

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**JAN  
KALOUSEK**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kalousek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **491267**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Větrné turbíny s vertikální osou pro decentralizovanou energetiku**

Název bakalářské práce anglicky:

**Vertical axis wind turbines for distributed energy systems**

Pokyny pro vypracování:

Student úvodem seznámí čtenáře s problematikou větrné energetiky v globálním kontextu a připraví základní rozdělení větrných turbín, včetně rešerše komerčně dostupných technologií větrných turbín s vertikální osou ve výkonovém rozsahu nízkých výkonů pro použití v decentralizované energetice (míří na využití zejména v budovách).

Dále se ve své bakalářské práci bude v teoretické rovině věnovat základním komponentám větrných turbín a nastíní možnosti dalšího výzkumu a vývoje. Teoretická část se také bude věnovat aerodynamice větrných turbín s vertikální i horizontální osou a tyto teoretické poznatky posléze student aplikuje v praktické části závěrečné práce.

Samotná praktická část závěrečné práce bude cílit na aerodynamický a mechanický návrh větrné turbíny s vertikální osou vlastní koncepce. Mechanický návrh bude řešit zejména koncepci umístění lopatek na vertikální hřídel, jeho uložení a vyvedení elektrického výkonu včetně dodatečných možných modifikací pro navýšení výkonnosti stroje. Součástí řešení bude také výrobní a montážní postup větrné turbíny, konečně pak i popis metody experimentálního ověření účinnosti navrženého stroje v aerodynamickém tunelu.

Seznam doporučené literatury:

Aerodynamics for Engineering Students, Houghton, Carpenter, Valentine - Oxford publishing, Elsevier (2017)  
Fluid Dynamics and Thermodynamics of Turbomachinery, Dixon & Hall, Cambridge publishing, Elsevier (2014)  
online dostupné publikace na téma studentovy závěrečné práce indexované v databázích WoS a Scopus dostupné např. přes portál sciencedirect.com

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Špale ústav energetiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Jan Špale  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

---

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 2. června 2022

.....

## Anotační list

---

<b>Jméno autora:</b>	Jan Kalousek
<b>Název DP:</b>	Větrné turbíny s vertikální osou pro decentralizovanou energetiku
<b>Anglický název:</b>	Vertical axis wind turbines for distributed energy systems
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Ústav/Odbor:</b>	Ústav energetiky
<b>Vedoucí DP:</b>	Ing. Jan Špale
<b>Konzultant:</b>	-

### Bibliografické údaje:

Počet stran: 102  
Počet obrázků: 96  
Počet tabulek: 2  
Počet příloh: 19

**Klíčová slova:** Větrné turbíny s vertikální osou rotace, VAWT, Darrieova větrná turbína, S-VAWT, SB-VAWT, H-Darrieova větrná turbína

**Keywords:** Vertical axis wind turbines, VAWT, Darrieus wind turbine, S-VAWT, SB-VAWT, H-Darrieus wind turbine

### Anotace:

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu větrné turbíny s vertikální osou rotace malého výkonu určenou pro experimentální měření v aerodynamickém tunelu. Čtenář je nejprve obeznámen s obnovitelnými a neobnovitelnými zdroji energie a srovnáním jejich podílu na výrobě elektřiny a vyprodukovaných emisích skleníkových plynů. Následuje úvod do oboru větrné energetiky včetně zavedení základních veličin užívaných napříč větrnou energetikou. Na základě základního přehledu o větrné energetice je přistoupeno k rozlišení jednotlivých druhů větrných turbín a ke krátkému úvodu do aerodynamiky. Poznatky z části aerodynamiky jsou nadále využity při technickém popisu větrných turbín s vertikální i horizontální osou rotace. Technická část se zároveň podrobněji věnuje aerodynamické optimalizaci rotoru větrné turbíny s vertikální osou rotace pro vytvoření podrobnější představy o vlivu jednotlivých úprav jejího rotoru. Rešeršní část je zakončena možností instalace větrných turbín s vertikální osou rotace v decentralizované energetice. Posledním blokem práce je technický návrh větrné turbíny s vertikální osou rotace vlastní koncepce určené pro experimentální měření v aerodynamickém tunelu. Součástí příloh je výkresová dokumentace, která je podkladem pro následnou výrobu jednotlivých komponent větrné turbíny.

**Abstract:**

This bachelors thesis deals with design process of vertical axis wind turbine of small power output determined for experimental measurements in wind tunel. Reader is at first familiarized with renewable and non-renewable sources of energy and their share in produced electricity and emitted greenhouse gases emissions. First part is followed with brief introduction to wind energetics including derivation of basic formulas which are used across this field. On the basis of previous information basic introduction to types of wind turbines is presented and short brief into aerodynamics aswell. Knowledge acquired in aerodynamic section is then used in technical description of wind turbines with vertical and horizontal axis. Technical part of this text pays more attention to aerodynamic optimization of vertical axis wind turbine's rotor to create deeper understanding in impact of changes in rotor dimensions and configuration. General part of this text is ended with description of options in vertical axis wind turbine installation in distributed energy system. Last section takes look on technical design of custom vertical axis wind turbine mentioned at the beginning. Attachment of this bachelor's thesis contains technical drawings for components of designed wind turbine which make foundation for future production of prototype.

## Poděkování

---

Děkuji Ing. Janu Špalemu za podporu a užitečné rady při vypracovávání této práce a za poskytnutí možnosti volby vlastního tématu. Rovněž děkuji své rodině za podporu během bakalářského studia.

# Obsah

Seznam symbolů, indexů a zkratk.....	1
1. Úvod do problematiky obnovitelných zdrojů energie.....	2
1.1. Spotřeba energie .....	4
2. Úvod do problematiky větrné energetiky.....	6
2.1. Odvození vztahu pro výkon větrné turbíny.....	7
2.2. Možnosti instalace větrných turbín.....	9
2.3. Shrnutí výhod a nevýhod větrné energetiky.....	12
2.4. Základní statistika týkající se větrné energetiky .....	13
2.5. Budoucnost větrné energetiky: „POWER TO X“? .....	15
3. Typy větrných turbín.....	17
4. Aerodynamika větrných turbín.....	19
4.1. Zavedení základních aerodynamických veličin a vztahů.....	19
4.2. Charakteristiky proudění tekutiny kolem těles.....	22
4.2.1. Reynoldsovo číslo.....	22
4.2.2. Smykové napětí.....	23
4.2.3. Mezní vrstva.....	24
4.2.4. Kombinace vlivu Reynoldsova čísla a viskozity tekutiny .....	24
4.2.5. Další efekty přítomnosti viskozity v tekutině, změna charakteru proudění v mezní vrstvě.....	26
4.2.6. Tlakový gradient při obtékání tělesa obecného tvaru proudící tekutinou.....	28
4.2.7. Chování tekutiny během obtékání tělesa při uvažování vlivu působení Reynoldsova čísla, nekonstantního tlaku, efektů viskozity a smykového napětí a přítomnosti mezní vrstvy.....	30
4.3. Aerodynamický odpor.....	34
4.4. Aerodynamický vztlak.....	35
4.5. 3D efekty proudění kolem těles.....	37
4.6. Popis leteckého profilu .....	39
4.6.1. Letecký profil NACA0018 .....	40
5. Porovnání aerodynamické účinnosti jednotlivých druhů větrných turbín.....	42
6. Větrné turbíny s horizontální osou rotace (HAWT).....	44
6.1. Aerodynamika HAWT .....	44
6.1.1. Rychlostní rozklad na listu HAWT .....	45
6.1.2. Silový rozklad na listu HAWT .....	46
6.2. Komponenty HAWT .....	47
6.3. Výkonnostní třídy HAWT .....	49



6.4.	Instalace HAWT .....	50
7.	Větrné turbíny s vertikální osou rotace (VAWT) .....	52
7.1.	Komponenty VAWT .....	52
7.2.	Druhy VAWT .....	52
7.2.1.	Savoniova VAWT.....	53
7.2.2.	Darrieova VAWT .....	54
7.3.	Možnosti aerodynamické optimalizace S-VAWT: .....	57
7.3.1.	Volba profilu lopatek S-VAWT.....	57
7.3.2.	Konfigurace rotoru .....	59
7.3.3.	Další alternativy vylepšení aerodynamických vlastností.....	65
7.4.	Instalace VAWT .....	66
7.5.	Souhrn komerčně dostupných VAWT.....	68
8.	Nekonvenční modifikace větrných turbín.....	69
8.1.	Větrné turbíny s difuzorem (diffuser-augmented wind turbines, DAWT).....	69
8.2.	Větrné turbíny s více rotory (multi-rotor wind turbines).....	69
8.3.	Vznášející se větrná turbína (Buoyant Air turbine, BAT).....	69
9.	Praktická část-návrh S-VAWT malého výkonu určené pro experimentální testování vlastností rotoru v aerodynamickém tunelu .....	71
9.1.	Vstupní hodnoty a požadavky na technický návrh .....	71
9.2.	Návrh rozměrů a konfigurace rotoru .....	71
9.2.1.	Parametry aerodynamického tunelu.....	71
9.2.2.	Volba počtu lopatek.....	72
9.2.3.	Volba výšky lopatky (h).....	72
9.2.4.	Volba poloměru rotace lopatek (R).....	72
9.2.5.	Volba délky tělivity profilu lopatky (c).....	73
9.2.6.	Výpočet rozměrových poměrů rotoru navrhované S-VAWT .....	73
9.2.7.	Volba leteckého profilu lopatek rotoru .....	74
9.3.	Výpočet výkonu navržené S-VAWT .....	74
9.4.	Volba elektromotoru (generátoru).....	75
9.5.	Odhad otáček S-VAWT .....	76
9.6.	Technický návrh rotoru S-VAWT .....	77
9.6.1.	Možnosti konfigurace rotoru.....	80
9.7.	Možnosti návaznosti na bakalářskou práci .....	81
10.	Závěr.....	82
	Seznam veličin .....	83
	Seznam zdrojů .....	86

Seznam příloh.....	92
Seznam obrázků.....	93
Seznam tabulek.....	95

## Seznam symbolů, indexů a zkratek

---

OZ ... obnovitelný zdroj energie

NZ ... neobnovitelný zdroj energie

IEA ... International Energy Agency (Mezinárodní agentura pro energii)

VT ... větrná turbína

ONS ... označení pro vnitrozemí, například vnitrozemská větrná elektrárna

OFFS ... označení pro pobřežní vody, například větrná elektrárna umístěná na moři

PHS ... přečerpávací elektrárna

CAES ... uložště na stlačený vzduch

POWER TO X ... výroba zeleného vodíku pomocí větrných elektráren

HAWT ... větrná turbína s horizontální osou rotace

VAWT ... větrná turbína s vertikální osou rotace

NACA ... National Advisory Comitee for Aeronautics

DD ... označení pro větrné turbíny bez převodovky

IEC ... International Electrotechnical Commision

SVAWT ... Savoniova VAWT

DVAWT ... Darrieova VAWT

S-VAWT/ SB-VAWT ... Darrieova VAWT s rovnými lopatkami

DAWT ... větrná turbína s difuzorem

BAT ... vznášející se větrná turbína

# 1. Úvod do problematiky obnovitelných zdrojů energie

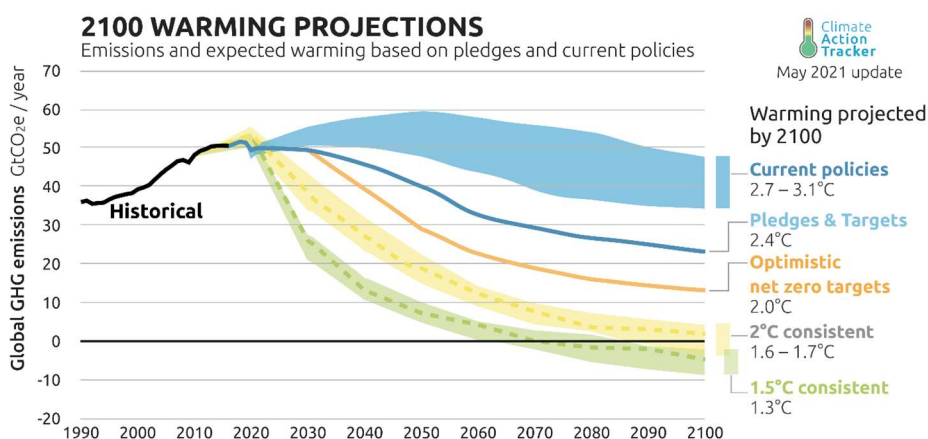
Požadavky na snižování emisí se celosvětově zvyšují kvůli nárůstu teploty v zemské atmosféře způsobené nadměrným obsahem skleníkových plynů. Růst teploty v zemské atmosféře výrazně ovlivňuje celý zemský ekosystém a přílišné ohřátí může mít za následek další lavinové efekty, které nadále podpoří navyšování teploty. Jako reakce na dosavadní problém byla v roce 2015 ustanovena Pařížská dohoda. [1]

Hlavními cíli této dohody jsou:

- dlouhodobý cíl-nepřesazení přírůstků celosvětové průměrné teploty o 2°C oproti před-industriální době
- pozastavení nárůstu emisí skleníkových plynů do roku 2020 (oproti roku 1990)
- snížení emisí o 50% do roku 2050 (oproti roku 1990)
- 100% snížení emisí do konce 21. století (oproti roku 1990)
- udržení navýšení teploty do 1,5°C (snaha nedosáhnout 2°C ustanoveného limitu).

Skleníkové plyny jako je vodní pára, oxid uhličitý atd. v atmosféře přirozeně udržují teplo potřebné k existenci života na Zemi (zabraňují odrazení sluneční radiace zpět do vesmíru), lidskou činností je ale jejich množství nadměrně zvyšováno čímž je narušována rovnováha celého ekosystému. Jedním z následků nepřirozeného navýšení obsahu skleníkových plynů v atmosféře je zmíněný přírůstek teploty. [2]

Na obrázku č. 1 jsou znázorněny odhadované predikce nárůstu teploty v podobě funkce množství emitovaného CO<sub>2</sub> v závislosti na roce. Modrým polem je označen důsledek momentálních celosvětových opatření, žlutě je označen pokles emisí skleníkových plynů potřebný k dosažení maximálně 2°C nárůstu teploty a zeleně je označen pokles nezbytný k dosažení 1,5°C přírůstku deklarovaného Pařížskou dohodou. [3]



Obrázek 1: Predikce nárůstu teploty s ohledem na množství emitovaných skleníkových plynů [3]

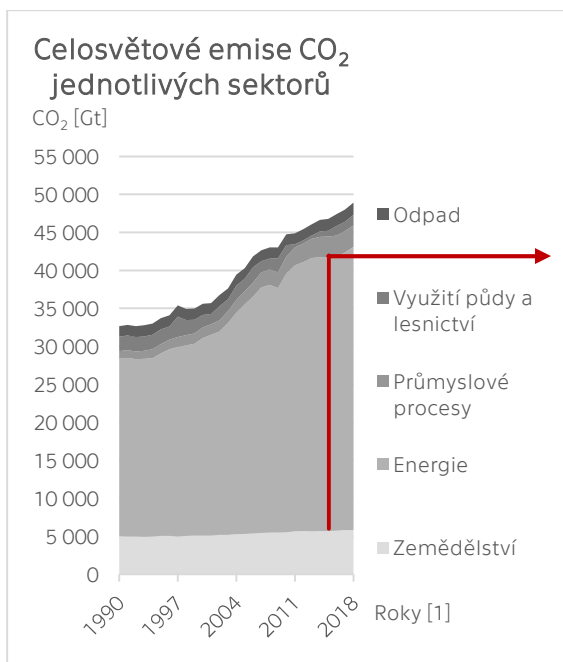
Emise CO<sub>2</sub> pro jednotlivé sektory lidské činnosti jsou znázorněny na obrázku č. 2. Největší podíl na výrobě CO<sub>2</sub> má sektor výroby energie následovaný zemědělstvím a emisemi spojenými s odpady (např. skládka opadu). Samotný sektor výroby energie je podrobněji rozdělen do dalších sub sektorů na obrázku č. 3.

Výroba elektřiny/tepla tvoří pouze část tohoto sektoru, přibližně 32% z celkových emisí (obr. 3) k roku 2018. Procentuálně se ale jedná o největší množství, proto je celosvětovou prioritou snaha o snížení emisí právě ve výrobě elektřiny/tepla. Z hlediska celkového snížení tvorby emisí je ale potřeba se zaměřit i na ostatní sektory.

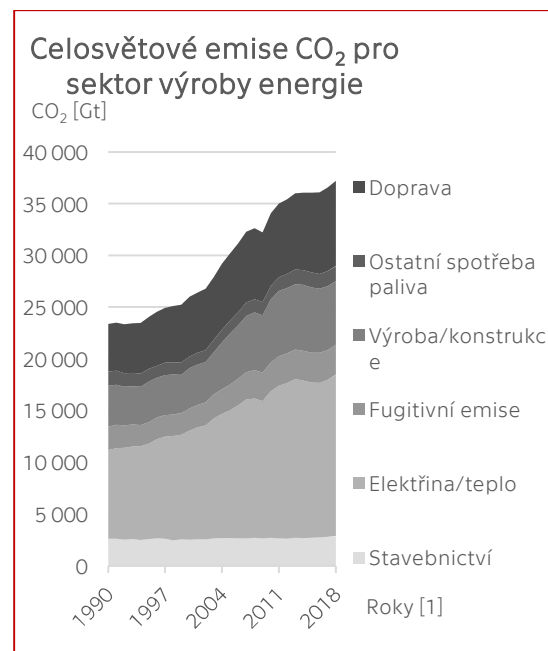
Snížení emisí průřezem všech sektorů je komplexním problémem žádajícím si celosvětovou snahu a zavádění potřebných opatření.

Výroba elektřiny a tepla může být zajištěna pomocí zařízení využívajících neobnovitelných či obnovitelných zdrojů energie. [4]

Za neobnovitelné zdroje (dále NZ) se považují fosilní paliva např. uhlí, nafta, zemní plyn, jejichž hlavní složkou je uhlík (C). Při spalování těchto paliv se do ovzduší dostává primárně oxid uhličitý a např. v případě uhlí a nafty další škodlivé složky a prachové částice. Za NZ považujeme také nukleární energii, jelikož nepoužívanější prvek, uran 235, je také neobnovitelným zdrojem. Do NZ je možné zahrnout i energii biomasy v případě, že suroviny pro biomasu nejsou znovu obnoveny. [5]



Obrázek 2: Souhrn emisí CO<sub>2</sub> jednotlivých sektorů mezi roky 1990-2018 [6]



Obrázek 3: CO<sub>2</sub> emise pro sektor energie (z obrázku č.2) rozdělený do dalších sub sektorů mezi roky 1990-2018 [6]

Za obnovitelné zdroje (dále OZ) je považována solární energie, větrná energie, vodní energie, geotermální energie a energie biomasy. [7]

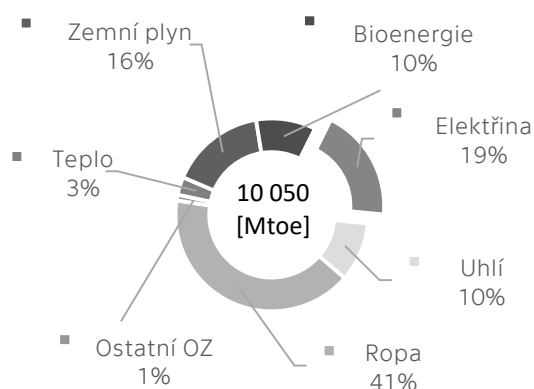
V budoucích plánech na snížení emisí a potlačení globálního oteplování hrají obnovitelné zdroje energie důležitou roli. Předpokládanými zdroji, které zajistí masivní doplnění neobnovitelných zdrojů je fotovoltaika-využívající solární energii a větrná energetika-využívající větrné energie v atmosféře.

## 1.1. Spotřeba energie

V předešlé kapitole bylo zmíněno, že výroba elektřiny odpovídá za tvorbu velkého množství skleníkových plynů, zároveň je ale pouze částí celku výroby energie. Celková spotřeba energie je vidět na obrázku č. 4 (toe=jednotka ropného ekvivalentu, toe je jednotkou energie uvolněné při spálení jedné tuny ropy, 1toe= 11,63 MWh). Z přehledu celkové spotřebované energie je vidět, že výroba elektřiny tvoří pouhých 19%, proto je důležité se zaměřit i na ostatní oblasti spotřebovávající energii.

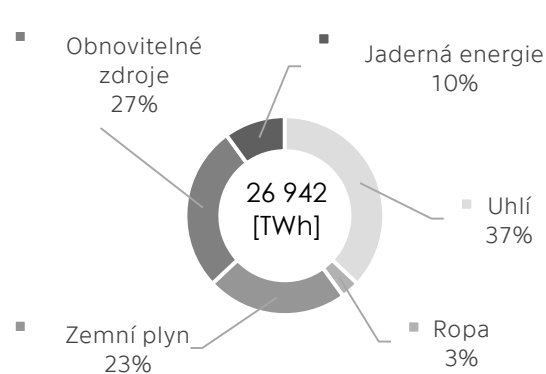
Jednotlivé procentuální podíly zdrojů elektřiny jsou na obrázku č. 5. Na základě těchto dat je možné získat přehled o distribuci zdrojů/paliv v sektoru výroby elektřiny.

Celková spotřeba energie, 2019



Obrázek 4: Celková celosvětová spotřeba energie v roce 2019 [8]

Výroba elektřiny-zdroje, 2019



Obrázek 5: Celková celosvětová výroba elektřiny v roce 2019 [8]

Snížení emisí při výrobě elektřiny může následně přispět ke snížení emisí i v ostatních oblastech. Těmito oblastmi jsou například doprava, zemědělství, průmysl, výroba tepla a další. V případě dopravy a zemědělství využívající velké množství ropy (nafty) je možné elektrifikací či nahrazením fosilních paliv vodíkem částečně snížit emise CO<sub>2</sub>. Za předpokladu, že elektrická energie či zdroje potřebné k výrobě vodíku mají co nejmenší uhlíkovou stopu (jsou vyráběny například obnovitelnými zdroji energie nebo jadernou energií).

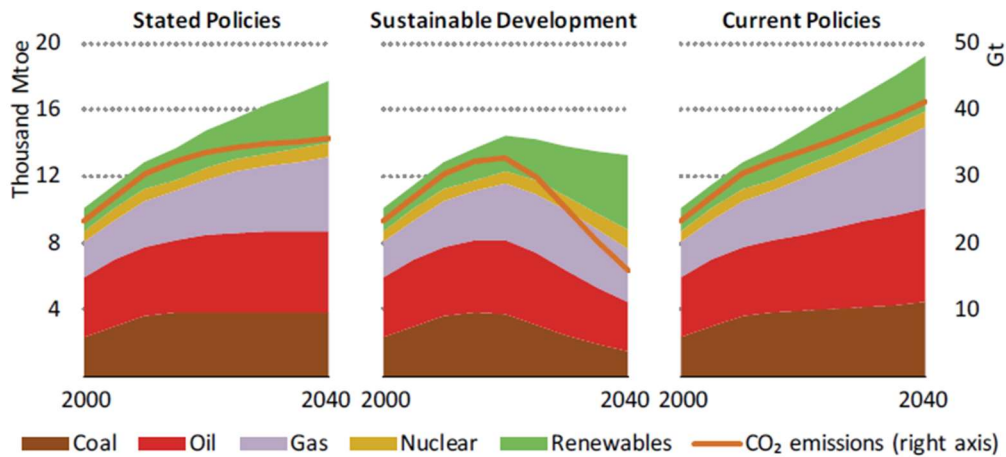
Další velký podíl na tvorbě skleníkových plynů má například výroba tepla, kterou z velké části zajišťují zdroje v podobě uhlí nebo zemního plynu. Elektrifikace tohoto sektoru může taktéž částečně snížit emise.

Se zaváděním elektrifikace jednotlivých sektorů ale souvisí následné zvýšení odběru elektrické energie a s tím související nároky na zvýšení kapacity výstavby obnovitelných zdrojů energie nebo zdrojů s nízkou uhlíkovou stopou.

