.2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.windfarmbop.com/category/foundations/>
- [44] BAILEY, Helen. *Assessing Environmental Impacts of Offshore Wind Farms: Lessons Learned and Recommendations for the Future* [online]. 2014 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1186/2046-9063-10-8. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266086383\\_Assessing\\_Environmental\\_Impacts\\_of\\_Offshore\\_Wind\\_Farms\\_Lessons\\_Learned\\_and\\_Recommendations\\_for\\_the\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/266086383_Assessing_Environmental_Impacts_of_Offshore_Wind_Farms_Lessons_Learned_and_Recommendations_for_the_Future)
- [45] NÔTA, Ivan. *Stavba mikro a malej veternej elektrárne* [online]. WEBY GROUP, 2015, 1.1.2015 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.stavebnik.sk/clanky/stavba-mikro-a-malej-veternej-elektrarne-.html>
- [46] Small Wind Guidebook. *Windexchange* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://windexchange.energy.gov/small-wind-guidebook#site>
- [47] Vetrné pomery na Slovensku. *Nun* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.nun.sk/vietor.htm>
- [48] *Solárna mapa slovenska* [online]. Bratislava: Energetické centrum [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [http://www.efilip.sk/poradenstvo/energie\\_vykurovanie/solarne\\_systemy/solarna\\_mapa\\_slovenska](http://www.efilip.sk/poradenstvo/energie_vykurovanie/solarne_systemy/solarna_mapa_slovenska)

- [49] Aeolos Wind Turbine 1kW Specification. *Aeolos* [online]. London [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.windturbinestar.com/1kwh.html>
- [50] SMALL WIND TURBINES: Wind+. *Bornay* [online]. Spaim [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.bornay.com/en/products/small-wind-turbines/wind-plus-swt>
- [51] Monitorovacia sieť, merané veličiny a metódy monitorovania: Sieť pozemných synoptických staníc. *SHMU* [online]. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk/sk/?page=317>
- [52] Mapy.cz [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://sk.mapy.cz/zakladni?x=18.0081416&y=47.9535422&z=17&m3d=1&height=773&yaw=-26.579&pitch=-90&l=0&base=ophoto>
- [53] Popisná statistika. *Mathonline* [online]. Brno: Ústav Matematiky, 2005 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/Popisna-statistika/sc-1146-sr-1-a-139/default.aspx>
- [54] USTA, Ilhan a Ibrahim ARIK. Energy Conversion and Management: A new estimation approach based on moments for estimating Weibull parameters in wind power applications [online]. 13.3.2018, , 570-578 [cit. 2018-05-16]. DOI: 2018.03.033. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418302632>
- [55] MOHAMMADI, Kasra, Omid ALAVI a . Energy Conversion and Management: Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density [online]. 21.11.2015, , 322-335 [cit. 2018-05-16]. DOI: 2015.11.015. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415010286?via%3Dihub>
- [56] Priemerná teplota vzduchu v ročných obdobiach v Hurbanove. *SHMU* [online]. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2013, 2.5.2013 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=431>
- [57] Hustota suchého vzduchu. *Tzb-info* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/70-hustota-sucheho-vzduchu>
- [58] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopatkové stroje*. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-7204-297-1.
- [59] STAINO a BASU. *Journal of Sound and Vibration: Actuator control of edgewise vibrations in wind turbine blades* [online]. 6.12.2011, , 1233-1256 [cit. 2018-05-16]. DOI: 2011.11.003. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X11008819>
- [60] NACA 63(2)-615: Xfoil prediction polar at RE=200,000 Ncrit=9. *Airfoiltools* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca632615-il-200000>



- [61] *Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství [cit. 2018-05-16]. ISSN ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/16.html#314>
- [62] Wind Turbine Generator kit 1200W. *Ebay* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/Wind-Turbine-Generator-kit-1200W-48V-21A-Automaxx-Windmill-MPPTchargecontroll/183175332991?hash=item2aa619c47f:g:x5EAAOSwhJdaz0Rl>
- [63] Wind turbine Bornay 1500W 24v 2 blades. *Merkasol* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: [https://www.merkasol.com/epages/62387086.sf/en\\_GB/?ObjectPath=/Shops/62387086/Products/aerog039](https://www.merkasol.com/epages/62387086.sf/en_GB/?ObjectPath=/Shops/62387086/Products/aerog039)
- [64] Nissan Now Offers Up To 9.6 kWh xStorage Residential Battery, Larger/Stackable Commercial ESS Systems Too. *Insideevs* [online]. 4.12.2016 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://insideevs.com/nissan-now-offers-up-to-9-6-kwh-xstorage-residential-battery-largerstackable-commercial-ess-systems-too/>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK

Skratka	Význam	
TLM	Teória lopatkovej mreže	
BEM	Blade element momentum theory	
SHMÚ	Slovenský hydrometeorologický ústav	
HAWT	Horizontálna axiálna veterná turbína	

Symbol	Veličina	Jednotka
$\alpha$	Uhol nábehu	°
$\alpha_{\text{design}}$	Návrhový uhol nábehu	°
$\beta$	Uhol sklonu relatívnej rýchlosti	°
$\Gamma$	Gamma funkcia	—
$\delta$	Uhol sklonu výslednej sily od axiálneho smeru	°
$\Delta$	Rozdiel	—
$\varepsilon$	Kĺzavý uhol	°
$\eta_{\text{celk}}$	Účinnosť celková	—
$\eta_{\text{rot}}$	Účinnosť rotora	—
$\eta_{\text{gen}}$	Účinnosť generátora	—
$\eta_{\text{prevod}}$	Účinnosť prevodovky	—
$\theta_p$	Uhol odklonu od roviny rotácie	°
$\theta_T$	Uhol krútenia elementu	°
$\lambda$	Súčiniteľ rýchlobežnosti	—
$\lambda_r$	Lokálny súčiniteľ rýchlobežnosti	—
$\nu$	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\rho$	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$

$\sigma$	Lokálna hustota lopatkovej mreže	—
$\Upsilon$	Uhol nastavenia profilu v lopatkovej mreži	°
$\phi$	Uhol relatívneho smeru prúdu vzduchu na element	°
$\Omega$	Uhlová rýchlosť rotoru	$rad \cdot s^{-1}$
$\omega$	Uhlová rýchlosť	$rad \cdot s^{-1}$
$a$	Axiálny indukčný faktor	—
$a'$	Radiálny indukčný faktor	—
$a_{opt}$	Optimálna merná práca	$J \cdot kg^{-1}$
$a_{priz}$	Merná práca prizmatických lopatiek	$J \cdot kg^{-1}$
$a_{skut}$	Skutočná merná práca	$J \cdot kg^{-1}$
$B$	Počet lopatiek	—
$c$	Parameter mierky	—
$c$	Dĺžka tetivy	$m$
$c_A$	Rýchlosť v axiálnom smere	$m \cdot s^{-1}$
$c_{A1}$	Rýchlosť v axiálnom smere tesne pre rotorom	$m \cdot s^{-1}$
$c_{A2}$	Rýchlosť v axiálnom smere tesne za rotorom	$m \cdot s^{-1}$
$c_e$	Rýchlosť vzduchu za rotorom	$m \cdot s^{-1}$
$C_d$	Odporový súčiniteľ	—
$C_{d,design}$	Návrhový odporový súčiniteľ	—
$C_l$	Vztlakový súčiniteľ	—
$C_{l,design}$	Návrhový vztlakový súčiniteľ	—
$cp$	Výkonový koeficient	—
$C_T$	Lokálny ťahový faktor	—
$c_{1u}$	Rýchlosť tesne pred rotorom v obvodovom smere	$m \cdot s^{-1}$
$c_{2u}$	Rýchlosť tesne za rotorom v obvodovom smere	$m \cdot s^{-1}$
$c_w$	Rýchlosť vzduchu pre rotorom	$m \cdot s^{-1}$