Dalším faktorem hrajícím v neprospěch snížení uhlíkové stopy je například nárůst počtu obyvatel, expandující ekonomika a průmysl v rozvojových státech.

Následkem těchto jevů je neustálý nárůst spotřeby energie. Důsledek navyšování spotřeby energie je vidět na teoretické predikci vytvořené agenturou IEA na obrázku č. 6. Vlevo jsou následky stanovených opatření proti zvyšování tvorby skleníkových

plynů, vpravo následky momentální situace a uprostřed je znázorněný udržitelný průběh poklesu tvorby skleníkových plynů. Z predikce je možné vidět, že v případě probíhajících a stanovených opatření se ani v jednom případě nedostává křivka CO<sub>2</sub> emisí mezi lety 2020 až 2040 na své maximum (nulová derivace), které je viditelné na predikci udržitelného vývoje uprostřed.



Obrázek 6: Celosvětová poptávka po energii podle zdroje (levá osa) a s ní související emise (pravá osa) podle daného scénáře. Zleva: Dohodnutá opatření, udržitelné vývoje a momentální opatření [9]

Právě zmíněné narůstající požadavky na spotřebu energie neustále oddalují toto maximum a vyžadují radikálnější kroky v oblasti snižování uhlíkové stopy oproti momentálně stanoveným/probíhajícím opatřením. Z predikcí založených na modelech od agentury IEA je vidět, že stanovená či probíhajícím opatření nesplňují 2. ani 3. bod Pařížské dohody. [9],[10] Na základě těchto informací je možné usoudit důležitost obnovitelných a dalších zdrojů energie s nízkou uhlíkovou stopou v celosvětové snaze o snížení uhlíkové stopy a pokrytí vzrůstajících nároků na spotřebu energie.

Cílem tohoto úvodu bylo poukázat na existující problematiku týkající se následků spojených s lidskou činností a možnými prostředky týkajícími se oboru energetiky, které mohou alespoň částečně přispět v řešení tohoto problému.

Větrná energetika jakožto obnovitelný zdroj energie by měla hlavně v budoucnosti zaujmout jednu z hlavních pozic na trhu s obnovitelnými zdroji a pomoci v jejich rozmachu.

Větrná energetika, přesněji problematika týkající se větrných turbín, je zároveň hlavním tématem této bakalářské práce.

## 2. Úvod do problematiky větrné energetiky

---

Větrná energetika je částí energetiky zabývající se získáváním energie větru a převodem této energie na mechanickou práci, která je následně obvykle využita k výrobě elektrické energie. Tyto přeměny energie jsou zprostředkovávány za pomoci větrných turbín (dále VT, další používané výrazy: větrné elektrárny, větrné generátory, větrné motory).

Pro upřesnění pojmu energie větru je nejprve vhodné zmínit co je to energie a jaké existují druhy energie. Energie je kvantitativní fyzikální veličina, která musí být transformována do tělesa (systému) pro konání práce nebo například pro zvýšení termodynamické teploty tělesa (systému). Důležitým zákonem je zákon zachování energie (První termodynamický zákon), který říká, že energie nevzniká ani nezaniká, ale pouze mění svoji podobu (mění se na jiný druh energie např. přeměna energie kinetické na energii tepelnou při brždění). [11]

Základní formy energie:

- energie mechanická (makroskopická forma energie): suma potenciální a kinetické energie
- energie tepelná (mikroskopická forma energie): suma kinetické energie mikroskopického pohybu částic
- energie elektrická
- energie magnetická
- energie chemická
- energie radiace
- energie gravitace
- energie nukleární

S ohledem na problematiku větrné energetiky je nejdůležitější formou kinetická energie větru. Nejdůležitějšími faktory determinujícími kinetickou energii je rychlost a hmotnost zkoumaného objektu (systému). Kinetickou energii definuje vztah:

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

Další otázkou je jaké mechanismy způsobují přítomnost větrné energie v naší atmosféře. Ve zkratce je pohyb částic vzduchu (vítr) způsoben třemi podmínkami:

- Ohřevem zemské atmosféry radiační energií Slunce
- Rotací Země
- Nepravidelností zemského povrchu

Právě nerovnoměrný ohřev způsobuje vznik tlakových gradientů v atmosféře.

*Pro lepší představu je možné využít například rovnice ideálního plynu  $p \cdot v = r \cdot T$  -> nárůst teploty vyvolá nárůst tlaku, neuvažujeme stlačitelnost vzduchu-změnu objemu/hustoty.*

Tlakové gradienty způsobují pohyb vzduchových částic. Tento pohyb je možné vnímat v podobě větru.

*Důležitý následek Prvního termodynamického zákona:*

Vzduch pod vyšším tlakem se pohybuje směrem k oblasti s tlakem nižším a ne naopak. Čím vyšší je tlaková diference tím vyšší je rychlost vzduchových částic-větru.



## 2.1. Odvození vztahu pro výkon větrné turbíny

Výkon je dán změnou energie v čase, v tomto případě kinetické energie. Časovou derivací rovnice č. 1 je možné získat časovou změnu diferenciální objemu  $dm = \rho \cdot A \cdot dx$ , hustota  $\rho$  a plocha  $A$  je předpokládána konstantní (tudíž má nulové derivace a nevyskytuje se dále ve členu). Časová změna souřadnice  $x$  v čase je rovna rychlosti  $v_x \equiv v$  (předpokládá se jednorozměrné proudění).

$$P_{teor} = \frac{d(E_k)}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(m)}{dt} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot dx}{dt} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2)$$

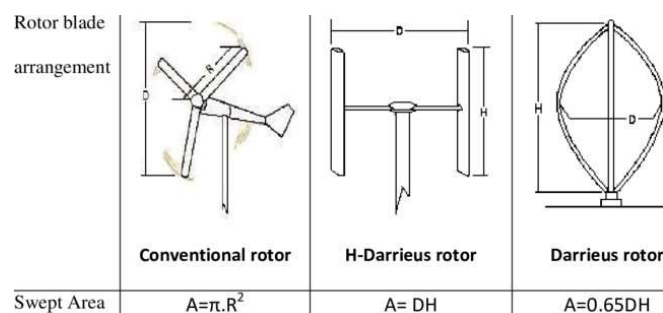
$$P_{teor} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 [W] \quad (3)$$

Tento vztah je základním vztahem pro určení výkonu na základě znalosti rychlosti větru, hustoty vzduchu a plochy, kterou vytíná větrná turbína. Jelikož je výkon určený třemi nezávislými proměnnými jsou hodnoty těchto proměnných důležitými faktory.

Větší rychlost větru dovoluje získání většího množství mechanického výkonu, získaný výkon je závislý na třetí mocnině rychlosti větru, proto má rychlost větru zásadní vliv na výrobu elektrické energie. Větrné turbíny vyrábějí elektřinu obvykle při rychlostech větru v intervalu 4-25 m/s (14,4-90 km/h).

Hustota je závislá na nadmořské výšce, atmosférickém tlaku, teplotě a dalších parametrech (v základních výpočtech je obvykle postačující pracovat pouze s nadmořskou výškou. Hustota vzduchu klesá s rostoucí nadmořskou výškou tudíž je výhodnější umístování elektráren do nižších nadmořských výšek.

Plocha  $A$  je závislá na druhu VT, vztahy pro určení plochy jsou na obrázku č. 7 (druhy jednotlivých turbín jsou podrobněji popsány v následujících částech práce).



Obrázek 7: Plocha  $A$  v závislosti na typu větrné turbíny [12]

Vztah pro výpočet teoretického výkonu se používá v kontextu s účinností a výkonem VT ve tvaru:

$$P_{VT} = P_{teor} \cdot \eta_{VT} \quad (4)$$

Celkový výkon VT zároveň záleží na aerodynamické účinnosti (aerodynamická účinnost převodu energie vzduchu na mechanickou práci, značeno  $\eta_{AER}$ ), mechanické účinnosti systému (účinnosti mechanických komponent VT- ložiska, převodovka atd., značeno-  $\eta_{MECH}$ ) a na účinnosti elektrických zařízení turbíny (generátor, rozvody, měnič atd., značeno-  $\eta_{EL}$ ).

$$\eta_{VT} = \eta_{AER} \cdot \eta_{MECH} \cdot \eta_{EL} \quad (5)$$

Symbolika aerodynamické účinnosti  $\eta_{AER}$  je ve větrné energetice formálně nahrazována symbolem- $C_p$  tzv. výkonovým koeficientem (tento koeficient se tedy odkazuje na aerodynamickou účinnost nikoli na celkovou). Výkonový koeficient se často uvádí v kontextu s teoreticky odvozenou maximální hodnotou účinnosti tzv. Betzovým koeficientem.  $C_{p_{BETZ}} = 16/27 \sim 59\%$ .

## 2.2. Možnosti instalace větrných turbín

Znalost výkonu VT je možné nadále použít pro výběr lokality ve které bude VT instalována. Výrobci VT obvykle uvádějí tzv. výkonové křivky. Jedná se o funkční hodnoty výkonu v závislosti na rychlosti větru. Tyto křivky je možné následně aproximovat například polynomickými funkcemi a na základě statistických analýz rychlostních profilů či za pomoci numerických modelů proudění vzduchu pro vybrané lokality odhadnout získané výkony.

Tyto hodnoty jsou potřebné z hlediska návratnosti projektu, tedy z pohledu ekonomické stránky výstavby VT.

Důležitými veličinami používanými při volbě lokality instalace VT jsou kapacitní faktor a hustota výkonu.

**Kapacitní faktor (KF)**, tato veličina je podílem aktuálního výkonu vůči výkonu nominálnímu (maximálnímu). Ve zmíněném tvaru se jedná o kapacitní faktor pro daný okamžik, z praktického hlediska je výhodnější integrovat přes potřebný časový interval (např. 1 rok, měsíc atd.), jedná se tedy o podíl získané energie vůči jmenovitému množství energie, které by mělo energetické zařízení vyrobit. KF je možné vyjádřit i procentuálně.

$$KF = \frac{\int_0^t P(t) \cdot dt}{P_{\text{nominální}} \cdot t} [1; \%] \quad (6)$$

$P(t)$  je výkon získaný měřením, při vyhodnocování již vyrobeného výkonu nebo je získaný na základě předběžného výpočtu za pomoci výkonnostní křivky VT a rychlostí větru v čase v dané lokalitě (zmíněno výše).

**Hustota výkonu ( $\rho_p$ )** udává výkon větru na jeden  $m^2$  (jedná se tedy o analogický vzorec odvozený v předešlé kapitole pro  $P_{\text{teor}}$  s uvažováním  $A=1 m^2$ ). Hustotu výkonu je možno využít k výpočtu pokud je známá účinnost VT a plocha, kterou vytíná její rotor.

Pro získání maximálního výkonu a dlouhodobě co nejvyšších kapacitních faktorů je potřeba vybrat vhodnou lokalitu. VT je možné umisťovat na pevninu (anglický výraz ONSHORE, dále ONS) nebo na moře (anglický výraz OFFSHORE, dále OFFS). V energetickém průmyslu je zároveň zvykem umisťovat VT do skupin vícero kusů - do tzv. větrných farem (týká se převážně elektráren vyšších výkonů).



Obrázek 8: ONSHORE farma [13]



Obrázek 9: OFFSHORE farma [14]

ONS farmy se začaly budovat v 80. letech minulého století a staly se celosvětově relativně rozšířeným zdrojem elektrické energie. Větší množství instalací z evropského hlediska započalo po roce 2000. Výkon elektráren se nejprve pohyboval v řádech stovek kW a větrné farmy v řádech stovek MW. Postupný vývoj ve větrné energetice vedl k navyšování výkonů a zlevňování VT což následně pomohlo k výraznějšímu navyšování nainstalovaných kapacit.

Kapacitní faktor ONS VT se pohybuje v rozmezí 0,26-0,4 (26%-40%). Levá hranice intervalu je platná pro starší větrné farmy, novější projekty dosahují výrazně vyšších kapacitních faktorů (například pro farmy zprovozněné mezi roky 2014-2018 se kapacitní faktor pohybuje kolem 35%) [15]. Snaha o větší navýšení kapacitních faktorů, ale vedla k myšlence instalace větrných elektráren na moře.

OFFS výstavba poskytuje navýšení kapacitních faktorů a využití lepší stability povětrnostních podmínek na moři/u pobřeží oproti podmínkám na pevnině. Průkopníkem v této technologii bylo Dánsko (první OFFS farma byla postavena právě v Dánsku roku 1991 [16]). Větší nárůst celosvětově instalované kapacity ale nastal až po roce 2009.

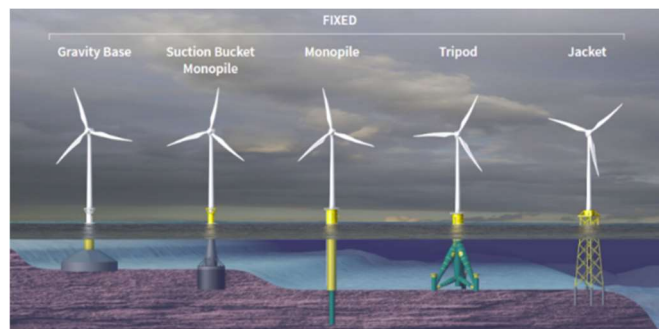
OFFS výstavba si sebou nese řadu výhod oproti ONS výstavbě. Primární výhodou jsou již avizované vyšší kapacitní faktory, které se pohybují v rozmezí 40-50% [17]. Dále je možnost instalace VT výrazně větších rozměrů a s tím pojících se vyšších výkonů. Nejnovější OFFS turbíny dosahují výkonů mezi 8-12 MW oproti běžně používaným 2 a 3 MW ONS třídám (podrobnější přehled informací týkajících se přímo VT je v následujících kapitolách). Vyšší výkony a vyšší KF staví OFFS instalaci do lepší pozice v porovnání s ONS instalací a zároveň i vůči konvenčním způsobům výroby elektrické energie například pomocí uhelných a plynových elektráren.

Další navýšení KF pro OFFS je možné za pomoci využití plovoucích VT, které operují ve výrazně větších vzdálenostech od pobřeží. Prozatím jsou plovoucí VT ve fázi vývoje a pilotních projektů. Například testovací plovoucí větrná farma Hywind Scotland se s hodnotami KF průměrně pohybuje okolo 55% s rekordním průměrem 57% v roce 2020. [18]

ONS/OFFS energetika má zároveň na poli obnovitelných zdrojů rivala v podobě fotovoltaiky. Průměrný KF pro celosvětovou produkci pomocí fotovoltaických panelů se pohybuje mezi 15-18% [19], v tomto ohledu větrná energetika zajišťuje výrazně lepší pozici z pohledu stability dodávaného výkonu průřezem celého roku. Větrná energetika se, ale zároveň dobře doplňuje s fotovoltaikou průběhem celého roku díky tomu, že KF pro větrnou energetiku jsou vyšší během zimních měsíců a jara a nižší během letních měsíců, KF pro fotovoltaiku jsou naopak vyšší během letních měsíců a nižší během zimních měsíců. Společně tedy mohou oba zdroje být nadějnou kombinací v energetickém mixu založeném na obnovitelných zdrojích energie.

Další podstatnou částí instalace větrných elektráren je ekonomická, administrativní a logistická část projektu. Z pohledu ekonomického hlediska výstavby a administrativních činností je instalace větrných farem složitým procesem trvajícím mnohdy několik let. Administrativa zároveň často snižuje rychlost instalace a přechod na obnovitelné zdroje energie. Logisticky je větrná energetika doménou těžkého transportního průmyslu z pohledu ONS i OFFS zástavby, vyžadující podrobné analýzy a propracovanou metodiku týkající se organizace a plánování.

Co se týče technického pohledu na samotnou instalaci je důležitou částí ukotvení VT . ONS VT se umísťují do betonových struktur pod zemí, které zajišťují stabilitu celého objektu. OFFS turbíny je možné připevnit přímo ke dnu oceánu nebo využít plovoucích základů. Základní přehled OFFS základů je na obrázcích č. 10, 11.



Obrázek 10: OFFS turbíny s různými typy pevných základů [20]



Obrázek 11: Plovoucí OFFS turbíny s různými druhy plovoucích základů [21]

Výhodou plovoucích VT je zjednodušení přípravy základů oproti pevným základům a zároveň možnost montáže elektrárny na základny přímo v přístavech. Plovoucí základna s elektrárnou je následně odtažena loděmi na místo instalace a připevněna k zjednodušeným základům na dně.

Další důležitou částí procesu instalace je připojení k elektrické síti. ONS elektrárny jsou obvykle připojeny na transformátor přímo v dané farmě, transformátor následně předává elektřinu do sítě. V případě OFFS farem jsou výstupy elektrárny svedeny do substancí (žlutý objekt na obrázku č. 9). Substanice je následně spojena jedním vysokonapěťovým kabelem s transformátorem na pevnině.

Zavádění větrných elektráren do sítě je problematickým procesem díky závislosti na povětrnostních podmínkách (například oproti uhelným a plynovým elektrárnám). Větrné elektrárny vnášejí do sítě skoky v napětí (mohou síť přetěžovat i dodávat nedostatečné množství energie).

Zároveň instalace VT převádí centralizovanou energetiku na decentralizovanou energetiku (energie je vyráběna na vícero místech nikoli pouze z několika zdrojů – například jaderných/uhelných elektráren).

Elektrická rozvodová soustava, proto musí být dostatečně přizpůsobena těmto účelům. Tato problematika se, ale týká spíše elektrotechnické části větrné energetiky a implementace do sítě. Proto je zde uvedena spíše z hlediska celistvého pohledu na instalaci a není dále rozvíjena.

## 2.3. Shrnutí výhod a nevýhod větrné energetiky

---

Větrná energetika si sebou nese své výhody i nevýhody podobně jako většina obnovitelných zdrojů energie. Základní souhrn je v následujícím seznamu. [22]

### Výhody:

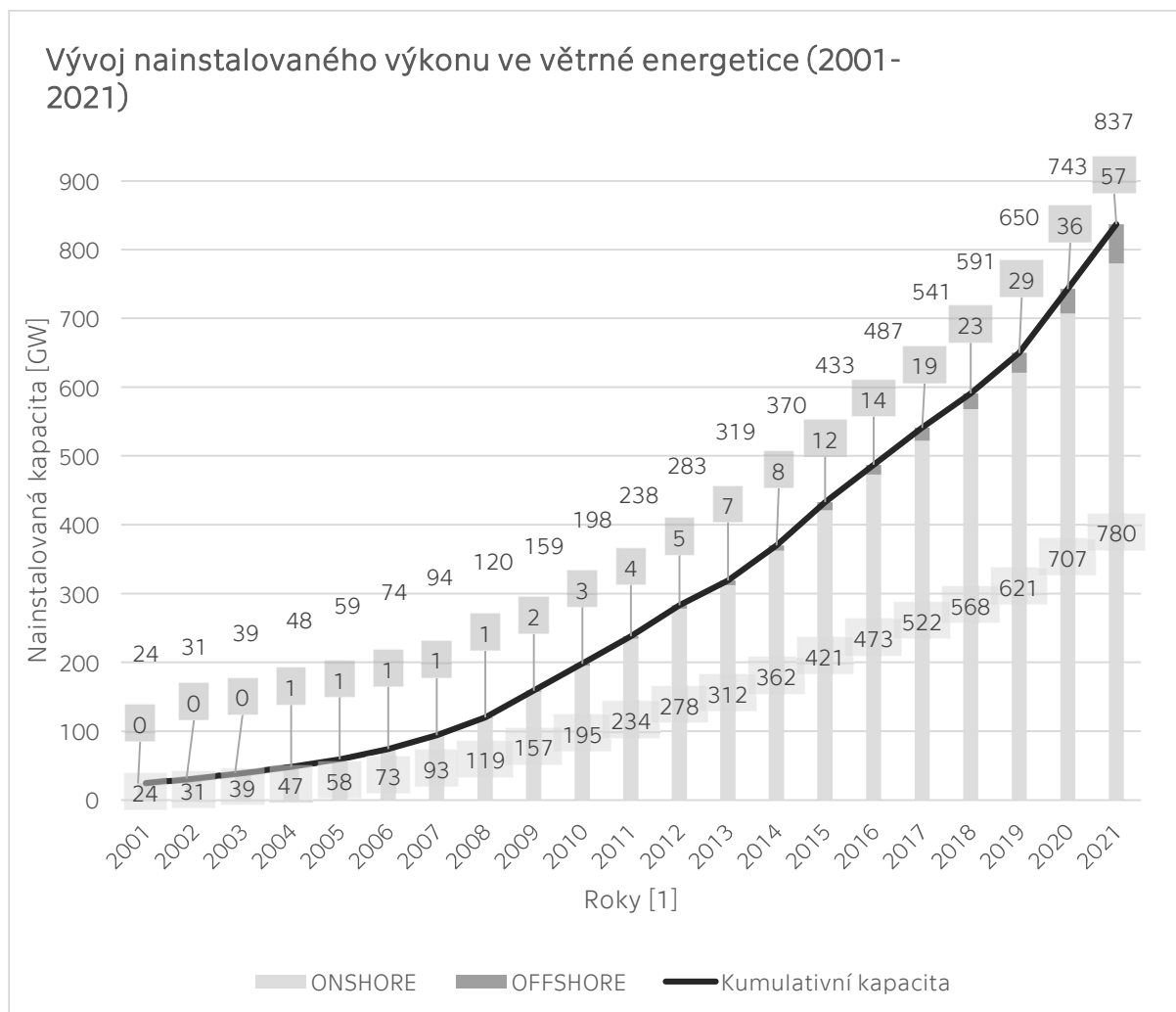
- čistý zdroj energie neprodukuje skleníkové plyny a neemituje škodlivé prachové částice při procesu výroby energie (kromě výroby a transportu na místo výstavby a montáži VT-splatnost uhlíkové stopy větrné elektrárny se pohybuje v rozmezí 6-12 měsíců (v krajních případech může být splatnost nižší ale i vyšší v řádech 1,5 až 2-násobku zmíněných hodnot)) [26]
- udržitelný zdroj závislý na sluneční energii
- široké možnosti umístění na místech bez dalšího využití (např. návětrné oblasti v kopcovitých oblastech, farmy, oblasti kolem dálnic nebo hlavních cest atd.)
- nezávislost na cizích zdrojích (např. na dodávkách zemního plynu) a změnách cen těchto zdrojů
- redukce destruktivní těžby uhlí, případně zemního plynu
- relativně krátké časy instalace (řádově 2-5 let), například oproti výstavbě jaderných elektráren

### Nevýhody:

- nezaručená stabilita povětrnostních podmínek (může docházet k přerušení dodávky energie z důvodu nedostatečné rychlosti větru-tento problém částečně řeší OFFS výstavba větrných farem nebo ukládání elektrické energie)
- místa vhodná pro instalaci VT se mnohdy nacházejí daleko od infrastruktury a prodražují připojení do sítě
- hlukové znečištění osídlených oblastí a okolního prostředí
- vzhled VT a narušení vzhledu okolní přírody
- nebezpečí pro divokou zvěř, zvýšená úmrtnost ptáků a netopýrů v okolí VT z důvodu kolizí s lopatkami elektráren [27]
- možnost vyvolání epileptických záchvatů z důvodu pohybu listů skrz sluneční záření a vyvolávání mihání stínů
- dlouhé intervaly pro získání stavebního povolení, tento problém výrazně ztěžuje urychlení instalace potřebné k dodržení stanovených cílů snižování uhlíkové stopy [28]

## 2.4. Základní statistika týkající se větrné energetiky

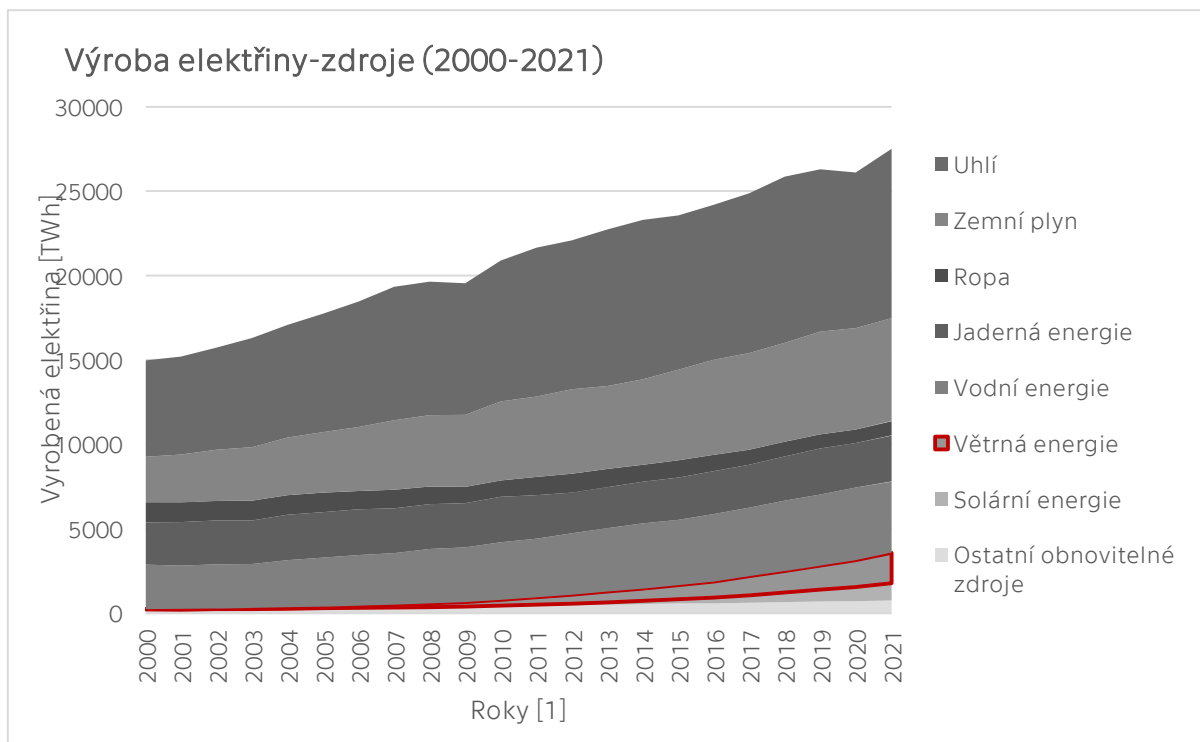
Kumulativní instalace ve větrné energetice vykazuje rostoucí trend v rozšiřování kapacity jak v případě ONS tak i OFFS větrné energetiky. Na obrázku č. 12 je dobře vidět počátek výraznějšího rozvoje OFFS energetiky přibližně od roku 2009.



Obrázek 12: Nainstalovaný výkon ve větrné energetice [10]

OFFS technologie by měla v budoucnosti hrát výraznější roli v porovnání s ONS energetikou po přechodu plovoucí konfigurace z pilotních projektů na projekty konvenční s vyšší nainstalovanou kapacitou.

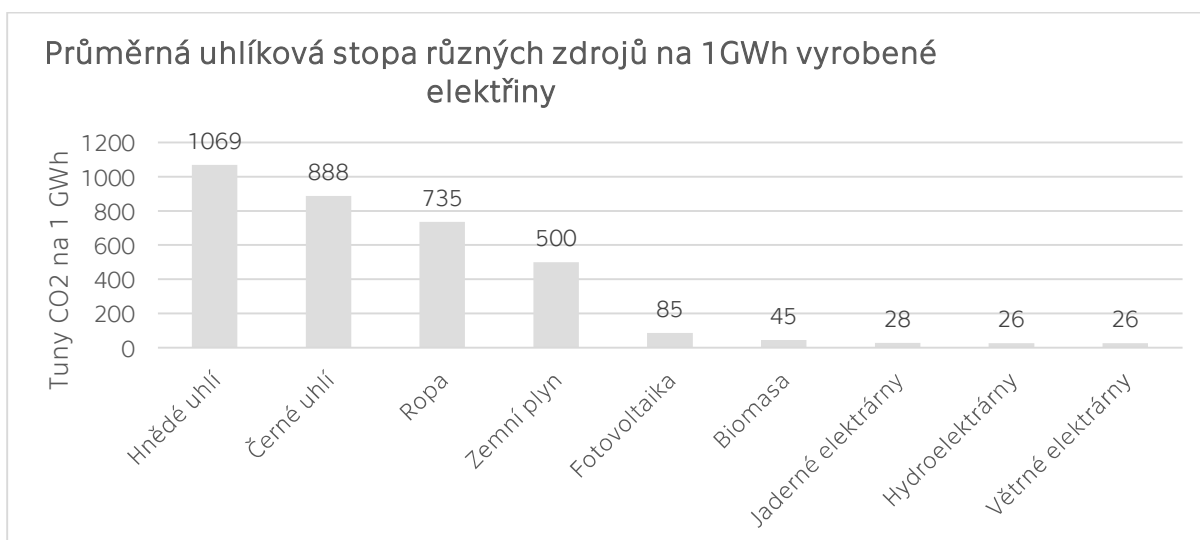
Rostoucí trend zároveň umožňuje zlevňování VT a optimalizaci procesů týkajících se výroby a jejich instalace. Větrnou energetiku to díky tomu staví do lepší pozice na trhu s energií i v porovnání s ostatními, například neobnovitelnými, zdroji (i pro rozvojové státy). To znamená, že v rozvojových státech nemusí nutně docházet k rozšiřování kapacity za pomoci neobnovitelných zdrojů technologie a až následně postupně docházet přechodu na obnovitelné zdroje energie, ale je přímo možné rozšíření kapacity výroby energie za pomoci obnovitelných zdrojů (související s rostoucími nároky a zvyšující se úrovní obyvatelstva).



Obrázek 13: Celosvětová výroba elektřiny [23]

Na obrázku č. 13 je vidět podíl větrné energetiky (označeno červeně) na výrobě elektřiny. V porovnání s ostatními zdroji hraje minoritní roli, ale postupně se přibližuje ke zdrojům jako je vodní energie a jaderná energie. Zároveň ale zaujímá lepší pozici vůči zdrojům využívajícím solární energii.

Porovnání vyrobených tun CO<sub>2</sub> pro jednotlivé zdroje elektřiny je níže. VT mají jednu z nejnižších uhlíkových stop. Uhlíková stopa je zároveň výrazně nižší v porovnání s fotovoltaikou.



Obrázek 14: Porovnání uhlíkové stopy na 1GWh vyrobené energie pro různé zdroje energie [24]



## 2.5. Budoucnost větrné energetiky: „POWER TO X“?

---

Jedním z problémů větrné energetiky je její závislost na povětrnostních podmínkách a s tím související problémy s nezaručenou stabilitou dodávky elektřiny do sítě, zdůrazněno výše. Tento problém je možné řešit ukládáním vyrobené energie při dobrých povětrnostních podmínkách a využitím uložené energie při podmínkách méně příznivých.

Existuje několik forem uložení přebytečné energie, například přečerpávací elektrárny (PHS-pumped hydro storage). PHS fungují na principu využití přebytku elektrické energie v síti k pohonu čerpadel, která vytlačí vodu do nádrže ve vyšší nadmořské výšce. V době energetických špiček v průběhu dne se využije potenciální energie uložená do vodní masy vypuštěním nádrže a pohonem vodní turbíny, která vygeneruje potřebnou energii. Další možností je stlačení vzduchu do podzemních prostor (CAES-compressed air energy storage). Princip je analogický jako u přečerpávacích elektráren, přebytečná energie v síti se využije ke kompresi vzduchu a energie uložená do stlačeného vzduchu je následně využita pro pohon turbíny v době energetické špičky.

Další možností je ukládání energie do Carnotových baterií. Elektrická energie se převádí na energii tepelnou a teplo se ukládá do tepelného zásobníku. Tepelný tok je následně využit v tepelném motoru, který převede teplo zpět na elektřinu a tok je vrácen zpět do zásobníku. [25]

Zároveň ale existuje i další možnost, jak uložit elektrickou energii vyrobenou za pomoci VT k pozdějšímu využití. Tímto způsobem je výroba „zeleného“ vodíku. [22]

Existují tři způsoby výroby vodíku:

- Šedý vodík, *grey hydrogen*-výroba chemickým štěpením zemního plynu na vodík a oxid uhličitý (oxid uhličitý je vypuštěn do atmosféry)
- Modrý vodík, *blue hydrogen*-výroba chemickým štěpením zemního plynu na vodík a oxid uhličitý (oxid uhličitý je zachycen a uložen/znovu využit)
- Zelený vodík, *green hydrogen*-výroba elektrolýzou vody (elektřina pro elektrody je zajištěna obnovitelnými zdroji energie)

[26]

Větrná energetika je vhodným obnovitelným zdrojem elektrické energie pro výrobu zeleného vodíku. Výhodnou konfigurací je umístění zařízení pro výrobu vodíku na moře, kde jsou k dispozici oba potřebné zdroje a to elektřina vyrobená OFFS farmami a voda potřebná k elektrolýze. Proces výroby zeleného vodíku a jeho následné využití se nazývá: „Power to X“.

Zelený vodík může zároveň pomoci řešit problém zmíněný v 1. kapitole, a to potřebu snížení emisí nejenom při výrobě elektřiny, ale i při výrobě tepla, spalování fosilních paliv v dopravě nebo využívání dalších neobnovitelných zdrojů využívaných v chemickém průmyslu. [22]

Zelený vodík je totiž možné využít k pohonu automobilů a nákladních vozidel s palivovými články nebo k výrobě metanolu a amoniaku pro industriální procesy. Dále je možné kombinovat zelený vodík s oxidem uhličitým zachyceným z atmosféry a vyrábět uhlíkově neutrální paliva (např. pro letectví) nebo k výrobě tepla pro domácnosti v elektrických kotlích. [27]

Snižování cen obnovitelných zdrojů a budoucí zpoplatňování využívání neobnovitelných zdrojů (emission trade) může v budoucnu stavět výrobu zeleného vodíku na dobrou počáteční pozici na trhu s energií.

### 3. Typy větrných turbín

---

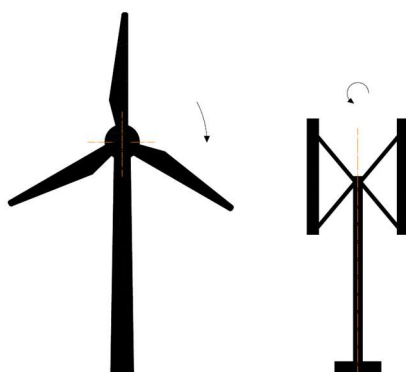
Základní přehled týkající se oboru větrné energetiky byl zmíněn v předešlých kapitolách, tato a následující kapitoly navazují na předešlé informace a rozšiřují je o technický pohled na VT. Věnují se přehledu o používaných konstrukčních řešeních VT včetně základního popisu fyzikálních principů jejich funkce a možné aplikaci v praxi.

Větrné turbíny je možné rozdělit do vícero kategorií.

Základním dělením je rozdělení podle polohy osy rotace vůči zemi. Rozlišujeme VT s horizontální osou rotace (zkratka HAWT-*horizontal axis wind turbines*) a s vertikální osou rotace (zkratka VAWT-*vertical axis wind turbines*).

*Jednotlivé druhy turbín jsou podrobněji popsány v následujících částech práce.*

Schématický rozdíl obou druhů je na obrázku č. 15.

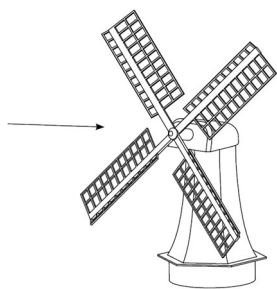


Obrázek 15: HAWT zleva, VAWT zprava

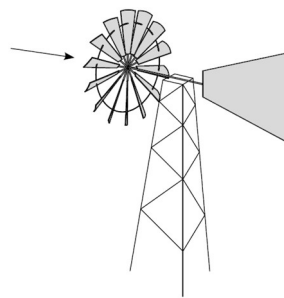
Dále je možné rozdělit VT na dvě skupiny z pohledu způsobu konverze energie větru. Skupina využívající ke konverzi energie primárně aerodynamického vztlaku se nazývá vztlakové turbíny (*lift-type wind turbines*) a VT využívající aerodynamického odporu se nazývají odporové turbíny (*drag-type wind turbines*).

*Oba způsoby dělení jsou používány v následujících částech této práce. Popis vzniku aerodynamických sil je nastíněn v následující kapitole.*

Z historického hlediska byly prvními rozšířenějšími VT větrné mlýny (obrázek č.9) a Halladayovy VT (obrázek č.10). Větrné mlýny byly využívány k různým průmyslovým aplikacím jako je mletí mouky, pohon čerpadel na vodu, zdroj mechanické energie pro papírenský a dřevní průmysl a v dalších aplikacích. Halladayovy ("americké") VT byly využívány převážně v 19/20. století v odlehlých oblastech jako čerpadla na vodu či později pro výrobu elektřiny.



Obrázek 16: Větrný mlýn [28]



Obrázek 17: Halladayova ("americká") větrná turbína [28]

*Zmíněné typy jsou v této práci uvedeny pouze pro základní přehled a nadále je věnována pozornost modernějším typům VT.*

## 4. Aerodynamika větrných turbín

---

Jak bylo zmíněno v předešlé části kapitoly větrné turbíny mohou ke své funkci využívat vztahové či odporové složky aerodynamické síly. Tato kapitola se věnuje základnímu vysvětlení fyzikální podstaty vzniku aerodynamických sil působících na tělesa, která jsou obtékána tekutinou. V kontextu větrných turbín jsou obtékanými tělesy myšleny listy/lopatky rotoru a tekutinou vzduch. Stejné principy jsou, ale aplikovatelné i pro vodní turbíny či pro aerodynamiku letadel (za předpokladu, že je uvažována tekutina jako nestlačitelná a nachází se ve spektru rychlostí, které nedosahují 0,3 násobku rychlosti zvuku).

Informace uvedené ve 4. kapitole nabývají významu při vysvětlení funkce HAWT, VAWT v 6. a 7. kapitole a hlavně při popisu možností aerodynamické optimalizace rotoru S-VAWT v kapitole 7.3, na kterou zároveň navazuje praktická část této práce, kapitola 9.

*Tato kapitola vychází z následujícího zdroje: [29]. Ve zmíněném literatuře je zároveň možné získat další informace týkající se aerodynamiky.*

### 4.1. Zavedení základních aerodynamických veličin a vztahů

---

Z pohledu aerodynamiky na těleso obtékané tekutinou s nenulovou rychlostí působí tlak  $p$  a smykové napětí  $\tau_w$ .

Tlak působící na plochu tělesa vyvolává sílu, která má směr normály na plochu tělesa.

Smykové napětí působící tečně s plochou tělesa vyvolává sílu působící na plochu tělesa ve stejném směru jako smykové napětí.

Celkový silový účinek tlaku a smykového napětí je možné popsat křivkovými integrály přes plochu  $A$  pomocí rovnic 7, 8.

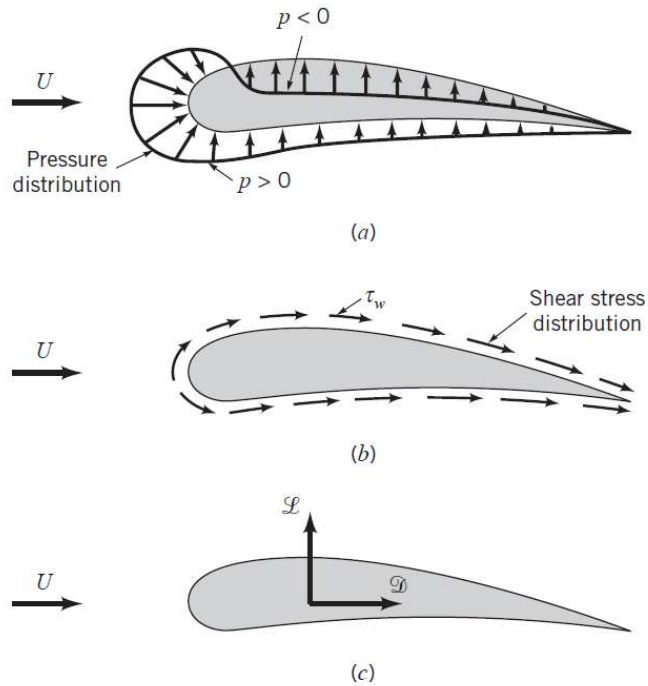
$$\vec{F}_p = \oint_A p \cdot \vec{n} \cdot dA \quad [N] \quad (7)$$

$$\vec{F}_\tau = \oint_A \vec{\tau}_w \cdot dA \quad [N] \quad (8)$$

Celková aerodynamická síla je vektorovým součtem síly  $F_p$  a  $F_\tau$ . V aerodynamice je ale zvykem rozkládat celkovou aerodynamickou sílu do složky kolmé a paralelní na směr vektoru rychlosti  $\mathbf{U}$  přichozí tekutiny (paralelní směr je obvykle kartézská souřadnice  $x$  a kolmý směr kartézská souřadnice  $y$ , předpokládá se užití pravotočivé báze)

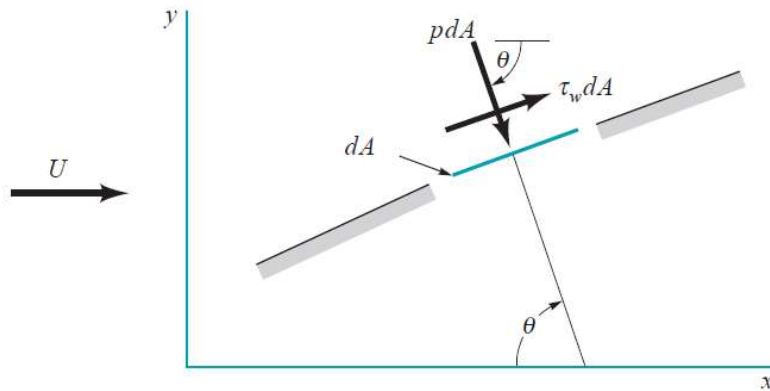
- paralelní složka aerodynamické síly je nazývána *aerodynamickým odporem*, či pouze odporem (aerodynamic drag)-tato síla je dále značena symbolem  $D$
- kolmá složka aerodynamické síly je nazývána *aerodynamickým vztlakem*, či pouze vztlakem (aerodynamic lift)-tato síla je dále značena symbolem  $L$

Znázornění působení tlaku a smykového napětí na těleso obtékané tekutinou o rychlosti  $\mathbf{U}$  je znázorněno na obrázku č. 18. (distribuce tlaku-(a), distribuce smykového napětí-(b)), silový rozklad-(c)).



Obrázek 18: Síly působící na těleso způsobené obtékáním tekutiny [29]

Pro vyjádření vztlaku  $L$  a odporu  $D$  je vhodné rozložit elementární síly  $dF_p$  a  $dF_\tau$  do směru  $x$  a  $y$  v kartézském souřadnicovém systému. Pro snazší rozklad je využít obecný úhel  $\theta$ , který je mezi normálou na plochu  $A$  a osou  $x$ . Tento rozklad je znázorněn na obrázku č. 19.



Obrázek 19: Působení tlaku a smykového napětí na elementární plochu  $dA$  [29]

$$dF_x = (pdA) \cos \theta + (\tau_w dA) \sin \theta \quad (9)$$

$$dF_y = -(pdA) \sin \theta + (\tau_w dA) \cos \theta \quad (10)$$

Pro odpor a vztlak tedy platí vztahy:

$$D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad (11)$$

$$L = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA \quad (12)$$

Z praktického hlediska výpočtu je nutné znát úhel  $\theta$  jako funkci  $x$ . Dále distribuci tlaku a smykového napětí po ploše  $A$ .

Určení distribuce tlaku a smykového napětí je obecně složitým procesem. Podrobnější popis smykového napětí a tlaku působícího na povrch tělesa je zmíněn v následujících částech kapitoly.

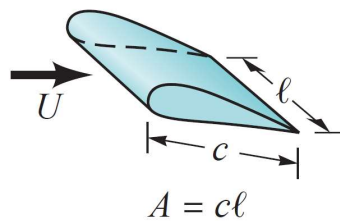
Z rovnic pro výpočet  $D$  a  $L$  je ale přímo možné vidět, že poloha plochy má vliv na celkovou velikost jednotlivých složek. Například pro úhel  $\theta=90^\circ$  je tlaková složka odporu nulová tzn. na aerodynamický odpor má při paralelní konfiguraci obtékané plochy se směrem proudění vliv pouze smykové napětí.

V aerodynamice je běžné využití bezrozměrných koeficientů jako je vztlakový koeficient  $C_L$  a odporový koeficient  $C_D$ .

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (13)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (14)$$

Tyto koeficienty jsou poměry vztlaku  $L$  či odporu  $D$  vůči dynamickému tlaku působícímu na plochu  $A$ . Plocha  $A$  je závislá na konkrétní aplikaci. Při obtékání leteckého profilu je vztah pro výpočet plochy  $A$  uveden na obrázku č. 20.



Obrázek 20: Vztah pro výpočet plochy  $A$  pro letecký profil [29]

Podrobný popis geometrie leteckého profilu je na konci této kapitoly.

## 4.2. Charakteristiky proudění tekutiny kolem těles

---

Proudění tekutiny kolem tělesa obecně závisí na vícero faktorech. Jako je tvar tělesa, velikost tělesa, rychlost proudění a vlastnostech samotné tekutiny. V mechanice tekutin je zároveň obvyklé používat bezrozměrné parametry jako je Reynoldsovo číslo, Machovo číslo, Freudeho číslo, Prandtolovo číslo a další.

Z pohledu podzvukové aerodynamiky týkající se VT má největší význam Reynoldsovo číslo ( $Re$ ).

V následujících podkapitolách jsou uvedeny základní informace týkající se  $Re$ , vlivu přítomnosti smykového napětí a tlakové distribuce na tělesa obtékaná tekutinou.

Závěry z jednotlivých částí následně vedou kucelenému popisu principu vzniku aerodynamických sil na obtékané těleso.

### 4.2.1. Reynoldsovo číslo

---

Reynoldsovo číslo je poměrem mezi setrvačnými a viskózními efekty. Tento poměr je velice důležitý při charakterizování daného proudění a má zároveň velký vliv na efekty spojené s obtékáním těles.

Vztah pro  $Re$  záleží na dané aplikaci, při obtékání těles tekutinou (například leteckého profilu) je možné využít vztah uvedený níže,  $U$  je opět rychlost proudu tekutiny a  $l$  je charakteristický rozměr.

$$Re = \frac{\text{setrvačné efekty}}{\text{viskózní efekty}} = \frac{\rho U l}{\mu} = \frac{U l}{\nu} \quad (15)$$

Nejdůležitější vlastností  $Re$  je již zmíněný poměr setrvačných a viskózních efektů, tento poměr při obtékání tělesa určuje, které efekty mají zásadní vliv.

Rozdíl v poměrech je možné poukázat na následujících příkladech:

- Na proudění kolem malé částice (např. zrnko písku) pohybující se malou rychlostí  $U$  (řádově cm/s) v tekutině s vyšší viskozitou jako je například med/olej mají výrazně vyšší vliv efekty viskozity než efekty setrvačnosti (malá rychlost, hmotnost, rozměry zrnka písku). Členy  $U, l$  jsou v rovnici pro  $Re$  malé.
- Naopak proudění kolem dopravního letadla (velké rozměry řádově desítky m) pohybujícího se vyšší rychlostí (400-800 km/h, nejsou uvažovány rychlosti blízké se rychlosti zvuku) zemskou atmosférou je více charakterizováno setrvačnými efekty. Členy  $U, l$  jsou v rovnici pro  $Re$  poměrově výrazně větší.

Hodnoty  $Re$  se zároveň používají k rozdělení charakteru proudění. Proudění rozdělujeme na laminární a turbulentní. Přibližné hodnoty rozdělující tyto dvě oblasti jsou závislé na daném problému/aplikaci.