$E_k$	Kinetická energia	$J$
$E$	Hustota energie	$J \cdot m^{-2} \cdot rok^{-1}$
$F$	Výsledná sila na lopatku	$N$
$F_a$	Axiálna sila	$N$
$F_{a,iz}$	Axiálna sila pri izoentropickom prúdení	$N$
$F_d$	Odporová sila	$N$
$F_l$	Vztlaková sila	$N$
$F_u$	Obvodová sila	$N$
$h$	Dĺžka tried	—
$i$	Číslo elementu	—
$k$	Tvarový parameter	—
$l_u$	Merná obvodová práca	$J \cdot kg^{-1}$
$m$	Počet tried	—
$m$	Hmotnosť	$kg$
$\dot{m}$	Hmotnostný tok	$kg \cdot s^{-1}$
$M_k$	Krútiaci moment	$N \cdot m^{-1}$
$N$	Počet elementov	—
$n$	Rozsah štatistického súboru	—
$R$	Maximálny polomer lopatky	$m$
$r$	Polomer lopatky	$m$
$r_l$	Polomer lopatky	$m$
$Re$	Reynoldsovo číslo	—
$r_h$	Polomer náboja	$m$
$r_{ref}$	Referenčný polomer	$m$
$P$	Výkon	$W$
$p_{A1}$	Tlak vzduchu tesne pred rotorom	$Pa$

$p_{A2}$	Tlak vzduchu tesne za rotorom	$Pa$
$p_e$	Tlak za rotorom	$Pa$
$P_{el}$	Elektrický výkon	$W$
$P_{opt}$	Optimálny výkon	$W$
$P_{priz}$	Výkon prizmatických lopatiek	$W$
$P_{skut}$	Skutočný výkon	$W$
$P_{vietor}$	Výkon vetra	$W$
$P_{VT}$	Výkon veternej turbíny	$W$
$P_w$	Výkon vetra	$W$
$p_w$	Tlak pred rotorom	$Pa$
$P_{weibull}$	Výkon vetra podľa Weibulla	$W \cdot m^{-2}$
$p_z$	Tlakové straty	$Pa$
$S$	Plocha	$m^2$
$s$	Dráha	$m$
$s$	Rozteč lopatkovej mreže	$m$
$S_A$	Plocha rotoru	$m$
$S_{A1}$	Plocha tesne pred rotorom	$m$
$S_{A2}$	Plocha tesne za rotorom	$m$
$S_e$	Plocha na vstupe do kontrolného objemu	$m$
$S_w$	Plocha na vstupe do kontrolného objemu	$m$
$T$	Ťahová sila	$N$
$t$	Čas	$s$
$u$	Obvodová rýchlosť	$m \cdot s^{-1}$
$V$	Objem	$m^3$
$x_1$	Minimálna hodnota štatistického súboru	—
$x_i$	Variačný obor	—

$x_n$	Maximálna hodnota štatistického súboru	—
$w$	Relatívna rýchlosť	$m \cdot s^{-1}$
$z_p$	Profilové straty	$J \cdot kg^{-1}$

## ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Značenie	Názov	Strana
Obr. 2.1	Sily pôsobiace na prúdenie [2]	14
Obr. 2.2	Prúdenie na planéte [3]	14
Obr. 2.3	Miskový anemometer [3]	15
Obr. 2.4	Priebeh prúdenia okolo turbíny [8]	16
Obr. 2.5	Betzov limit [10]	17
Obr. 2.6	Priemerné rýchlosti vetra Slovensko [10]	18
Obr. 2.7	Veterné parky Slovensko [14]	19
Obr. 3.1	Základné dopady na životné prostredie [17]	20
Obr. 3.2	Rýchlosť vetra vs intenzita hluku [20]	22
Obr. 3.3	<i>Emisia tieňa veternej elektrárne [23]</i>	23
Obr. 3.4	Porovnanie produkovaného CO <sub>2</sub> [Autor]	25
Obr. 3.5	Produkcia NO <sub>x</sub> a SO <sub>x</sub> [Autor]	26
Obr. 3.6	Porovnanie počtu úmrtí za rok [20]	28
Obr. 3.7	Dopad výroby el. energie na zásoby vody [20]	29
Obr. 4.1	Vplyv strát na účinnosť C <sub>p</sub> [30]	30
Obr. 4.2	Savoniosov veterný motor [33]	32
Obr. 4.3	Princíp aerodynamického vztlaku [32]	32
Obr. 4.4	Turbíny s jednou lopatkou [34]	32
Obr. 4.5	Vertikálne vztlakové turbíny [35]	33
Obr. 4.6	Porovnanie účinností veterných motorov [36]	33
Obr. 5.1	Komponenty veternej turbíny [37]	34
Obr. 5.2	Konštrukcia lopatky [6]	35
Obr. 5.3	Oceľové príruby [6]	35
Obr. 5.4	„Cross bolts“ [6]	35