*Mezi laminárním a turbulentním prouděním neexistuje konkrétní přechod, toto rozdělení pouze charakterizuje převládající chování tekutiny při daných podmínkách.*



## 4.2.2. Smykové napětí

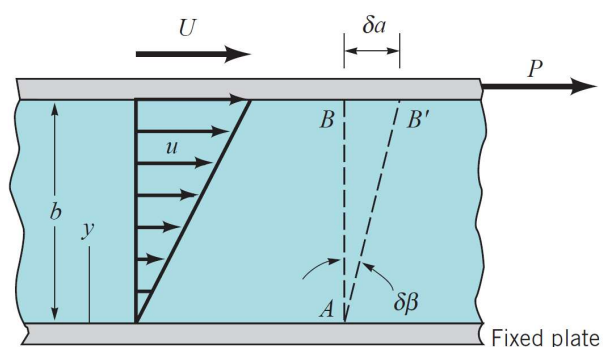
Smykové napětí mezi jednotlivými vrstvami tekutiny umožňuje přenos rychlosti (hybnosti pro elementy tekutiny o nenulové hmotnosti).

Smykové napětí je možné popsat následujícím vztahem (tzv. Newtonovým zákonem viskozity):

$$\tau_w = \mu \frac{du}{dy} \quad (16)$$

Tento vztah je možné psát i se záporným znaménkem (záleží na smyslu zvoleného souřadnicového systému-výsledném znaménku gradientu  $du/dy$ ).

Newtonův zákon viskozity je možné vysvětlit pomocí dále zmíněného příkladu desky posouvané po tekutině.



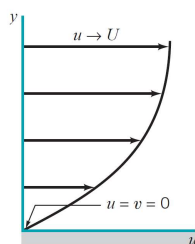
Obrázek 21: Chování tekutiny mezi dvěma deskami [29]

Smykové napětí působí na povrch pohyblivé desky, která je posouvána po tekutině silou  $P$  (vrchní deska na obrázku č. 21). Napětí, které vzniká mezi pohyblivou deskou a tekutinou je dále přenášeno na další vrstvy tekutiny nacházející se pod vrstvou těsně pod deskou a předává jim rychlost  $u$ .

Tato rychlost se postupně snižuje směrem k nepohyblivé desce (na obrázku č. 14 deska dole). Těsně u nepohyblivé desky je rychlost  $u$  nulová.

Je dobré si povšimnout, že rychlostní difference mezi tekutinou a tělesem je nulová. Vrchní deska se pohybuje rychlostí  $U$  stejně tak tekutiny se u povrchu desky pohybuje rychlostí  $U$ . Analogie platí i pro spodní desku (deska je v klidu a stejně tak se nepohybuje ani kapalina u povrchu desky).

Smykové napětí způsobené viskozitou tekutiny má tedy vliv na rychlostní distribuci a vede k přítomnosti rychlostního profilu v blízkosti povrchu tělesa. Možnou podobu rychlostního profilu znázorňuje obrázek č. 22.



Obrázek 22: Příklad možného tvaru rychlostního profilu [29]

### 4.2.3. Mezní vrstva

---

V aerodynamice je zaveden pojem mezní vrstva. Mezní vrstva je (obvykle) tenkou oblastí blízko povrchu tělesa, kde dochází ke změně rychlosti ve směru  $y$ , tzn. gradient rychlosti  $du/dy$  je nenulový. Přítomnost nenulového rychlostního gradientu vede k přítomnosti smykového napětí mezi jednotlivými vrstvami, jinak řečeno v mezní vrstvě má vliv viskozita tekutiny.

Mezní vrstva tedy končí v momentě kdy se rychlost vrstvy tekutiny pohybující se nad povrchem tělesa neliší od rychlosti vrstvy nad ní.

V cizí literatuře se používá pojem *free stream velocity* v překladu rychlost volného proudu tekutiny, v momentě kdy je při pohybu v normálovém směru od povrchu tělesa rychlost  $u$  rovna rychlosti volného proudu tekutiny je dosaženo konce mezní vrstvy (jak bylo zmíněno výše je dosaženo nulového gradientu  $du/dy$ ). Z praktického pohledu je možné konec mezní vrstvy definovat jako stav kdy je gradient  $du/dy$  zanedbatelně malý.

Důležitým následkem nulového či zanedbatelně malého rychlostního gradientu při přechodu z mezní vrstvy do volného proudu tekutiny je, že se snižuje vliv smykového napětí. Dynamická viskozita má díky násobení malou hodnotou  $du/dy$  (přibližně nulovou hodnotou  $du/dy$ ) malý vliv. To jinak řečeno znamená, že viskózní efekty mají na proudění největší vliv v oblasti mezní vrstvy. Ve volném proudu tekutiny tedy mohou být viskózní efekty zanedbatelné.

$$\tau_w = \mu \frac{d(u_{\text{konec mezní vrstvy}})}{dy} \sim \mu \cdot 0 \sim 0 \quad (17)$$

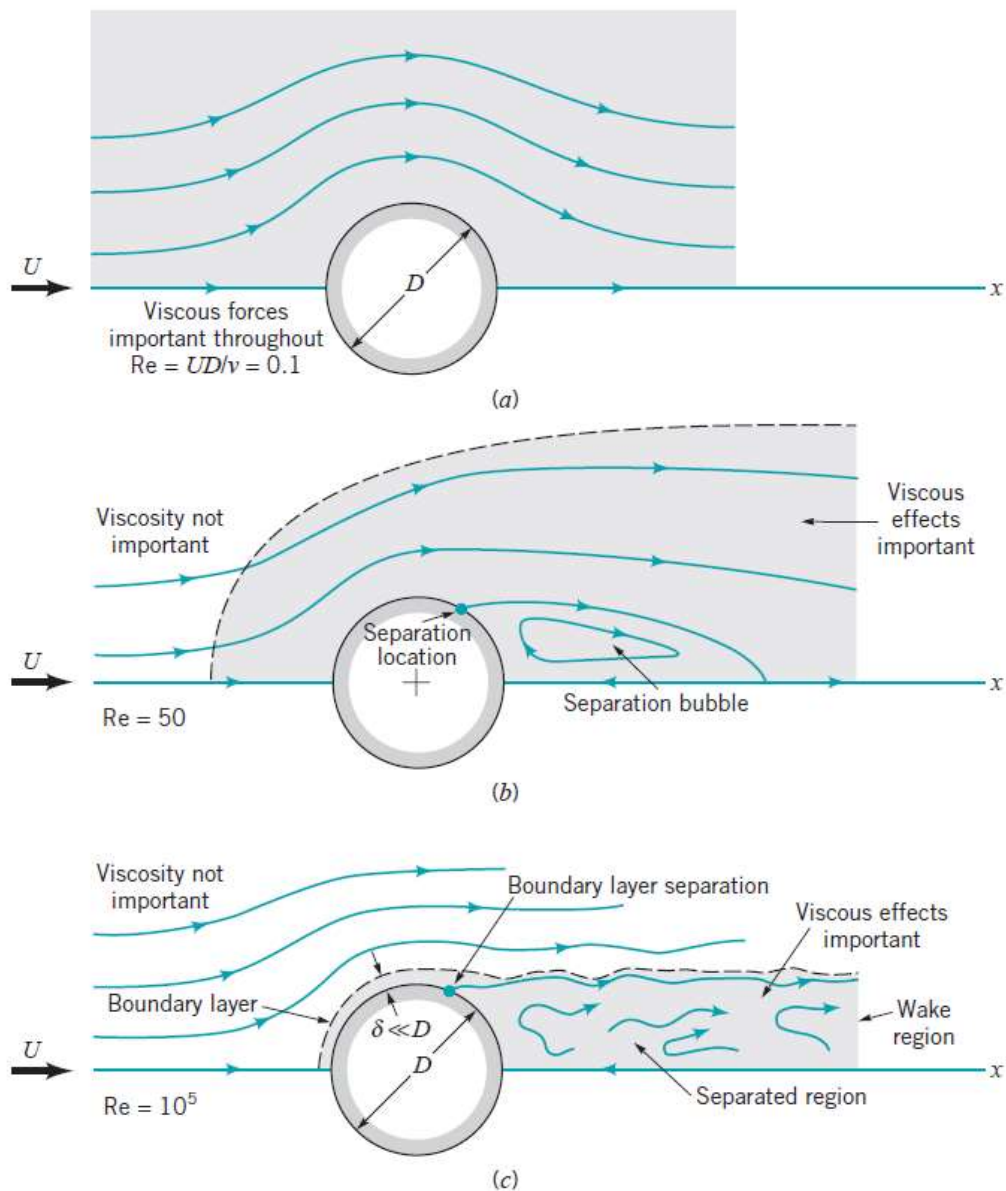
### 4.2.4. Kombinace vlivu Reynoldsova čísla a viskozity tekutiny

---

Chování proudění v závislosti na rostoucím  $Re$  je znázorněno na obrázku č. 23. Šedě označená část symbolizuje oblast, kde mají viskózní efekty vliv na chování proudění. Zároveň poukazuje na přesun vlivu viskozity do oblasti mezní vrstvy s nárůstem  $Re$ .

*Následující body podrobněji popisují obrázek č. 23.*

- Část (a) představuje situaci obtékání tělesa při nízkém  $Re$ . Šedá oblast vyplňuje celý prostor kolem obtékaného tělesa (válce/koule). To znamená, že při nízkém  $Re$  převládají viskózní efekty (příklad se zrnkem písku).
- Část (b) představuje situaci s vyšším  $Re$ . Oblast ovlivněná viskózními efekty se začíná více přibližovat k povrchu tělesa a méně ovlivňuje oblast volného proudu tekutiny.
- Část (c) představuje situaci s nejvyšším  $Re$  ze všech tří modelových situací. Je vidět, že chování kopíruje problematiku zmíněnou výše. Oblast vlivu viskozity se přesunula do tenké mezní vrstvy, zbytek volného proudu tekutiny již není viskózními efekty výrazněji ovlivňován. Viskózní efekty jsou zároveň výrazné v oblasti za bodem separace proudu tekutiny od tělesa. Podrobnější popis efektu separace je nastíněn v dalších odstavcích této kapitoly.



Obrázek 23: Vliv  $Re$  na charakter proudění při obtékání tělesa tekutinou [29]

#### Rekapitulace:

- V mezní vrstvě mají viskózní efekty vliv
- Mimo mezní vrstvu/s rostoucí vzdáleností od mezní vrstvy ztrácejí viskózní efekty na významu
- Tyto jevy jsou dále umocněny nárůstem hodnot  $Re$ .

## 4.2.5. Další efekty přítomnosti viskozity v tekutině, změna charakteru proudění v mezní vrstvě

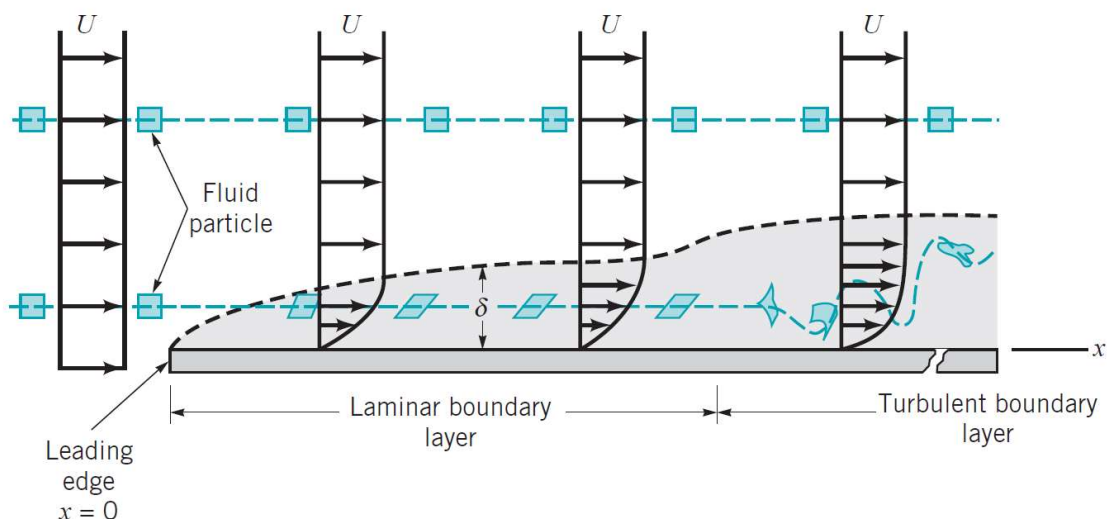
Viskózní efekty tekutiny, které zapříčiňují přítomnost smykového napětí v tekutině/mezní vrstvě tekutiny mají za následek distorzi elementu (parcely) tekutiny. Postupná distorze může vést až k rotaci jednotlivých elementů tekutiny. Právě rotace jednotlivých elementů tekutiny má za následek postupný přechod laminárního charakteru mezní vrstvy na turbulentní charakter proudění v mezní vrstvě.

Distorze/rotace elementů tekutiny způsobuje přimykání tekutiny k povrchu. Tento jev si je možné představit jako převalování jednotlivých vrstev tekutiny přes sebe a „zakusování“ se do povrchu obtékaného tělesa. Zmíněné „zakousnutí“ do povrchu symbolizuje nulovou rychlost tekutiny na povrchu tělesa.

Celá situace je nastíněna na obrázku č. 24 pro obtékání nekonečně dlouhého plátu.

Zleva: Element tekutiny nacházející se ve volném proudu tekutiny má stejnou rychlost na vrchní i spodní straně, tudíž není během pohybu ve volném proudu tekutiny nucen k distorzi. Po vstupu do mezní vrstvy (laminární) začne být díky viskózním efektům nucen k distorzi. Tento efekt se postupem elementu směrem vpravo stává výraznějším až v určitý moment začne docházet k rotaci. Tato rotace značí přestup laminární mezní vrstvy do turbulentní mezní vrstvy.

*U plátu s konečnou délkou nemusí k přechodu nutně dojít a mezní vrstva může zůstat laminární, pro nekonečně dlouhý plát, ale v určitém bodě k přechodu dojde.*



Obrázek 24: Změna charakteru mezní vrstvy při obtékání nekonečně dlouhé desky [29]

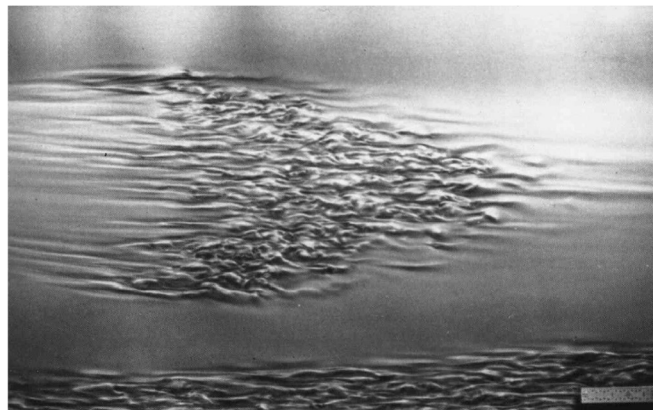
*Při proudění tekutiny kolem tělesa je vždy zprvu přítomna laminární mezní vrstva, která se postupně může transformovat na turbulentní mezní vrstvu.*



Obrázek 25: Laminární proudění kolem plátu,  $Re=10\,000$  [30]

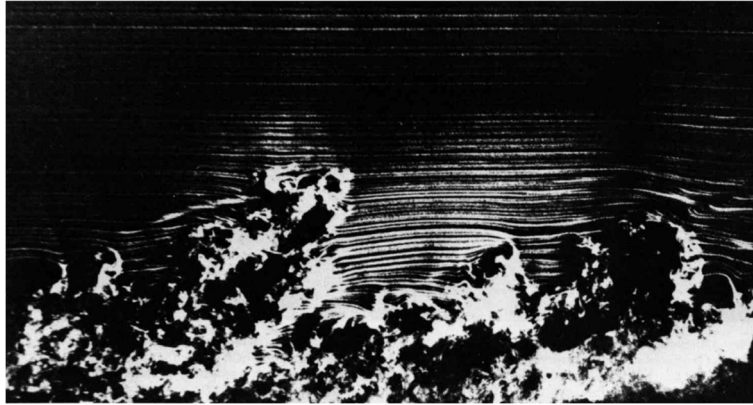
Na obrázku č. 25 je možné vidět laminární mezní vrstvu s nevýrazným přechodem do turbulentní mezní vrstvy na konci desky. Zároveň je možné vidět že laminární mezní vrstva má malou tloušťku, tudíž je oblast vlivu viskózních efektů relativně úzká. Zároveň je možné si povšimnout celkové uniformnosti laminární mezní vrstvy.

Transformace charakteru mezní vrstvy je doprovázena náhodným „odtrháváním“ malých oblastí tekutiny od povrchu a vznikem drobných turbulencí a nestabilit v toku tekutiny. Tyto náznaky turbulence mohou být utlumeny či postupně přejít do větších turbulentních oblastí. Po plném přechodu do turbulentního proudění, které je charakterizováno vznikem drobných vírových struktur v mezní vrstvě, je zároveň rozšířena tloušťka mezní vrstvy. Jev „odtrhávání“ malých vrstev je viditelný na obrázku č. 26.



Obrázek 26: Malá turbulentní oblast v laminární mezní vrstvě,  $Re=200\,000$  [30]

Plně rozvinutou turbulentní mezní vrstvu znázorňuje obrázek č. 27. Je možné si povšimnout neuniformního uspořádání jednotlivých vrstev tekutiny. Zároveň je důležité poukázat na to, že tekutina se pohybuje ve vícero směrech a nutně přímo nesleduje volný proud tekutiny. Tzn. že část proudu tekutiny se pohybuje kolmo k povrchu tělesa. Největší podíl na celkovém toku má ale směr paralelní s volným tokem tekutiny.



Obrázek 27: Turbulentní mezní vrstva,  $Re=3500$  [30]

Pohyb elementů tekutiny mezi vrstvami (v kolmém směru vůči volnému proudu tekutiny) má za následek, že elementy, které sestupují z vyšší vrstvy do nižší vrstvy mají přebytek hybnosti a naopak elementy přestupující z nižších vrstev do vyšších odebírají hybnost z vyšších vrstev tekutiny. Tento jev je viditelný v podobě promíchávání jednotlivých vrstev.

*K promíchávání jednotlivých vrstev dochází jak u laminární mezní vrstvy tak i u turbulentní mezní vrstvy. Promíchávání jednotlivých vrstev u laminární mezní vrstvy se ale děje na molekulární úrovni, zatímco u turbulentního proudění se tak děje na molekulární i makro úrovni (viditelné na fotkách z experimentů).*

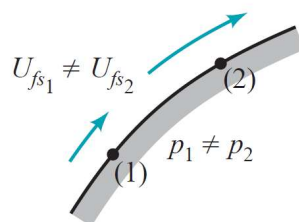
*Větší neuspořádanost proudu v turbulentní mezní vrstvě má za následek větší vliv drsnosti povrchu oproti laminární mezní vrstvě.*

#### 4.2.6. Tlakový gradient při obtékání tělesa obecného tvaru proudící tekutinou

Jak bylo zmíněno na začátku této kapitoly na plochu tělesa obtékaného tekutinou působí tlak. Jak je vidět na obrázku č. 28 a č. 18 tlak není ve směru proudnice konstantní (z obecného hlediska, pro obecnou geometrii, jsou tedy gradienty ve směru tečny na povrch tělesa nenulové).

Tlakový gradient v normálovém směru je obvykle zanedbatelně malý jak v mezní vrstvě tak ve volném proudu tekutiny.

Zároveň není rychlost tekutiny po proudnici konstantou (tzn. rychlostní gradienty jsou taktéž z obecného hlediska nenulové).



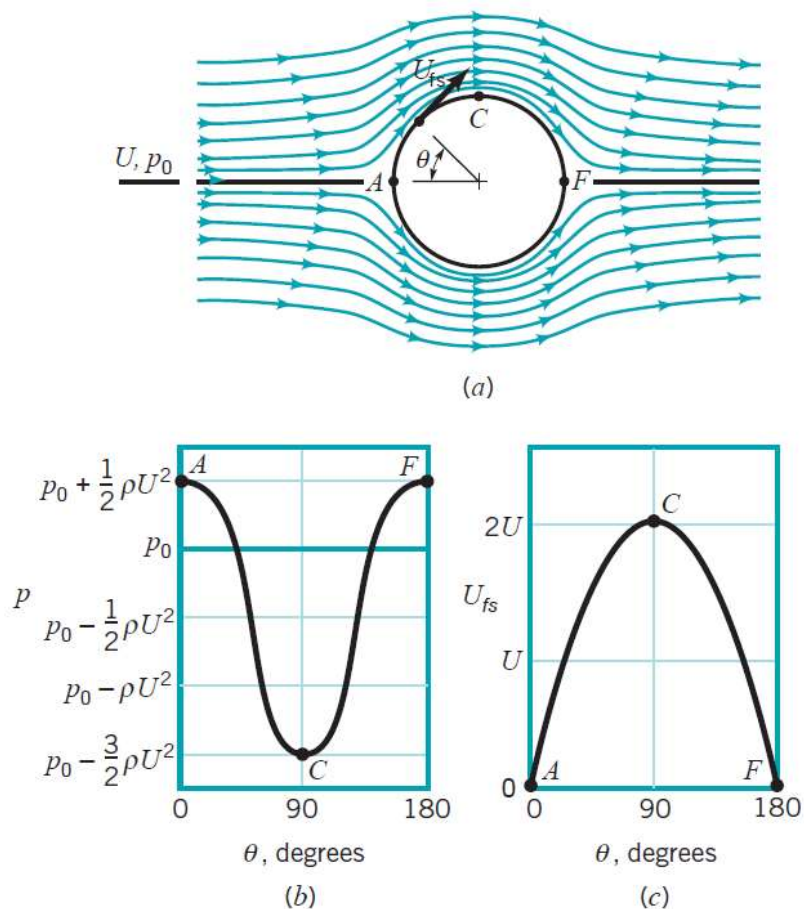
Obrázek 28: Znárodnění nekonstantního tlaku na povrchu tělesa [29]

Tlaková a rychlostní distribuce kolem válce (uvažuje se pouze 2D proudění) je znázorněna na obrázku č. 29.

Tento obrázek předpokládá nekonečnou hodnotu  $Re$ . Je tedy možné zanedbat viskózní efekty jako je přítomnost smykového napětí a distorze/rotace elementů, díky tomu je zanedbána přítomnost mezní vrstvy a nutná nulová rychlost tekutiny u povrchu tělesa.

V sekci (b) je průběh tlaku mezi bodem A a F. Z průběhu je vidět, že maximální tlak je v bodě A a F. Minimální tlak je v bodě C. Analogický průběh tlaku působí i na spodní část válce díky jeho symetrii. V sekci (c) je průběh rychlosti po proudnici mezi body A až F. Maximální rychlosti je dosaženo v bodě C.

Z těchto průběhů je vidět, že při zrychlování tekutiny při obtékání tělesa je snižován tlak a naopak.



Obrázek 29: Proudění okolo nekonečně dlouhého válce pro uvažování nekonečného  $Re$  [29]

Při znalosti tlakové nebo rychlostní distribuce je možné u jednotlivých proudnic řešit rychlostní nebo tlakové závislosti například pomocí Bernoulliho rovnice.

Jak je již známo tlak působící na plochu vyvolá silové účinky na těleso, v tomto případě jsou výsledné silové účinky na těleso díky symetrii nulové. Tento předpoklad je platný pouze pro tuto modelovou situaci bez uvažování vlivu viskózních efektů. Tato modelová situace ale i přes zanedbání viskózních efektů poskytuje základní představu o distribuci tlaku a rychlosti tekutiny při obtékání tělesa.



## 4.2.7. Chování tekutiny během obtékání tělesa při uvažování vlivu působení Reynoldsova čísla, nekonstantního tlaku, efektů viskozity a smykového napětí a přítomnosti mezní vrstvy

Při základní představě o vlivu viskozity, přítomnosti mezní vrstvy,  $Re$  a tlakové distribuci (rychlostní distribuci) je možné přistoupit ke spojení jednotlivých závěrů z předešlých podkapitol a komplexněji popsat proudění vazké tekutiny kolem tělesa.

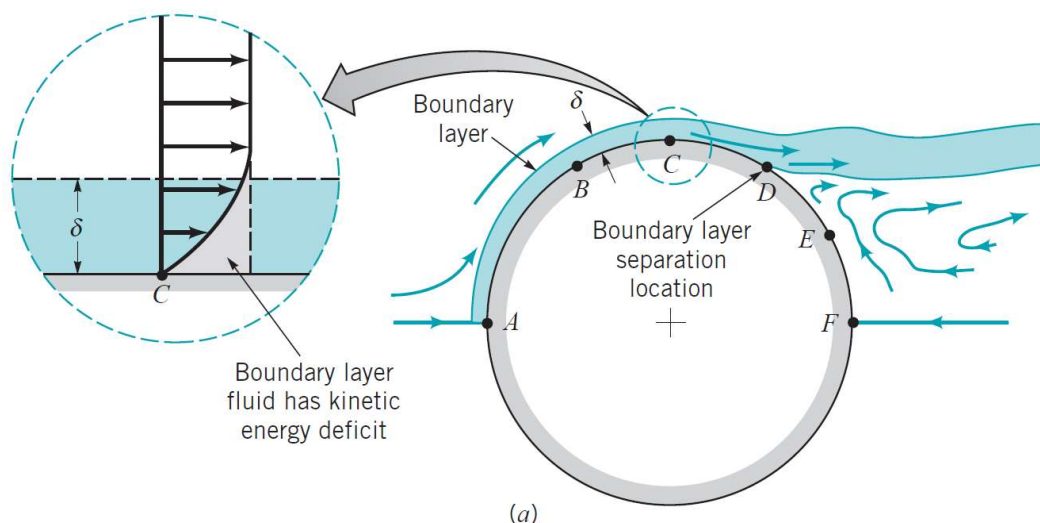
*Tato situace je nastíněna na obrázku č. 30. Obrázek předpokládá vyšší hodnoty  $Re$ , které mají za následek malou tloušťku mezní vrstvy.*

V bodě A (tzv. stagnačním bodě) dochází ke vzniku tenké laminární mezní vrstvy. Pohybem ve směru proudnic k bodu B dochází ke zrychlování proudu tekutiny a poklesu tlaku  $p$  (ve směru proudnice). Efekty viskozity mezi body A a B primárně ovlivňují pouze elementy tekutiny v mezní vrstvě. V bodě C začíná docházet ke zpětnému snižování rychlosti a nárůstu tlaku  $p$  (analogicky jako na obrázku č. 22).

Díky uvažování vlivu viskozity, ale v mezní vrstvě zároveň docházelo ke snižování rychlosti (hybnosti) elementů tekutiny. Snižování rychlosti (hybnosti) má za následek deficit ve velikosti kinetické energie, kterou mají elementy tekutiny těsně na hranici mezní vrstvy oproti elementům ve volném proudu tekutiny. Tento deficit snižuje schopnost tekutiny překonat nárůst tlaku při pohybu do bodu F (element tekutiny se dostává do „tlakového kopce“, analogické k sekci (b) na obrázku č.22).

Element tekutiny putuje mezi body C až F tak dlouho dokud neztratí veškerou energii a nedorazí do bodu D, ve kterém již nemá žádnou energii pro překonání tlakového spádu. Nulová energie znamená nulovou rychlost (hybnost), v kombinaci s nulovou rychlostí na povrchu tělesa je následně rychlostní gradient  $du/dy$  také nulový. Díky nulovému gradientu  $du/dy$  dochází ke ztrátě smykového napětí, které zajišťovalo přimykání proudu tekutiny k tělesu.

Při ztrátě smykového napětí na stěně tělesa dojde k odtržení proudu tekutiny od povrchu (odtržení mezní vrstvy od povrchu). Mezní vrstva je následně „unesena“ volným proudem tekutiny a v části za bodem D (D-F) dojde k přerušení působení tlaku na povrch tělesa.



Obrázek 30: Obtékání nekonečně dlouhého válce s odtržením [29]



Mezní vrstva se po odtržení začne zpětně zotavovat a získávat zpět hybnost od volného proudu tekutiny nad ní. Díky získání další energie vzniknou v mezní vrstvě opět nenulové gradienty  $du/dy$ , které mají za následek návrat vlivu viskózních efektů na tekutinu v mezní vrstvě. Viskózní jevy mají za následek rozmíchávání tekutiny (vznik vírů se smyslem rotace ve směru hodinových ručiček). Tyto víry jsou viditelné v regionu pod mezní vrstvou. Tento region pod odtrženou mezní vrstvou se nazývá úplav (v anglické literatuře „wake“).

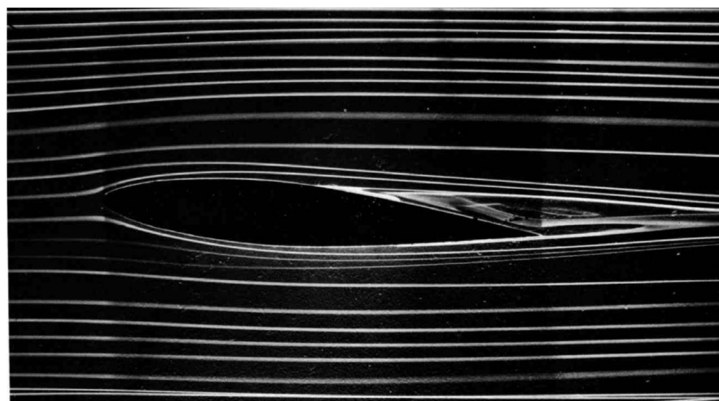
*Toto odtržení má zároveň za následek nenulový odpor tohoto válce, jelikož se tekutina nedostala až do bodu F a nemůže působit tlakem na celou pravou polovinu tělesa a vynulovat tedy aerodynamický odpor (silová výslednice v paralelním směru tedy není nulová).*

*Je tedy vidět, že těleso obtékané viskózní tekutinou nemůže mít nulový odpor jako idealizovaná modelová situace s nekonečnou velikostí  $Re$  na obrázku č.22. Tento jev se někdy nazývá D'Alambertovým paradoxem. Odpor na objekt s nulovou viskozitou je nulový, ale odpor na objekt se zanedbatelnou viskozitou (ale nenulovou) je nenulový.*

*Efekty popsané při obtékání válce na obrázku č. 30 je možné generalizovat i pro tělesa jiných tvarů.*

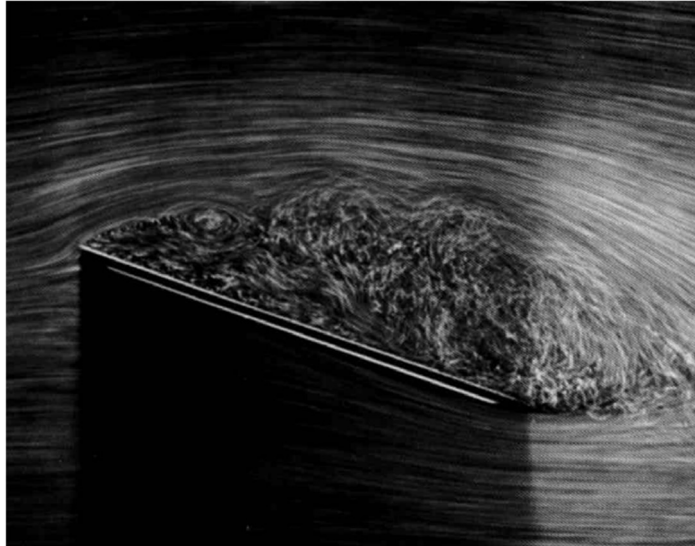
Odtržení má zároveň za následek pokles vztlaku. Pro pokles vztlaku se v cizojazyčné literatuře používá termín „stall“. Odtržení proudu tekutiny je vidět na fotce symetrickém profilu v aerodynamickém tunelu na obrázku č. 31. K tomuto efektu dochází při navyšování úhlu náběhu (při nulovém úhlu náběhu je vztlková složka pro symetrický profil nulová tedy na profil nepůsobí vztlak). *Úhel náběhu je úhel mezi volným proudem tekutiny a spojnicí počátečního a koncového bodu profilu.*

*Ztráta vztlaku může mít například fatální následky během přistávání letadla. V kontextu větrných turbín vede ztráta vztlaku ke snížení kroutícího momentu a poklesu výkonu zařízení.*



Obrázek 31: Odtržení tekutiny u povrchu leteckého profilu NACA64A015 při nenulovém úhlu náběhu [30]

Na obrázku č. 25 je vidět kompletní odtržení proudu tekutiny od rovné desky. Za deskou se zároveň vytvořil výrazný úplav.



Obrázek 32: Separace tekutiny při obtékání desky pod sklonem  $20^\circ$  vůči proudu tekutiny,  $Re=10\,000$  [30]

Důležitou vlastností jevu odtržení je jeho závislost na tom zda je mezní vrstva laminární či turbulentní. Laminární mezní vrstva si s sebou nese méně energie-méně hybnosti. Menší množství energie vede k dřívějšímu odtržení od povrchu tělesa (menší hybnost klade menší odpor vůči narůstajícímu tlakovému gradientu). Naopak turbulentní mezní vrstva si s sebou nese větší množství energie, které díky větší hybnosti elementů tekutiny oddaluje efekt odtržení.

*Tento efekt se často využívá například v letectví. Na vrchní stranu křídel jsou instalované tzv. vírové generátory (vortex generators), které urychlují přechod do turbulentní mezní vrstvy a zajišťují oddálení či zamezení výraznějšího odtržení proudu tekutiny od křídel. Tyto jevy zajišťují lepší vztlakové vlastnosti například při vzletu či přistání (menší rychlosti-menší hodnoty  $Re$ ).*

Nyní jsou již známy základní efekty spojené se smykovým napětím a tlakem působícím na povrch tělesa obtékaného tekutinou. Zároveň byly popsány základní vlivy velikosti Reynoldsova čísla na celkový charakter proudění.

*Na závěr je uvedený krátký výčet nejpodstatnějších informací z předešlých podkapitol.*

- Efekty viskozity tekutiny mají při vyšších  $Re$  vliv hlavně v tenké mezní vrstvě.
- Mezní vrstva může mít laminární/turbulentní charakter.
- Charakter mezní vrstvy ovlivňuje ztráty způsobené drsností povrchu tělesa. Drsnost tělesa má větší vliv u proudění s turbulentní mezní vrstvou. Laminární mezní vrstva je závislá hlavně na  $Re$ , vliv drsnosti je u ní zanedbatelný.
- Rychlost se při obtékání těles s nenulovou tloušťkou mění, se změnou rychlosti dochází i ke změnám tlaku na povrchu tělesa.
- Tlak se mění ve směru proudnic (má nenulové gradienty), v normálovém směru k povrchu tělesa jsou tlakové gradienty zanedbatelné. Tudiž je tlak v normálovém směru přibližně konstantní (je tedy přibližně stejný jak ve volném proudu tekutiny tak v mezní vrstvě).
- Viskózní efekty v mezní vrstvě způsobují ztráty energie elementů tekutiny. Tyto ztráty mohou vést k nedostatečné hybnosti elementů pro překonání kladných tlakových gradientů a vést k odtržení tekutiny (mezní vrstvy) od povrchu tělesa.

- Održení tekutiny vede k zastavení distribuce tlaku na plochu tělesa. Održení může vést ke ztrátě vztlaku
- Turbulentní mezní vrstva oddaluje efekty održení.
- Viskózní efekty mají po održení výraznější efekt v održené mezní vrstvě a oblasti úplavu.

### 4.3. Aerodynamický odpor

Vztah pro výpočet aerodynamického odporu byl uveden na začátku kapitoly, nyní jsou již zároveň známy základní principu působení tlaku a smykového napětí na těleso.

V aerodynamice je obvyklé odpor rozdělovat na třecí odpor a tlakový odpor. Toto rozdělení odpovídá jednotlivým částem vztahu pro výpočet odporu.

Tlakový odpor je tedy závislý na tlakové distribuci kolem tělesa.

$$D_{TLAKOVÝ} = \int p \cos \theta \, dA \quad (18)$$

Tlakový odpor hraje větší roli u těles s méně aerodynamickým tvarem jako je například deska kolmá vůči proudění (situace je popsána na začátku kapitoly). Tlakový odpor může být například dominantní složkou odporu pro běžné automobily, třecí se složka je poměrově zanedbatelná. Dalším případem je například obtékání budov (třecí tlak je taktéž poměrově zanedbatelný a na celkový odpor má největší vliv tlak působící na povrchu tělesa)

Třecí odpor je závislý na hodnotách smykového napětí na povrchu tělesa.

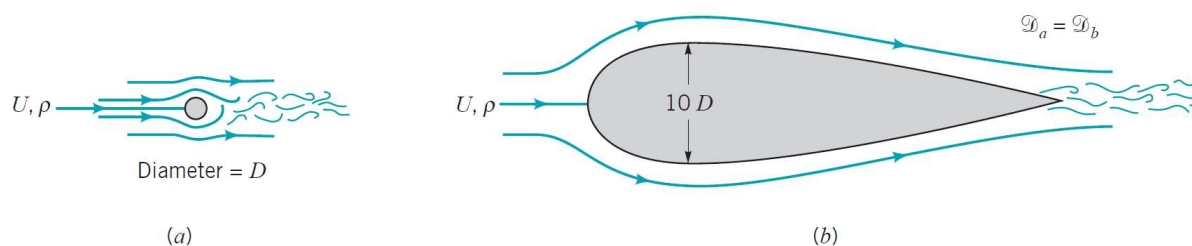
$$D_{TŘECÍ} = \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (19)$$

Vliv složek odporu je primárně závislý na tvaru tělesa a  $Re$  pro dané proudění. Pro ploché desky tvoří celkový odpor primárně třecí odpor, pro aerodynamicky tvarované profily či tělesa může mít taktéž hlavní vliv třecí odpor.

Jak bylo zmíněno výše na vliv smykového napětí má taktéž vliv velikost  $Re$ . Pro turbulentní proudění je obvyklý nárůst vlivu smykového napětí, proto i nárůst třecího odporu těles.

Porovnání vlivu tvaru tělesa na celkový odpor je na obrázku č. 33. Válec má i přes menší velikost stejný aerodynamický odpor jako letecký profil o výrazně větších rozměrech. Díky menšímu úplavu za leteckým profilem je mezní vrstva déle přimknutá k povrchu a tlak může působit na profil i v druhé polovině a svojí paralelní výslednicí síly působit proti směru proudu. Je tedy odečítána část tlakového odporu.

U válce je na pravé polovině tekutina odtržena od povrchu tudíž na pravou stranu tělesa výrazněji nepůsobí tlak. Silová výslednice ve směru zprava do leva, která by se odečítala od silové výslednice ve směru proudění, je zanedbatelná. Tudíž je tlakový odpor vyšší.



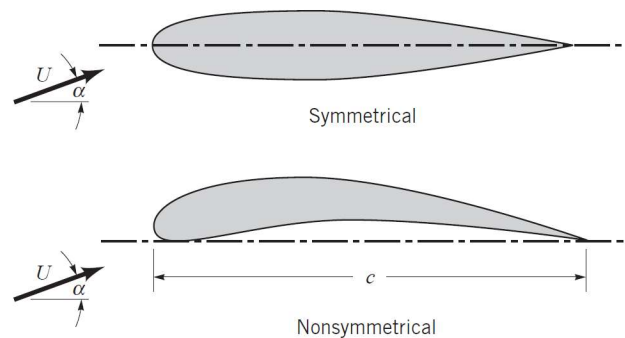
Obrázek 33: Porovnání stejného odporu dvou těles rozdílných tvarů [29]

Při snaze o snížení aerodynamického odporu je potřeba zohlednit tvar tělesa,  $Re$  a drsnost povrchu.

#### 4.4. Aerodynamický vztlak

Vztah pro aerodynamický vztlak byl taktéž zaveden na začátku kapitoly. Nyní je vhodné uvést, že největší vliv na jeho velikost má tlaková distribuce na povrchu tělesa a velikost  $Re$ .

Tlaková distribuce je ovlivněna hlavně tvarem daného tělesa. Na obrázku č. 34 je možné vidět rozdíl v symetrickém a nesymetrickém leteckém profilu. Nesymetrický profil narozdíl od symetrického vytváří vztlakovou sílu i při nulovém úhlu náběhu  $\alpha$ .

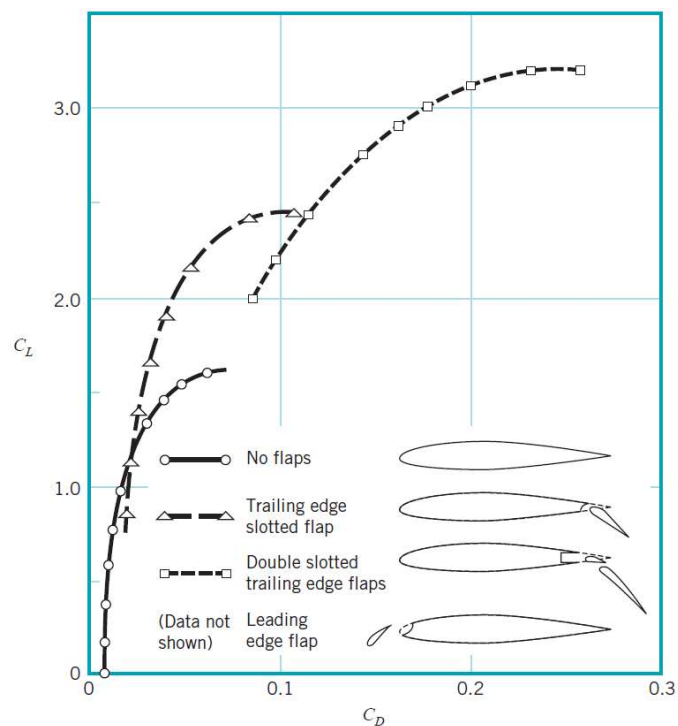


Obrázek 34: Porovnání symetrického a nesymetrického profilu [29]

Nastavitelné prohnutí profilu se využívá například u letadel v podobě vztlakových klapek. Úprava prohnutí je výhodná hlavně během přistání či vzletu jinak řečeno při nízkých rychlostech. Při nízkých rychlostech napomáhá prohnutí k navýšení generovaného vztlaku. Díky nastavitelnosti jsou po vzletu a dosažení vyšších rychlostí klapky vráceny do původní polohy pro zpětné snížení aerodynamického odporu zatažením klapky.

Dále je možné do profilů umisťovat tzv. sloty. Sloty spojují spodní stranu profilu s vrchní stranou. Toto spojení má za následek přesun tekutiny mezi stranou s vyšším tlakem do oblastí s nižším tlakem. Tento přesun má za následek dodání kinetické energie (hybnosti) do mezní vrstvy a zpomalení ztráty energie viskózními efekty vedoucí k odtržení.

Vliv zařízení navyšujících aerodynamický vztlak je na obrázku č. 35. Největší vliv na vztlakový koeficient mají dvojitě klapky.

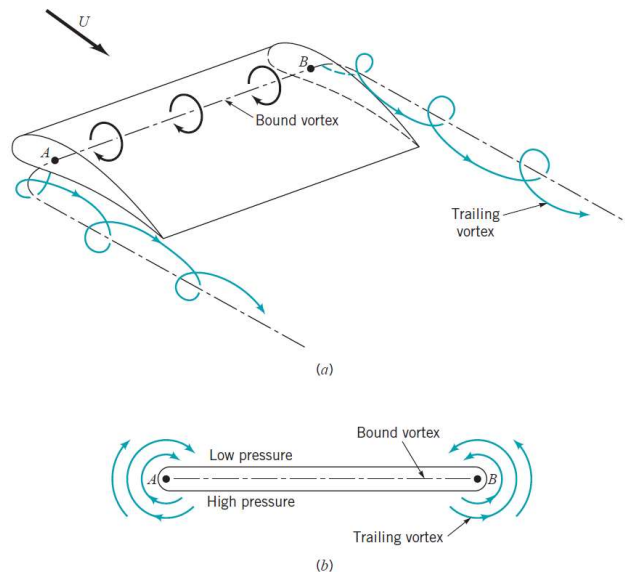


Obrázek 35: Porovnání vztlakového koeficientu při použití zařízení navyšujících vztlak [29]

Podobných zařízení navyšujících vztlak při menších rychlostech je možné využít i u VT. Sloty či více segmentové profily mohou být vhodným řešením pro navýšení vztlaku.

## 4.5. 3D efekty proudění kolem těles

V předešlých částech práce bylo uvažováno 2D proudění. Trojrozměrnost obtékaných těles si s sebou ale nese další problematiku. Jedním z 3D efektů, který ovlivňuje celkový vztlak a odpor obtékaného tělesa je vznik vírů na koních křídel (lopatek). Tyto koncové víry vznikají díky přelévání tekutiny ze spodní strany profilu (strana s větším tlakem) do oblasti vrchní strany profilu (strana s nižším tlakem). Víry se na vrchní straně zároveň spojují s víry v mezní vrstvě a tvoří rozsáhlé vírové struktury za obtékaným tělesem. Vznik a smysl vírů je znázorněn na obrázku č.36.



Obrázek 36: Koncové víry [29]

Díky tomu, že část tekutiny „naráží“ do vrchní strany profilu dochází ke snížení vztlaku. Toto snížení vztlaku se nazývá indukovaným odporem (indukovaný odpor se tedy projevuje pouze u těles u nichž je uvažováno 3D proudění).

Vliv indukovaného odporu je možné snížit navyšováním štíhlosti křídla (aspect ratio). Štíhlost křídla je definována jako poměr mezi kvadrátem rozpětí křídla  $b$  a celkovým povrchem křídla  $S$ .

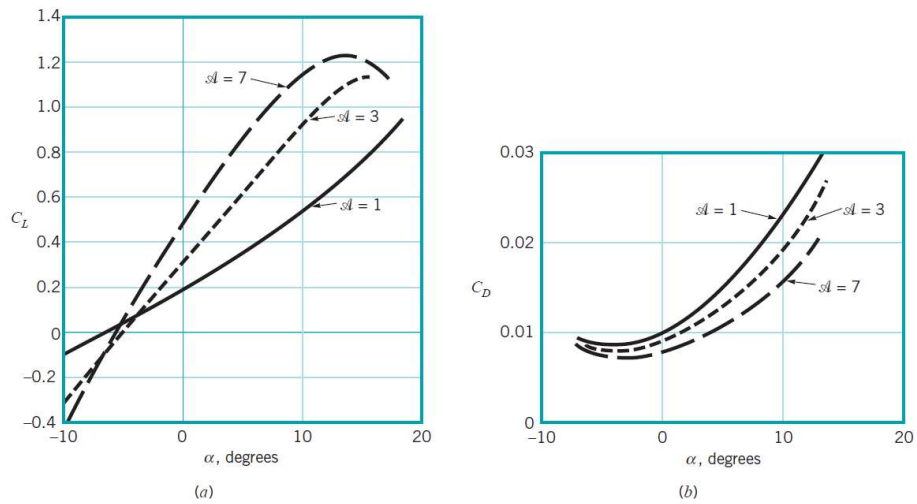
$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (20)$$

Navyšování štíhlosti totiž situaci obtékání více přibližuje k 2D proudění. Oblast zasažená koncovými víry je tedy pro letadlo o velkém rozpětí zanedbatelná oproti zbytku obtékané plochy.

Vyšší hodnoty štíhlosti křídla zároveň zvyšují často používaný poměr  $C_L/C_D$ .

*Názorným příkladem využívajícím vysoký poměr štíhlosti křídla je větroň. Větroň má díky němu dobrý poměr mezi  $C_L/C_D$  což znamená, že má dobré klouzavé vlastnosti (je schopný plachtit). Vysoký štíhlostní poměr mají i například křídla plachtících ptáků (albatros, racek).*

Nárůst vztlakového koeficientu a snížení odporového koeficientu navyšováním štíhlosti křídla je vidět na obrázku č. 37 (štíhlost křídla je označena symbolem  $\mathcal{A}$ ).