---

Obr. 5.5	Vysokopevnostná hliníková příruba [6]	36
Obr. 5.6	Rôzne typy rotorov [38]	36
Obr. 5.7	<i>Bežne usporiadanie pohonu turbíny [40]</i>	37
Obr. 5.8	Zmena výkonu vetra s rastúcou výškou veže [41]	38
Obr. 5.9	Používané veže verných turbín [38]	39
Obr. 5.10	Príklad nesprávneho dimenzovania základov [43]	40
Obr. 5.11	Najpoužívanejšie typy offshore základov [44]	40
Obr. 6.1	Schéma „Grid-on“ systému [46]	41
Obr. 6.2	Schéma „Grid-off“ systému [46]	42
Obr. 6.3	Základné parametre vybraných zariadení [49] [50]	43
Obr. 6.4	Priebeh výkonu v závislosti na rýchlosti vetra [49] [50]	44
Obr. 7.1	Umiestnenie Lokality [51]	45
Obr. 7.2	Poloha lokality [52]	45
Obr. 7.3	Absolútna početnosť pre zvolenú lokalitu [autor]	46
Obr. 7.4	Porovnanie distribučnej funkcie a absolútnej početnosti [autor]	48
Obr. 7.5	Rast výkonu s rastúcou rýchlosťou [autor]	49
Obr. 7.6	Rast výkonu v závislosti na distribučnej funkcii [autor]	50
Obr. 8.1	Rozdelenie na elementy [59]	51
Obr. 8.2	Základné tvarové parametre [28]	52
Obr. 8.3	NACA 63(2)-615 – Koeficienty $C_l$ a $C_d$ pri zmene $\alpha$ [60]	53
Obr. 8.4	NACA 63(2)-615 – Geometrický tvar pre $c = 100$ [60]	53
Obr. 8.5	NACA 63(2)-615 Pomer $C_l/C_d$ [60]	54
Obr. 8.6	Princíp odtrhnutia od medznej vrstvy [28]	54
Obr. 8.7	Kontrolný objem [30]	55
Obr. 8.8	Účinnosť $c_p$ v závislosti na rýchlobežnosti $\lambda$ [6]	57
Obr. 8.9	Charakteristika profilu [28]	58



Obr. 8.10	I-s konfuzorovej lopatkovej mreže [61]	60
Obr. 9.1	Charakteristika profilu a zmena hodnôt pre prizmatické lopatky [28]	64
Obr. 10.1	Kontrolný objem [autor]	69
Obr. 10.2	Ukážka vírenia za rotorom [28]	71
Obr. 10.3	Charakteristika premenných [28]	73
Obr. 11.1	Porovnanie dĺžky tetivy [autor]	78
Obr. 11.2	Porovnanie uhlu nastavenia profilu $\Upsilon$ [autor]	79
Obr. 11.3	Porovnanie profilových strát zp [autor]	79
Obr. 11.4	Obvodové sily prizmatických a krútených lopatiek [autor]	80
Obr. 11.5	Výkonová charakteristika krútených lopatiek [autor]	81

## **ZOZNAM TABULIEK**

<b>Značenie</b>	<b>Názov</b>	<b>Strana</b>
Tab. 3.1	Príklad limitov hluku pre rôzne oblasti [16]	21
Tab. 3.2	Porovnanie intenzít hluku [16]	22
Tab. 3.3	Množstvo materiálu a jeho emisie [24]	24
Tab. 3.4	Porovnanie úmrtnosti jednotlivých druhov [20]	29
Tab. 4.1	Rozdelenie podľa súčiniteľa rýchlobežnosti [16]	30
Tab. 8.1	Vypočítané hodnoty pre krútené lopatky - TLM [autor]	62
Tab. 9.1	Vypočítané hodnoty pre prizmatické lopatky - TLM [autor]	67
Tab. 10.1	Výsledné hodnoty po iterácii [autor]	76
Tab. 11.1	Porovnanie cien [62] [63] [64]	82
Tab. 11.2	Doba návratnosti [autor]	82

## **ZOZNAM PRÍLOH**

<b>Značenie</b>	<b>Názov</b>
Príloha A	Výkres krútené lopatky TLM
Príloha B	Výkres prizmatické lopatky TLM
Príloha C	Výkres krútené lopatky BEM