Obrázek 37: Porovnání vlivu štíhlosti křídla [29]

Všechny zmíněné úpravy a závěry je možné aplikovat při aerodynamickém návrhu listů, lopatek a rotorů VT.



## 4.6. Popis leteckého profilu

Letecký profil (airfoil) má vrchní stranu (upper surface) a spodní stranu (lower surface). Vrchní strana je obvykle podtlaková, spodní strana je přetlaková. Jak je již známo tlaková diference a smykové napětí působící na plochu tělesa (leteckého profilu) obtékaného tekutinou vytváří vztlakovou a odporovou sílu. Vrchní strana je někdy nazývána konvexní stranou a spodní strana konkávní stranou.

U profilu se dále rozeznává náběžná hrana (leading edge) a odtoková hrana (trailing edge). Spojnice mezi náběžnou a odtokovou hranou se nazývá tětivou profilu (chord line). Pro velikost tětivy profilu se obvykle užívá značení  $c$ .

Křivka vymežující polovinu leteckého profilu se nazývá střední křivka profilu (camber line). Pro symetrické profily je tětiva totožná se střední křivkou.

Dále je používána hodnota prohnutí  $f$  (camber). V kontextu s prohnutím profilu se používá veličina zvaná relativní prohnutí profilu  $RC$  (relative camber).

$$RC = \frac{f}{c} [1] \quad (21)$$

*Prohnutí je odečteno mezi střední křivkou profilu a tětivou profilu.*

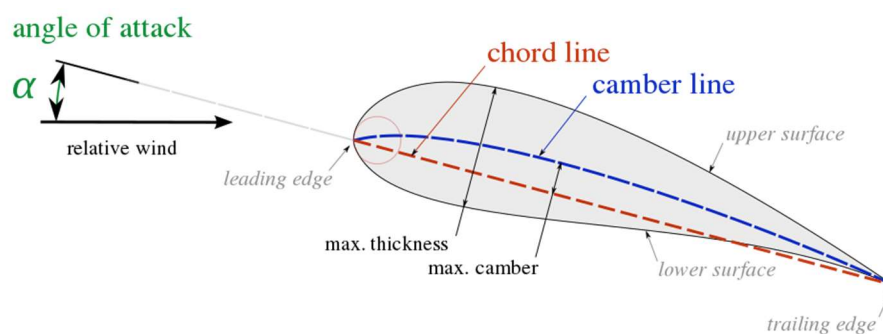
Další používanou veličinou je tloušťka profilu  $t$  (thickness). Tloušťkou  $t$  se používá ve vztahu pro výpočet relativní tloušťky profilu  $RT$  (relative thickness). Při popisu jednotlivých profilů se používá maximální hodnota  $RT$ .

$$RT = \frac{t}{c} [1] \quad (22)$$

Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole vztlakové vlastnosti těles je možné měnit úpravou polohy tělesa vůči směru proudění tekutiny. U leteckých profilů se pro popis náklonu používá pojem úhel náběhu,  $\alpha$  (angle of attack).

*Úhel náběhu je měřený mezi tětivou profilu a vektorem příchozí relativní rychlosti.*

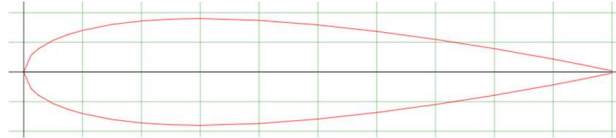
Pro letecké profily existují empiricky/numericky získané závislosti vztlakového a odporového koeficientu na úhlu náběhu. Tyto závislosti dále slouží k výběru leteckého profilu pro danou aplikaci.



Obrázek 38: Letecký profil [31]

## 4.6.1. Letecký profil NACA0018

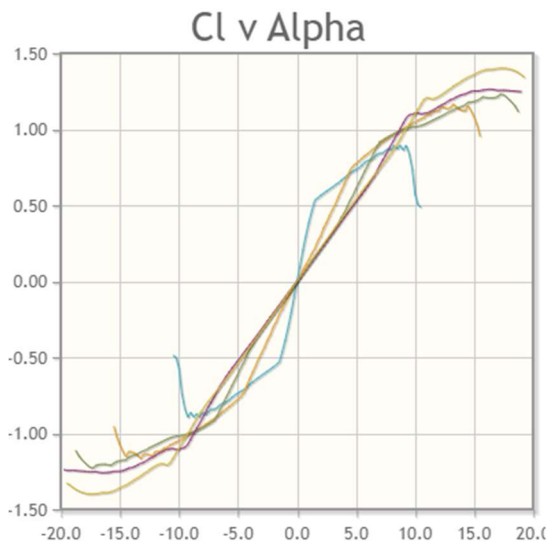
Pro lepší představu o podobě konkrétního leteckém profilu je vybrán letecký profil z rodiny čtyřmístných NACA profilů. Přesněji NACA0018. Jedná se o symetrický profil s maximální relativní tloušťkou 18% (ve 30% délky tělivity).



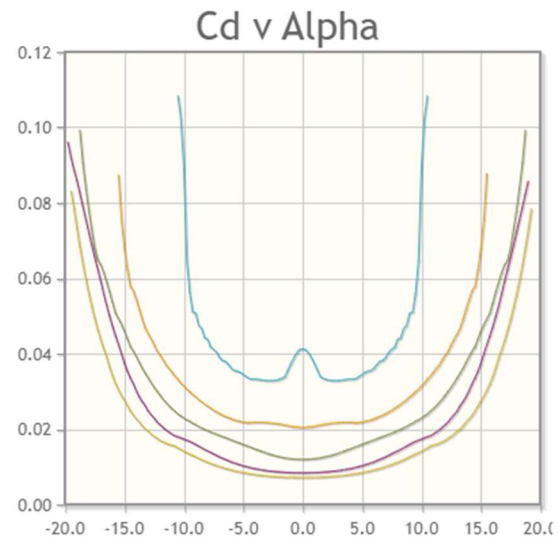
Obrázek 39: letecký profil NACA0018 [32]

Zmíněné závislosti koeficientu vztlaku a odporu na úhlu náběhu a další poměry jsou na obrázcích níže. Barevně jsou odděleny křivky pro různá  $Re$ .

$Re=50\,000$ ,  $Re=100\,000$ ,  $Re=200\,000$ ,  $Re=500\,000$ ,  $Re=1\,000\,000$



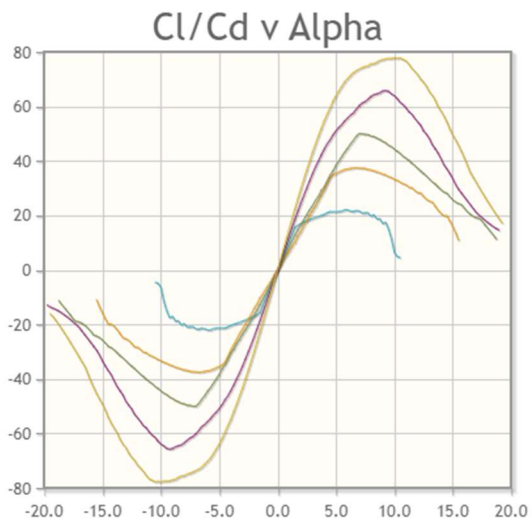
Obrázek 40: Závislost vztlakového koeficientu na úhlu náběhu, NACA0018 [32]



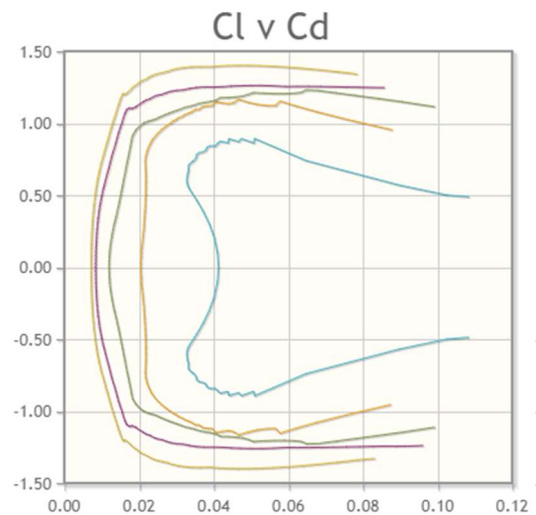
Obrázek 41: Závislost odporového koeficientu na úhlu náběhu, NACA0018 [32]

Na závislosti  $C_l$  na úhlu náběhu  $\alpha$  je u všech průběhů vidět dosažení maxima daných závislostí. Maximální hodnota značí kritický úhel náběhu při, kterém začne docházet ke snížení/ztrátě vztlaku. Zároveň je možné si povšimnout toho, že nárůst  $Re$  zvětšuje kritický úhel náběhu (oddaluje odtržení, jak bylo zmíněno v teoretické části kapitoly aerodynamiky).

Závislost odporového koeficientu na úhlu náběhu taktéž kopíruje teoretické poznatky z předešlé kapitoly. Při nárůstu  $Re$  dochází k poklesu hodnot odporového koeficientu, díky lepšímu přimykání tekutiny k povrchu profilu (oddálení odtržení). Oddálení odtržení má za výsledek působení tlaku na pravé části profilu (tlak na plochu vyvolá sílu), která působí proti směru rychlosti větru a tudíž se odečítají vyšší hodnoty tlakové odporové síly od složek působících ve směru proudění.



Obrázek 42: Závislost poměru vztlakového a odporového koeficientu na úhlu náběhu, NACA0018 [32]



Obrázek 43: Závislost vztlakového poměru odporovém koeficientu, NACA0018 [32]

Závislost poměru  $C_L/C_D$  na úhlu náběhu je viditelná na obrázku č. 42. Vliv  $Re$  na maximální hodnotu  $C_L/C_D$  je zde ještě výraznější (poměr  $C_L/C_D$  ve 3D proudění může zároveň navýšit nárůst štíhlosti křídla, viz. příklad s větroněm z předešlé kapitoly).

*Profil NACA0018 je zmíněn a využit v následujících kapitolách této práce, především v praktické části.*

## 5. Porovnání aerodynamické účinnosti jednotlivých druhů větrných turbín

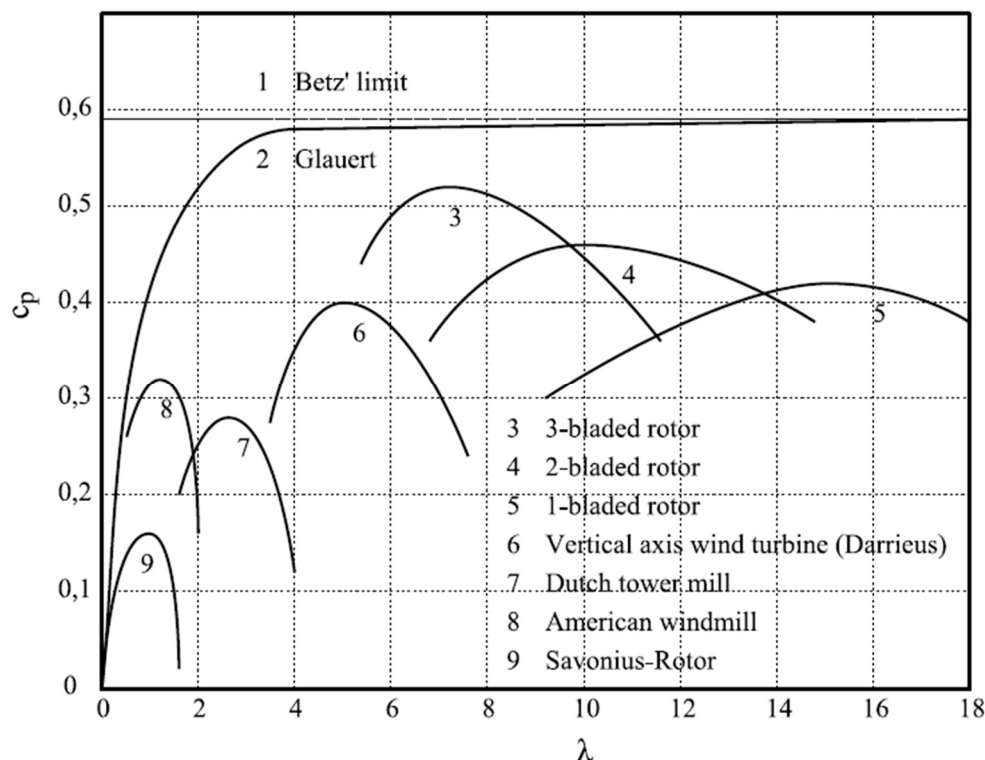
Z důvodu snazšího porovnání VT v následujících kapitolách je porovnání jejich účinností předrženo před jejich podrobnější popis.

Výkonový koeficient je při porovnávání účinnosti jednotlivých VT obvykle uváděn jako funkce koeficientu rychloběžnosti  $\lambda$ . Vztah pro výpočet  $\lambda$  uvádí rovnice č. 23.

$$\lambda = \frac{v_{\omega R}}{v_{\text{větru}}} = \frac{\omega \cdot r}{v_{\text{větru}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot r \quad [1] \quad (23)$$

Obrázek č. 44 obsahuje obvyklé závislosti výkonového součinitele na koeficientu rychloběžnosti pro nejpoužívanější typy VT. Zároveň obsahuje teoreticky odvozené dosažitelné maximum výkonového součinitele, již zmíněný Betzův limit. Odvození Betzova limitu je možné dohledat v následujících zdrojích: [22], [33].

1. Betzův limit
2. Glauert-ideální rotor s  $\infty$  množstvím lopatek a nulovým odporem
3. Rotor se třemi listy (HAWT)
4. Rotor se dvěma listy (HAWT)
5. Rotor s jedním listem (HAWT)
6. Darrieova VAWT
7. Větrný mlýn
8. Halladayova („americká“) větrná turbína
9. Savoniova VAWT



Obrázek 44: Účinnosti větrných turbín v porovnání s Betzovým limitem [28]

Z obrázku č. 44 je možné vidět, že největších účinností dosahují HAWT se třemi listy, jejich maximální účinnosti se pohybují v rozmezí 50-55% (84-93% Betzova limitu). Ze závislosti je zároveň dobře vidět, že všechny druhy VT pracují na maximální účinnost v určité hodnotě koeficientu rychloběžnosti rotoru- v reálných podmínkách je snahou elektrárnu udržovat na otáčkách odpovídajícím koeficientu rovnoběžnosti ve kterém dosahuje výkon VT svého maxima. V případě HAWT je tato optimalizace prováděna pomocí úprav úhlu náběhu listů rotoru. Naopak průmyslově vyráběné VAWT obvykle nemají systémy umožňující optimalizaci úhlu náběhu.

Základní přehled účinností jednotlivých VT opodstatňuje způsob jejich využití a aplikace ve větrné energetice.

Tři typy VT označené v přehledu (3, 6, 9) jsou větrnými turbínami s největším využitím v moderní větrné energetice a jsou jim zároveň věnovány následující části této práce.

Informace týkající se HAWT a Savoniovy VAWT jsou v práci uvedeny pro získání základního přehledu o jednotlivých typech turbín. Zároveň jsou u jednotlivých druhů naznačeny možnosti jejich aplikace. Darrieovy VAWT jsou následně popsány podrobněji s ohledem na praktickou část práce.

## 6. Větrné turbíny s horizontální osou rotace (HAWT)

---

HAWT jsou celosvětově nejrozšířenějším typem větrným turbín využívaným v celém spektru výkonu od mikro tříd (výkony řádově ve stovkách W) po nejvýkonnější VT přesahující svým výkonem 10 MW. HAWT hrají hlavní roli z hlediska navyšování kapacity ve větrné energetice. Zároveň tvoří většinu celkové nové instalace ve větrné energetice.

### 6.1. Aerodynamika HAWT

---

Větrná turbína s horizontální osou rotace je tvořena rotorem, gondolou a věží. Komponentou zajišťující převod kinetické energie větru na mechanický výkon je rotor. Rotor je tvořen listy (obvykle 3 listy pro větší VT, řádově 500kW+, HAWT malých výkonů mohou mít i větší počet listů, například 5).

Listy větrných turbín se skládají z vhodně zvolených leteckých profilů, které při obtékání vzduchem zajišťují vznik aerodynamických sil působících na list. Výslednice vztlakové složky aerodynamické síly působí v rovině rotace rotoru a zapříčiňuje vznik kroutícího momentu  $M_k$ , který zajišťuje roztočení turbíny úhlovou rychlostí  $\omega$ .

Kombinace kroutícího momentu a úhlové rychlosti vytváří mechanický výkon, který je přenášen přes hřídel rotoru dále do větrné turbíny (podrobnější popis HAWT je v následující podkapitole).

$$P = \overline{M_k} \cdot \omega [W] \quad (24)$$

Díky rotaci lopatek není rychlostní výslednice (relativní rychlost) konstantní po celé délce lopatky. Nekonstantní relativní rychlost vzduchu proudícího na list si vyžaduje úpravy geometrie listu pro zachování maximální aerodynamické účinnosti.

Z důvodu zmíněné aerodynamické optimalizace mohou být pro jednotlivé sub sekce listu použity různé letecké profily. Tyto profily mají zároveň nekonstantní délku tětivy a jsou oproti sobě natočeny.

Velikost tětivy profilu je směrem od středu rotace ke konci listu zmenšována pro snížení pevnostního namáhání listu. Tětiva je tedy funkcí poloměru rotace (délky listu).

$$c = f(r) [m] \quad (25)$$

Pro úhel který svírá náběžná a odtoková hrana listů se v anglické literatuře používá termín tapering angle tzv. úhel zúžení listu (zúžení listu je způsobenou proměnnou délkou tětivy).

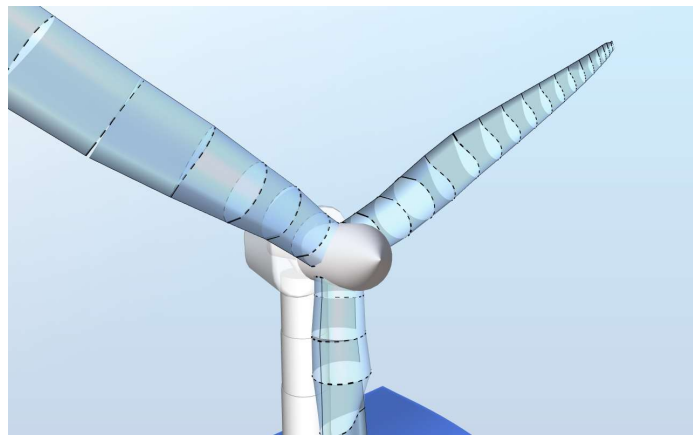
Zmíněné natočení profilů napomáhá k zajištění ideálního úhlu náběhu, který umožňuje získání maximální vztlakové složky aerodynamické síly (případně maximálního poměru  $C_l/C_D$ ) působící na list. Úhel mezi jednotlivými sub sekcemi listu se nazývá úhel otočení, v anglické literatuře se používá termín twist angle. Úhel otočení je obvykle značen jako  $\beta$ . Jelikož se, jak bylo zmíněno výše, relativní rychlost mění při pohybu v axiálním směru lopatky je z obecného hlediska úhel otočení funkcí poloměru rotace (délky listu).

$$\beta = f(r) [^\circ] \quad (26)$$

S ohledem na to, že HAWT vysokých výkonů operují v podmínkách, kde se mohou rychlosti větru výrazně měnit obsahují rotory turbín natačecí mechanismy listů, které dále rozšiřují možnost aerodynamické optimalizace úhlu náběhu v širším spektru rychlostí. Úhel natočení (upravující úhel náběhu sub profilů listu) je obvykle značený  $\theta$ , v anglické literatuře pitch angle.

Zároveň umožňují natočení listů do polohy ve, které není na listu rotoru generována vztlaková síla. Takové natočení se používá tehdy pokud je potřeba elektrárnu vyřadit z provozu (například kvůli vichřici, tajfunu, údržbě atd.).

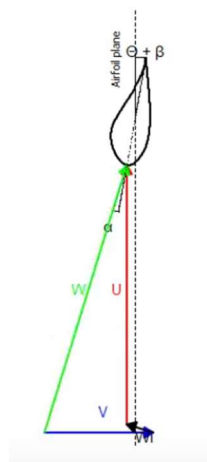
Obecně je možné říci, že volba typu profilu a funkční závislosti  $\beta(r), c(r)$  jsou know-how dané společnosti, která větrné turbíny vyrábí.



Obrázek 45: List HAWT s viditelnou proměnnou geometrií průřezu [34]

### 6.1.1. Rychlostní rozklad na listu HAWT

Relativní rychlost  $\mathbf{W}$  je tvořena vektorovým součtem tří rychlostí. Vektorem příchozí rychlosti vzduchu ( $\mathbf{V}$ ), vektorem indukované rychlosti  $\mathbf{W}_i$  a vektorem obvodové rychlosti  $\mathbf{U}$ . mezi vektorem relativní rychlosti  $\mathbf{W}$  a tětivou daného profilu se nachází úhel náběhu  $\alpha$ . Rychlostní rozklad je na obrázku č. 46.

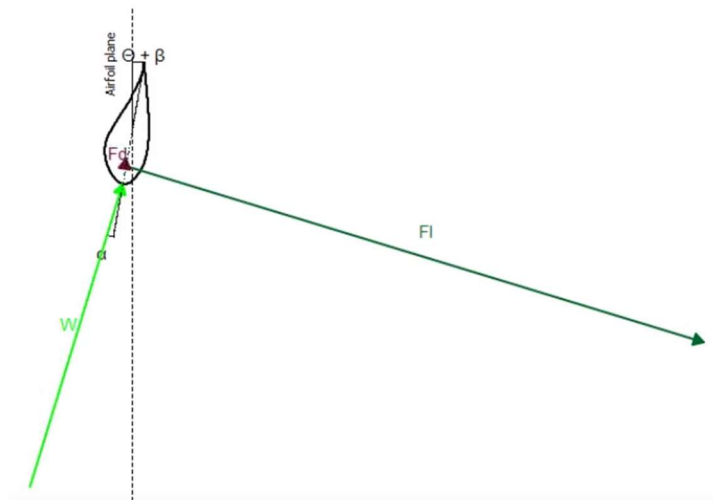


Obrázek 46: Rychlostní rozklad na listu HAWT [34]

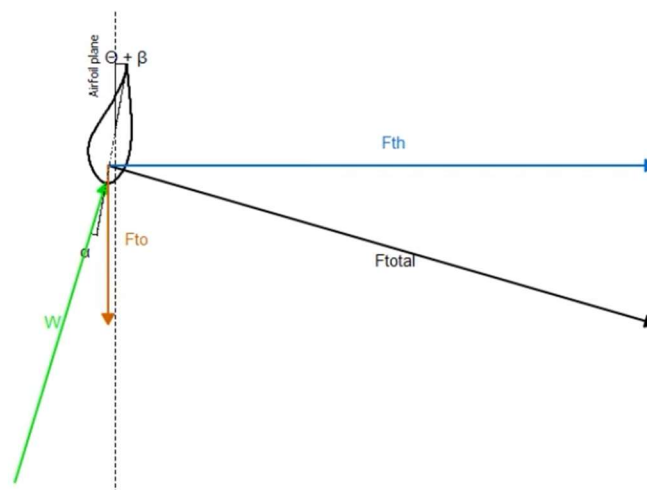
## 6.1.2. Silový rozklad na listu HAWT

Silový rozklad na leteckém profilu je již známý z předchozích kapitol. Pro lepší ilustraci je silový rozklad proveden na obrázku č. 47. Je možné vidět, že odporová síla je poměrově zanedbatelná oproti vztlačkové síle. Obě aerodynamické síly je možné sečíst v celkovou aerodynamickou sílu  $F_{TOTAL}$ . Tuto sílu je možné následně rozložit do roviny rotace a roviny paralelní s rychlostí větru.

Celková síla  $F_{TOTAL}$  se tedy rozloží na sílu  $F_{TO}$  (torque force, kroutící síla) a  $F_{TH}$  (thrust force, přítlačná síla), viz obrázek č. 48. Kroutící síla je silou, která uvádí list do rotace. Přítlačná síla je silou, kterou musí zachytit věž elektrárny.



Obrázek 47: Silový rozklad na listu HAWT, 1 [34]



Obrázek 48: Silový rozklad na listu HAWT, 2 [34]

Pro vizualizaci byl využit simulační software Ashes 3.17. [34]

Další informace týkající se silového rozkladu na listu HAWT je možné získat v následující literatuře: [33], [22]



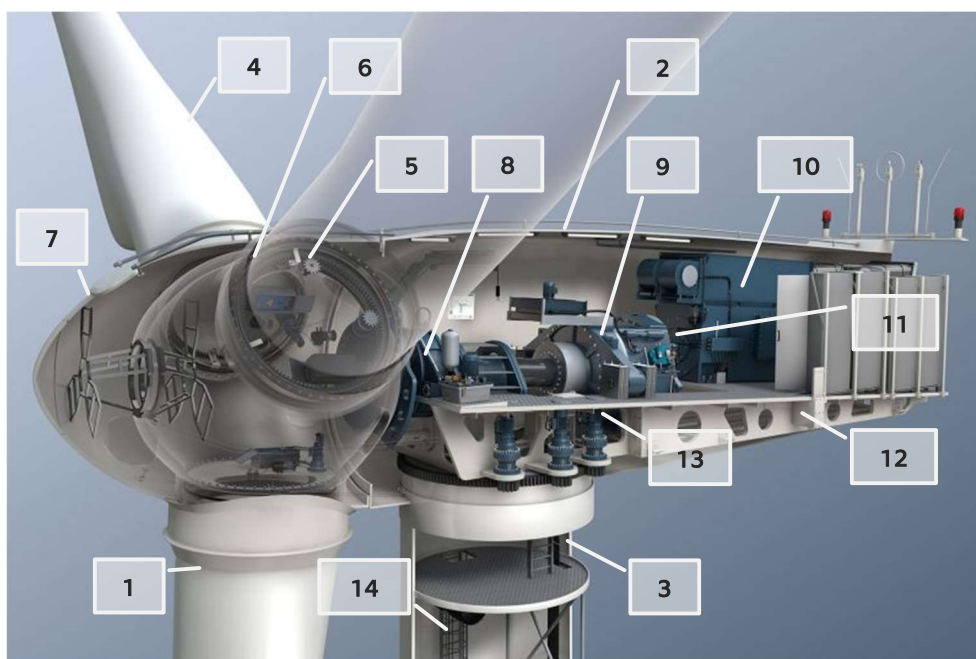
## 6.2. Komponenty HAWT

HAWT se skládá z rotoru (1), gondoly (obsahující strojovnu) (2) a věže (3). Čísla v závorkách odkazují na obrázek č. 49, 50, 51, 52.

Rotor je tvořen listy (4) uloženými v mechanismu nastavování úhlu náběhu listů (5), který umožňuje naklápění lopatek. Tento mechanismus může být hydraulický či elektrický, obrázky č. 50, 51. Natáčecí mechanismus je součástí rotorové hlavy (6), která je obvykle kryta kuželem (7).

Rotorová hlava je přes přírubu spojena s centrální hřídelí (8), která spojuje rotor s převodovkou (9). Převodovka zvyšuje nízké otáčky rotoru na vyšší otáčky potřebné pro výrobu elektřiny pomocí elektrického generátoru (10) (obvykle se otáčky navyšují z 8-20 otáček za minutu na rotoru až na 1800 otáček za minutu na generátoru [35], platí pro velké větrné elektrárny). Pro velké výkony (řádově 500 kW a více) jsou obvykle používány vícestupňové planetové převodovky. Převodovka je s generátorem spojena buď přímo nebo přes spojku, která tlumí případné rázy. Větrné elektrárny využívají synchronních (4-pólové/6-pólové) i asynchronních generátorů.

Za převodovkou je umístěna brzda (11), která zajišťuje zastavení elektrárny při údržbě nebo pro nouzové zastavení elektrárny při příliš vysokých rychlostech větru (brzda je umístěna až za převodovku z důvodu nižšího kroutícího momentu na výstupu z převodovky jenž umožňuje instalaci menší brzdy).



Obrázek 49: Řez HAWT s převodovkou [36]

Hřídel s převodovkou a generátorem a dalšími komponenty strojovny jsou uloženy na nosném rámu (12) a umístěny do gondoly (gondola je obvykle z kompozitních materiálů). Nosný rám je uložen na otočivém kuličkovém ložisku [37] ve věži elektrárny. Za pomoci natáčecího mechanismu (13) je zajištěno polohování rotoru vůči směru větru (úprava azimutu strojovny), tento mechanismus je obvykle elektrický s podobným technickým řešením jako v případě mechanismu natáčení lopatek). Věž je po nastavení potřebné polohy uzamknuta pomocí hydraulických brzd, aby nebylo zatížení způsobené

vnějšími vlivy přenášené do elektromotorů. Věž zároveň obsahuje výtah/žebřík pro údržbu (14) a elektroinstalaci propojující elektrárnu s transformátorem a následně s elektrickou sítí.

Gondola dále obsahuje řídicí elektroniku a různé druhy snímačů, které společně zajišťují regulaci a řídí chod elektrárny. Dále obsahuje chladicí a hydraulické okruhy obsahující olejové nádrže, olejové filtry, čerpadla, tlakové rozvody a další komponenty zajišťující chlazení a mazání ložisek, generátoru, převodovky a dalších součástí.



Obrázek 50: Detail hydraulického mechanismu natáčení úhlu náběhu listů lopatek [36]



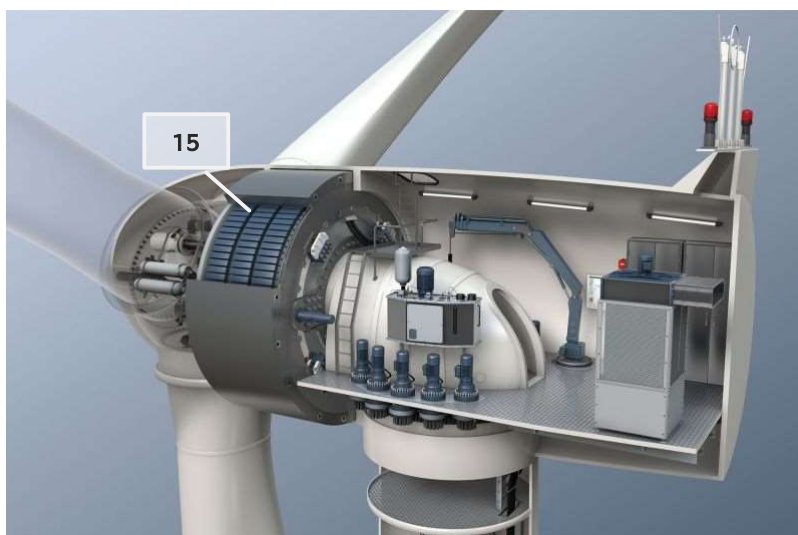
Obrázek 51: Detail elektrického mechanismu natáčení úhlu náběhu lopatek [36]

Obvyklou součástí gondoly je také anemometr, který měří rychlost větru v reálném čase a společně s otáčkoměry hlavního rotoru předává data řídicí elektronice, která nastavuje úhel náběhu lopatek a natáčení gondoly pomocí natáčečích mechanismu a tím zajišťuje ideální konfiguraci nastavení elektrárny pro dané povětrnostní podmínky čímž je maximalizováno množství vyrobené energie. Dále bývají na gondole umístěna poziční světla zajišťující její viditelnost i v noci kvůli leteckému provozu.

HAWT o velkých výkonech často využívají multipólových synchronních generátorů (15), které umožňují vyřazení převodovky. Vyřazení převodovky je benefitem primárně z důvodu zvýšení účinnosti zařízení. Díky vysokým výkonům velkých HAWT jsou i malé procentuální ztráty (řádově 1-5%) nezanedbatelné z ekonomického pohledu. Zároveň se s vyřazením převodovky snižuje počet komponent s čímž se snižuje pravděpodobnost poruch a počty intervalů údržby (důležitý faktor například z pohledu údržby elektráren umístěných na moři) dále je sníženo množství hydraulických a chladicích okruhů.

U elektráren tohoto typu výrobci často používají symboliku-DD (direct drive).

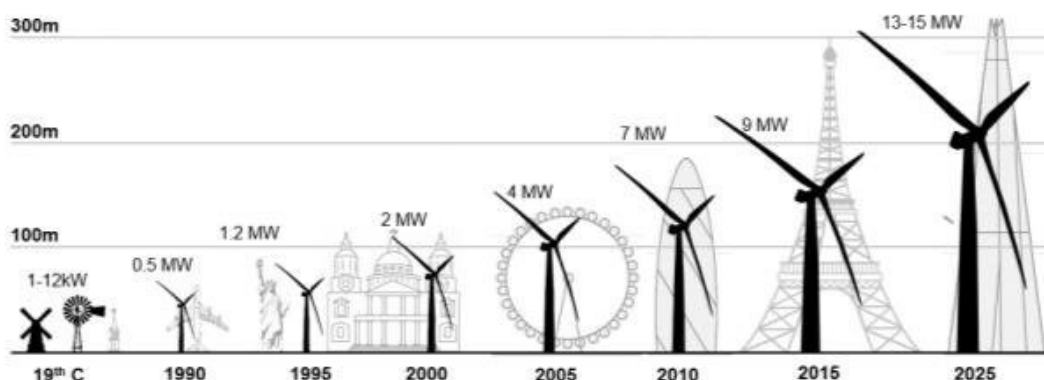
Oproti HAWT s převodovkou je gondola DD HAWT menších rozměrů a má méně podlouhlý tvar (tento rozdíl je patrný například při porovnání velkých OFFSHORE elektráren (řádově 6-14MW) s menšími vnitrozemskými elektrárnami (řádově 500kW-6MW).



Obrázek 52: Řez DD HAWT [36]

### 6.3. Výkonnostní třídy HAWT

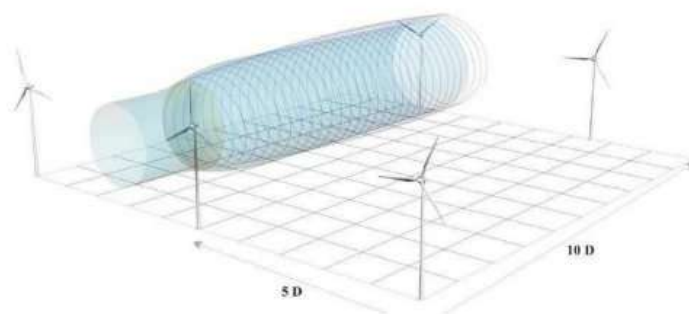
Moderní HAWT se vyrábějí ve 2-5 MW třídách pro ONSHORE energetiku a v 8-15MW třídách pro OFFSHORE energetiku. Dále existují mikro a malé HAWT, tyto elektrárny, ale nemají z pohledu komerční větrné energetiky tak velký význam a největší výrobci větrných elektráren (Vestas, Siemens Gamesa, Enercon, Nordex, General Electric, Goldwind a další) se nevěnují jejich výrobě. Postupný vývoj výkonnostních tříd větrných elektráren je na obrázku č. 53. Je možné vidět neustálý nárůst výkonu, který umožňuje vývoj v materiálovém inženýrství, pevnostních analýzách a aerodynamice.



Obrázek 53: Porovnání velikosti větrných elektráren [38]

## 6.4. Instalace HAWT

Jak bylo zmíněno ve 2. kapitole VT se instalují do větrných farem. Při umísťování HAWT ve farmě je potřeba dodržet dostatečné vzdálenosti mezi jednotlivými elektrárnami. VT v zákrytu se nacházejí v aerodynamickém úplavu, přítomnost úplavu výrazně snižuje účinnost elektráren v zákrytu. Doporučenou vzdáleností mezi jednotlivými VT je minimálně  $10xD/5xD$  (dle obrázku č. 54,  $D$ =průměr rotoru elektrárny), některé studie uvádějí až  $15-20xD$  pro dostatečnou obnovu proudu vzduchu z úplavu za VT v předešlých řadách [39]. Pro zajištění maximální účinnosti větrné farmy je tedy rozmístění turbín velice důležité.



Obrázek 54: Schéma rozmístění větrných turbín [40]



Obrázek 55: Úplav za větrnými turbínami zvýrazněný díky mlze [41]

Dalším faktorem hrajícím roli v umístění elektráren je minimální vzdálenost od obydlí (pro ONS instalaci). Minimální vzdálenost je závislá na legislativě jednotlivých států a pohybuje se v rozmezí  $4-10xH$  ( $H$ =výška elektrárny). V České republice není minimální vzdálenost stanovena, ale při volbě je možné se orientovat podle legislativy ostatním států jako je například Dánsko (minimálně  $4xH$ ) [42]. Přílišně striktní omezení může mít ale za následek snížení možné instalace a zpomalení implementace větrné energetiky do energetického mixu jednotlivých států.

Hladina akustického tlaku se pro VT pohybuje v okolí 35-45 dB (pro vzdálenosti kolem 350 m od elektrárny). Pro vzdálenost 500 m se akustický tlak snižuje přibližně na 38 dB [43], [44]. Za pomoci výpočtu pomocí zákona převrácených čtverců pro zvuk [45] je možné v modelové situaci pro vzdálenost 1500 m (odpovídá 7,5 násobku výšky elektrárny o výšce 200 m-odpovídá například ONS elektrárně Siemens Gamesa SG 3.4-145 s výškou věže 127,5 m, průměrem rotoru 145 m a výkonem 3,465 MW pro návětrné strany s nízkou rychlostí větru [46]) dospět k hodnotě akustického tlaku  $\sim 29$  dB (pro porovnání auto jedoucí rychlostí 65 km/h ve vzdálenosti 100 m dosahuje hodnoty

akustického tlaku ve výši 55dB, nákladní automobil s rychlostí 50 km/h ve vzdálenosti 100 m dosahuje 65dB. Tichá místnost má pro porovnání hodnotu akustického tlaku 35dB [43], to tedy znamená, že v předpokládané vzdálenosti 1500 m splyne zvukové znečištění způsobené větrnou elektrárnou s okolím.

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2. (Možnosti instalace větrných turbín) důležitým faktorem pro získání maximálního KF a výkonu je vhodná volba lokality větrné turbíny na základě povětrnostního profilu. Při výběru vhodné větrné turbíny pro dané povětrnostní podmínky je možné se orientovat dle povětrnostních tříd dle normy IEC 61400.

Výrobci HAWT elektráren zmínění v předešlé části této kapitoly využívají následující členění:

Tabulka 1: Povětrnostní třídy dle IEC 61400

IEC 61400 je mezinárodní norma publikovaná elektrotechnickou komisí týkající se větrných elektráren. [47]	IEC Wind Class (povětrnostní třída)		
	I (vysoké rychlosti větru)	II (střední rychlosti větru)	III (nízké rychlosti větru)
Referenční rychlost [m/s]	50	42,5	7,5
<b>Průměrná roční rychlost [m/s]</b>	<b>10</b>	<b>8,5</b>	<b>7,5</b>
50-letý nejvyšší poryv větru [m/s]	70	59,5	52,5
Roční nejvyšší poryv větru [m/s]	52,5	44,6	39,4

Pro potřeby České republiky vyhoví díky menším průměrných rychlostech na většině území například elektrárny třídy IEC III (případně nespecifikovaná IEC S, IEC-S je definována výrobcem, obvykle se jedná o elektrárny pro nízké rychlostní profily).

## **7. Větrné turbíny s vertikální osou rotace (VAWT)**

---

VAWT jsou v energetickém průmyslu méně rozšířeným typem turbíny oproti HAWT konfiguraci, primárně díky menší účinnosti (viz. kapitola 5), která favorizuje HAWT v roli masové náhrady zdrojů využívajících například fosilních paliv. VAWT, ale mají svoje výhody v aplikacích vyžadujících menší výkony (řádově stovky W až jednotky kW). VAWT jsou vhodným typem větrné turbíny pro decentralizovanou energetiku díky jednodušší konstrukci, nezávislosti na směru větru a možnosti instalace do bližšího okolí budov a infrastruktury případně jako zdroje energie pro zařízení v odlehlých oblastech bez elektrické sítě.

### **7.1. Komponenty VAWT**

---

Komponenty VAWT jsou podobné jako v případě HAWT. VAWT se skládá z rotoru, centrálního hřídele, převodovky, generátoru, řídicí elektroniky a podstavy uložené v základech. Podrobnější popis VAWT konfigurace je v podkapitole 9.6, která obsahuje technický návrh malé větrné turbíny. Tento návrh je z technického hlediska řešený analogicky jako sériově vyráběné VAWT. Obecně platí, že VAWT konfigurace obsahuje menší počet komponent než HAWT- což může být výhodou z hlediska ceny.

### **7.2. Druhy VAWT**

---

Na rozdíl od HAWT se VAWT rozdělují na jednotlivé podtypy, které pro svoji funkci využívají různé fyzikální mechanismy. Souhrn jednotlivých typů včetně popisu jejich funkce a možných aplikací je v následujících podkapitolách.

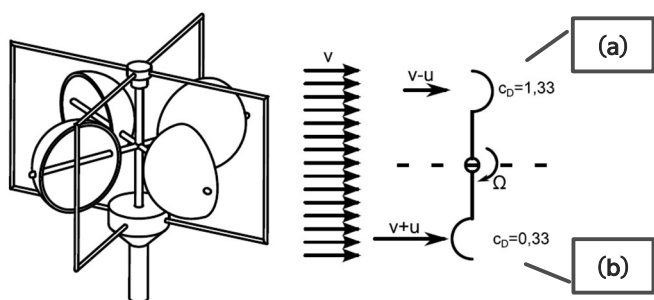
## 7.2.1.Savoniova VAWT

Savoniova větrná turbína (dále SVAWT) je nejjednodušší verzí VAWT, která ke své funkci využívá odporové složky aerodynamické síly (jedná se tedy o odporovou turbínu, drag type).

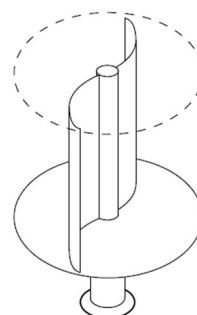
Principiálně funguje na rozdílném aerodynamickém odporu jednotlivých lopatek elektrárny.

Na obrázku č. 56 je zobrazena SVAWT využívající aerodynamického odporu (stejnou konfiguraci využívají například zařízení pro meteorologické měření rychlostí a směru větru tzv. anemometry). Sekce (a) má konvexní tvar, sekce (b) má konkávní tvar. Sekce (a) má větší aerodynamický odpor ( $C_D=1,33$ ). Na sekci (a) působí síla ve směru vektoru rychlosti  $\vec{v}$  (směr zleva do prava). Díky menšímu koeficientu odporu sekce (b) je odporová síla působící na sekci (b) (směr zleva do prava) menší než síla v sekci (a). Tento silový rozdíl na ramenech osy rotace vytváří kroutící moment, který zajišťuje roztočení elektrárny úhlovou rychlostí omega (na obrázku č. 56 označeno  $\Omega$ ).

Hlavní výhodou odporové turbíny je, že má vysoký startovací kroutící moment. Tento fakt je využitelný například v prostorech blízko nad povrchem (řádově v jednotkách metrů až desítkách metrů) ve kterých jsou často nízké rychlosti větru.



Obrázek 56: Princip funkce odporové turbíny [28]



Obrázek 57: Savoniova VAWT [28]

Na obrázku č. 57 je symbolický náčrt praktického technického řešení SVAWT. Průmyslová řešení těchto větrných turbín obvykle využívají složitějších tvarů lopatek.

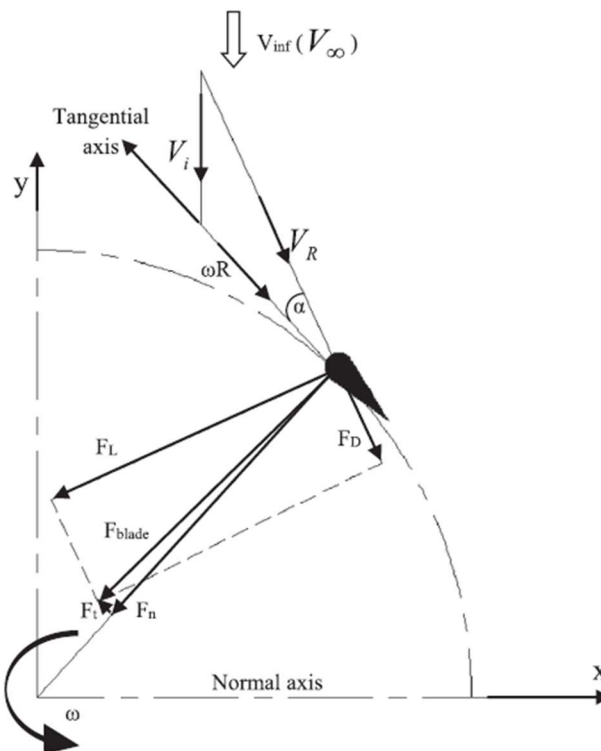
Tyto turbíny mají dvě hlavní výhody a to jednoduchost konstrukce a již zmíněný velký startovací kroutící moment.

Jediné odvětví, kde se tyto SVAWT využívají ve větším množství jsou například zdroje elektrické energie pro telekomunikační systémy v odlehlých oblastech nepřipojených k elektrické síti. Jednoduchost konstrukce zajišťuje spolehlivost celého systému, zároveň jsou SVAWT odolné vůči extrémním podmínkám v podobě vysokých rychlostí větru či nízkých/vysokých teplot (turbíny mohou být zhotoveny například z nerezových ocelí či hliníku, oproti kompozitům používaných u HAWT). Díky nízké účinnosti (viz kapitola 5) jsou tyto větrné turbíny nevhodné pro komerční využití v decentralizované energetice či jako zdroj elektrické energie o větších výkonech. SVAWT mají obvykle výkony v řádech stovek W.

## 7.2.2. Darrieova VAWT

Darrieova VAWT (dále DVAWT) je dalším více rozšířeným typem větrné turbíny s vertikální osou rotace. DVAWT využívají ke své funkci vztlakové složky aerodynamické síly (jedná se tedy o vztlakovou turbínu, lift type). DVAWT tedy funguje na stejném principu jako HAWT, vztlaková složka aerodynamické síly působící na lopatky vytváří silovou dvojici (krouťící moment), která uvádí rotor do pohybu a pohání generátor. Stejně jako u HAWT se lopatky skládají z leteckých profilů. Vzhledem k vertikální ose rotace se nemění relativní rychlost na lopatce (jako u HAWT) tudíž jsou lopatky tvořeny obvykle jedním profilem (nikoli skládáním jednotlivých profilů, které jsou vůči sobě vzájemně natočeny). Na obrázku č. 58 je zobrazen rychlostní a silový rozklad na lopatku v prvním kvadrantu.

Mezi vektorem relativní rychlosti a tětivou je úhel náběhu ( $\alpha$ ). Tento úhel náběhu se během rotace lopatky mění tzn., že se během otáčky mění  $C_L$ ,  $C_D$  koeficient (s čímž se zároveň mění odpovídající síly). Jak bylo zmíněné výše vztlaková složka aerodynamické síly vytváří silovou dvojici vůči ose rotace (počátek kartézského systému x-y).



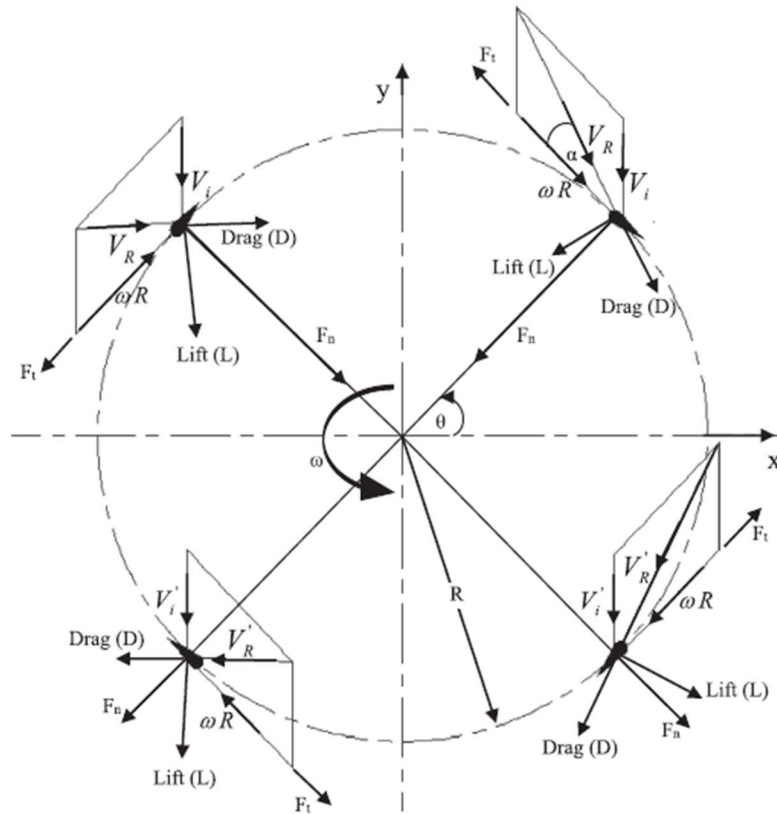
Obrázek 58: Rychlostní a silový rozklad na listu DVAWT [48]

Aerodynamickou sílu je možné rozložit do tečného a normálového směru, tento silový rozklad je důležitý z hlediska zatížení konstrukce (ložisek a hřídele) a pevnostního návrhu zařízení.

Z tohoto silového rozkladu a změny úhlu náběhu během rotace lopatky je možné vidět, že krouťící moment není konstantní během jedné otáčky stejně tak zatížení konstrukce není konstantní. Tento fakt způsobil odstup od DVAWT konfigurace na poli větších výkonů (ve prospěch HAWT). Nekonstantní zatížení v praxi způsobovalo nadměrné opotřebení komponent a nízkou životnost. Z tohoto důvodu jsou DVAWT vhodnější pro aplikace o menších výkonech, kde jsou nižší zatížení a může být naopak výhodou jednodušší konstrukce lopatek a menší počet komponent vůči HAWT.



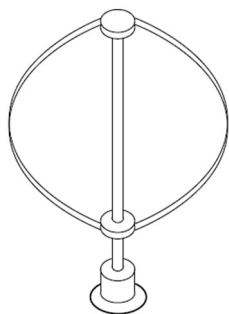
Obrázek č. 58 zobrazuje pouze jednu lopatku u skutečných DVAWT se používá větší počet lopatek, který zajišťuje větší kroučící moment. Zároveň větší množství lopatek způsobuje rovnoměrnější distribuci sil a kroučícího momentu do konstrukce. Obvykle se na DVAWT instaluje 3 až 5 lopatek. Obrázek č. 59 zobrazuje silový rozklad pro větší množství lopatek (4).



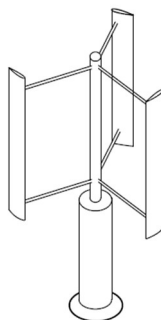
Obrázek 59: Silový rozklad pro DVAWT s více lopatkami [48]

Pro DVAWT konfiguraci existují další podtypy, které se liší v pojetí tvaru lopatek.

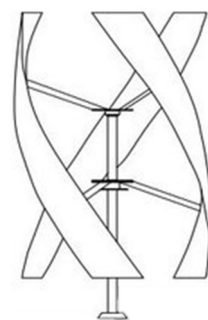
První z konfigurací je théta DVAWT (v cizí literatuře někdy nazývaná eggbeater VAWT), tato konfigurace má parabolický tvar lopatek, tato konfigurace DVAWT byla využívána během 80 let i ve větších výkonech (řádově jednotky MW či stovky kW) díky problémům se zatížením konstrukce (vysvětleno výše) bylo, ale ve větším spektru výkonů od tohoto typu ustoupeno. [49]



Obrázek 60: Théta-Darrieus VAWT [28]



Obrázek 61: H-Darrieus VAWT [28]



Obrázek 62: Gorlova VAWT [50]

Dalším typem je H-Darrieus konfigurace, tyto elektrárny využívají rovných lopatek (proto se někdy v odborné literatuře a vědeckých člancích používá i název SB-VAWT či S-VAWT, *straight blade VAWT*). Výhodou těchto turbín je jednodušší výroba lopatek. Tato konfigurace se obvykle používá ve výkonech o jednotkách až desítkách kW či stovek W. Větší jednoduchost lopatky dále umožňuje její úpravy jako přidávání slotů, klapek či nastavitelného vyklenutí profilu (*camber line*). Tyto možnosti jsou více popsány v následující části této kapitoly.

Posledním používanějším typem DVAWT je spirálová konfigurace (*helix shape VAWT*), tato konfigurace je častěji pojmenovávána po jejím vynálezci profesoru Gorlovovi, tedy Gorlova VAWT. Tato elektrárna má podobné lopatky jako S-VAWT jediným rozdílem je, že tyto lopatky jsou stočeny do spirály. Tato úprava tvaru umožňuje lepší rozložení sil a kroutícího momentu do konstrukce oproti S-VAWT a zároveň zvyšuje účinnost při vyšších hodnotách koeficientu rychloběžnosti rotoru.

Všechny druhy DVAWT mají špatné startovací vlastnosti (mají nízký startovací kroutící moment, *self-start*). Při roztáčení elektrárny je obvodová rychlost nulová nebo malá, to tedy znamená, že výsledná síla je závislá primárně na příchozí rychlosti větru, která může být taktéž malá (řádově 1-5 m/s).

Obě okolnosti zapříčiňují malou počáteční vztlakovou sílu působící na lopatky a tudíž malý počáteční kroutící moment, zároveň také záleží na okamžité poloze lopatek (jinak řečeno lopatky se mohou ve startovací pozici nacházet v aerodynamickém stallu). Tento problém je možné řešit buď externím pohonem, který pomůže roztočit elektrárnu na požadované otáčky a umožní následnou samostatnost ve výrobě elektřiny nebo je možné více optimalizovat aerodynamické vlastnosti rotoru, které umožňují zlepšení startovacích vlastností případně další navýšení celkové aerodynamické účinnosti rotoru DVAWT.

### 7.3. Možnosti aerodynamické optimalizace S-VAWT:

---

Aerodynamická optimalizace je důležitá z hlediska získávání maximálního aerodynamického výkonu či optimalizaci VT pro danou aplikaci (myšleno pro daný rychlostní profil ve kterém má elektrárna operovat). Na základě následující studie [49] jsou v této části kapitoly vybrány a vysvětleny důležité závěry týkající se návrhu rozměrů a dalších náležitostí týkající se lopatek S-VAWT. Je tak učiněno z důvodu vytvoření základní přehledu o možnostech volby rozměrů rotoru. Na základě těchto informací je navrhnout rotor malé S-VAWT v praktické části této práce.

#### 7.3.1. Volba profilu lopatek S-VAWT

---

Hlavní komponentou rotoru je lopatka, zvolený typ profilu lopatek výrazně ovlivňuje aerodynamický výkon. Prvotní výběr může usnadnit krátký výčet používaných profilů jako jsou: NACA0012 [51], NACA0015 [52], NACA4415 [53], NACA0018 [32], GOE420 [54], S1210 [55].

Relativní tloušťka profilu má velký vliv na poměr mezi vztakovým a odporovým koeficientem- $\kappa$  (např. z obrázku č. 58 je dobře vidět, že požadavkem je, aby byl tento poměr co největší, jelikož silová dvojice, kterou vyvolává odporová síla působí proti směru hnací dvojice vyvolané vztakovou silou).

Na obrázku č. 63 jsou zobrazeny hodnoty poměru  $\kappa$  pro symetrické profily o různých relativních tloušťkách (například  $RT=18\%$  pro NACA0018, viz kapitola 4.6, 4.6.1). Nejvyšších hodnot  $\kappa$  pro větší úhly náběhu (důležité s ohledem na měnící se úhel náběhu u S-VAWT během jedné otáčky) dosahují symetrické profily s  $RT$  mezi 15-18%.

Analogicky k obrázku č. 63 zobrazuje obrázek č. 64 hodnoty  $\kappa$  pro asymetrické profily, zároveň také zohledňuje relativní prohnutí profilu. V případě obrázku č. 64 je dobré si povšimnout, že rostoucí  $RC$  posouvá funkční hodnoty více vlevo (k záporným úhlům náběhu) a nižší hodnoty  $RT$  posouvají funkční hodnoty směrem nahoru (k vyšším dosahovaným hodnotám koeficientu  $\kappa$ ) a zároveň není  $\kappa$  nulová pro nulový úhel náběhu (prohnuté profily vytváří vztlak i při nulových úhlech náběhu, viz kapitola aerodynamiky, přesněji podkapitola 4.4).

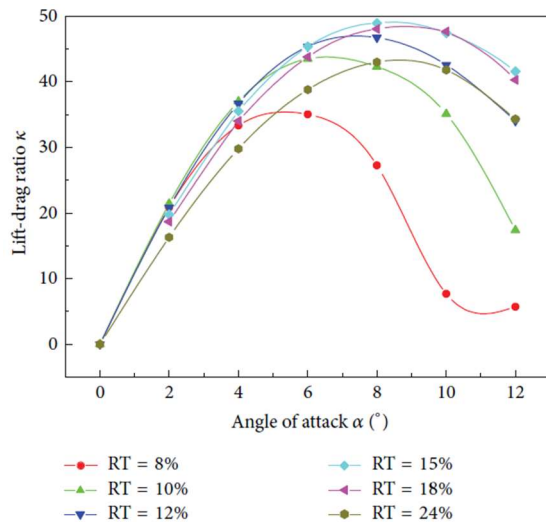
Při porovnání chování symetrických a asymetrických profilů je, možné vidět, že asymetrické profily zajišťují vyšší hodnoty  $\kappa$  při širším spektru úhlů náběhu. Tento předpoklad je důležitý při návrhu turbíny, která by měla mít dobré startovací vlastnosti. Díky širšímu spektru úhlů náběhu se zároveň snižuje pravděpodobnost toho, že bude elektrárna během rozběhu v pozici kdy budou lopatky v aerodynamickém stallu (viz kapitola 4.2.7). Tedy důležitým rozdílem mezi použitím symetrického či asymetrického profilu je v tom, že volba asymetrické profilu může zlepšit startovací vlastnosti S-VAWT (to je důležité z hlediska získaného výkonu při nízkých rychlostech větru).

Na druhou stranu použití symetrických profilů může zajistit hladší chod a přenos výkonu elektrárny vůči asymetrickým profilům.

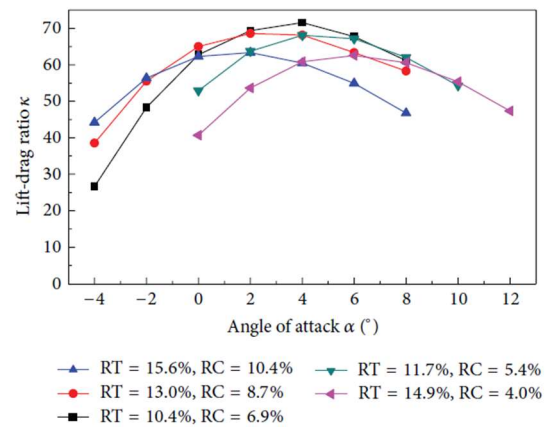
Zároveň je ale dobré zmínit, že symetrické NACA profily jsou vhodné pro vyšší  $Re$  a menší úhly náběhu. Což zároveň poukazuje na to, že jsou tyto profily neadekvátní pro použití na S-VAWT (i přesto je ale možné tyto profily používat). Z pohledu návrhu je tedy lepší použít profily přímo navržené pro VAWT či pro danou aplikaci, tento proces, ale vyžaduje

výzkum či experimenty, proto je z hlediska snížení ceny mnohdy výhodné využít méně vhodných NACA profilů.

Při využití asymetrických profilů je zároveň vhodné používat konfiguraci kdy konkávní strana profilu (viz. kapitola 4.6) směřuje ven (jinak řečeno směřuje od osy rotace k lopatkám)



Obrázek 63: Závislosti poměru  $C_L/C_D$  na relativní tloušťce profilu (RT) pro různé úhly náběhu pro symetrické profily [49]



Obrázek 64: Závislosti poměru  $C_L/C_D$  na relativní tloušťce profilu (RT) pro různé úhly náběhu pro asymetrické profily s různými tvary středící křivky [49]

Dalším faktorem ovlivňujícím aerodynamické vlastnosti je tvar náběžné a odtokové hrany. Studie na které je založený tento krátký přehled doporučuje větší rádius náběžové hrany pro S-VAWT (větší rádius zároveň snižuje závislost na drsnosti povrchu - může být výhodou z hlediska výroby). Dalším doporučením je použití ostrých odtokových hran (pokud to dostupná technologie výroby umožňuje).

Drsnost povrchu lopatky má sama o sobě taktěž vliv na aerodynamické charakteristiky rotoru. Náběžová hrana s nižší drsností pomáhá zachovat co nejsilnější laminární mezní vrstvu, která snižuje třecí odpor. Drsnější náběžová hrana, ale zároveň může přispět k oddálení odtržení při vyšších úhlech náběhu (díky rychlejšímu přechodu do turbulentní mezní vrstvy, viz kapitola aerodynamiky, přesněji podkapitoly 4.2.7 a 4.2.5). Tato problematika je zároveň vysoce závislá na druhu použitého profilu, velikosti Re a dalších faktorech. Proto nejsou konkrétní závěry dále rozvíjeny. Je ale možné konstatovat, že s ohledem na funkci S-VAWT v reálném provozu kdy je požadována co nejnižší závislost maximálního vztlaku na drsnosti povrchu (díky možnému znečištění lopatek) není další výzkum vlivu drsnosti povrchu lopatek zanedbatelný.

### 7.3.2. Konfigurace rotoru

Dalším faktorem hrajícím roli ve snaze dosažení maximálních aerodynamických výkonů je vhodná volba rozměrů, počtu lopatek a poloměru rotace.

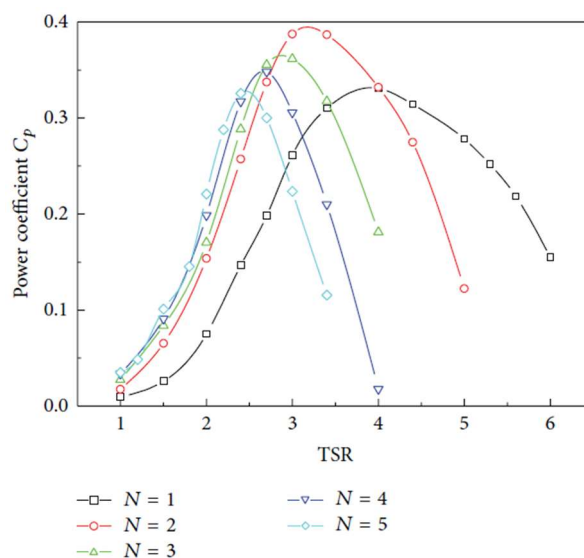
Parametrem souvisejícím s celkovou velikostí rotoru je hustota lopatkové mříže (značeno  $\sigma$ ,  $\sigma_{\text{rotoru}}$ ).

$$\sigma_{\text{rotoru VAWT}} = \frac{n \cdot c \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot h} = \frac{n \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot R} [1, \%] \quad (27)$$

Obecně jsou vyšší hodnoty  $\sigma$  vhodnější pro nižší hodnoty koeficientu rychloběžnosti (menší rychlosti větru a otáčky). Vyšší  $\sigma$  zároveň zlepšuje startovací vlastnosti rotoru. Vyšší  $\sigma$  zároveň, ale snižuje maximální dosažitelné hodnoty aerodynamické účinnosti a zpříčiňuje užší operační rozsah. Rotory s nižší  $\sigma$  mají tedy vyšší maximální hodnoty  $C_p$  a širší operační rozsah.

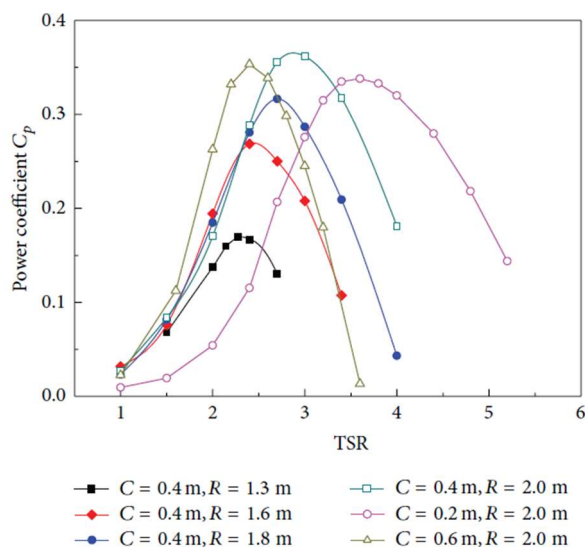
*Operační rozsah- rozsah hodnot koeficientu rychloběžnosti, kdy elektrárna produkuje vyšší výkony.*

S hodnotou  $\sigma$  souvisí zvolený počet lopatek. Na obrázku č. 65 jsou průběhy koeficientu výkonu v závislosti na  $\lambda$  pro různé počty lopatek. Nejvyšších hodnot účinnosti dosahují dvě lopatky ty jsou, ale z konstrukčního a praktického hlediska v reálných podmínkách nevhodné. Druhou volbou jsou tři případně čtyři lopatky. Čtyři lopatky dosahují vyšších účinností při nižších hodnotách koeficientu rychloběžnosti, ale oproti třem lopatkách výrazně klesá účinnost při vyšších hodnotách  $\lambda$ . Tři lopatky proto mohou být dobrým kompromisem pro počáteční fázi volby konfigurace rotoru.



Obrázek 65: Závislost aerodynamické účinnosti na koeficientu rychloběžnosti a počtu lopatek [49]

Dále je z hlediska návrh rotoru důležitý poměr mezi délkou tělivity profilu a poloměrem rotace  $c/R$ . Na základě studií je doporučeno volit tento poměr v rozsahu hodnot mezi 0,1 až 0,4.

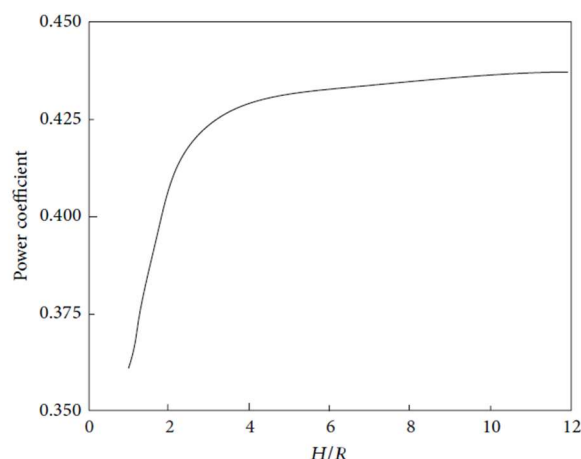


Obrázek 66: Závislost aerodynamické účinnosti na poměru  $c/R$  [49]

Na obrázku č. 66 jsou zobrazeny závislosti výkonového koeficientu na  $\lambda$  pro různé poměry  $c/R$ . Z jednotlivých funkčních hodnot je vidět, že pro délku tětiny lopatek  $c=0,4$  m je počáteční trend přibližně shodný a rozdíly začínají být patrné až při vyšších hodnotách koeficientu rychloběžnosti. Při srovnání poměru  $0,4/2$  (označeno tyrkysovou barvou) a poměru  $0,4/1,3$  (černá barva) je vidět, že při navyšování  $\lambda$  začíná docházet k výrazným rozdílům v maximálních hodnotách aerodynamické účinnosti. Při návrhu rozměrů rotorů je tedy vhodné využívat nižších poměrů  $c/R$ . Zároveň je vhodné poukázat na rozdíl mezi průběhem označeným olivovou barvou a průběhem označeným černou barvou, oba průměry mají podobné hodnoty poměru  $c/R \sim 0,3$ . Větší rozměry tětiny a poloměru pro průběh označený olivovou barvou, ale zapříčiňují dosahování větší hodnoty  $Re$ . Vyšší hodnota  $Re$  zapříčiňuje posun směrem k turbulentnímu proudění a další složitější aerodynamické jevy vedoucí k nárůstu výkonu (nastíněno v kapitole 4.2.4, 4.2.7).

Tato doporučení však není možné považovat za pravidla, vždy bude záležet na konkrétní konfiguraci rotoru a svoji roli může hrát vícero faktorů. Minimálně je ale možné sumarizovat, že pokles poměru  $c/R$  rozšiřuje operační rozsah.

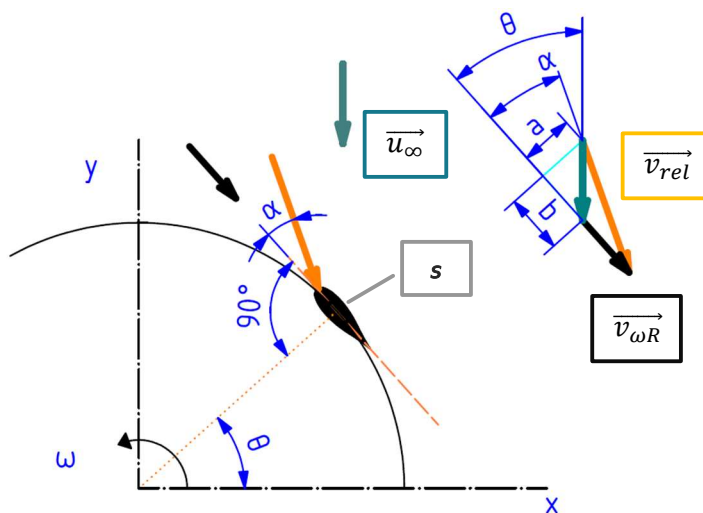
Dalším důležitým poměrem je poměr mezi výškou lopatky a poloměrem rotace ( $h/R$ ). Na obrázku č. 67 je závislost výkonového koeficientu na  $\lambda$  pro různé hodnoty poměru  $h/R$ . Z této závislosti je možné vidět, že přibližně od hodnoty  $h/R=6$  a více se trend výrazněji nemění. Tento jev je způsoben tím, že s rostoucí výškou lopatky mají menší vliv 3D efekty spojené s obtékáním lopatek (proudění kolem lopatky se blíží více k 2D proudění - snižuje se např. indukovaný odpor způsobený přesunem vzduchu z přetlakové strany do podtlakové na konci lopatky, podrobněji popsáno v kapitole 4.5).



Obrázek 67: Závislost aerodynamické účinnosti na poměru  $h/R$  [49]

Další alternativou je úprava úhlu náběhu lopatky pomocí nastavení lopatky nenulovým úhlem natočení  $\beta$ . Pro lepší představu změn úhlu natočení je dobré podrobněji popsat geometrii rychlostního rozkladu pro DVAWT (S-VAWT).

Na obrázku č. 68 je nejprve proveden rychlostní rozklad pro S-VAWT s nulovým úhlem natočení. Pro popis polohy bodu  $s$  byl použit úhel  $\theta$  (bod  $s$  určuje polohu profilu, azimut lopatky). Pointou následujícího odvození je vyjádření úhlu náběhu  $\alpha$  jako funkce úhlu polohy  $\theta$ .



Obrázek 68: Rychlostní rozklad pro DVAWT [56]

Ve vektorovém součtu rychlosti příchozího větru a obvodové příchozí rychlosti byly doplněny obecné rozměry  $(a)$ ,  $(b)$ . Z podobnosti trojúhelníku a trigonometrických funkcí je dále odvozeno:

$$\sin(\theta) = \frac{a}{u_{\infty}} \quad (28)$$

$$\cos(\theta) = \frac{b}{u_{\infty}} \quad (29)$$

$$tg(\alpha) = \frac{a}{b + v_{\omega R}} = \frac{\sin(\theta) \cdot u_{\infty}}{\cos(\theta) \cdot u_{\infty} + v_{\omega R}} = \frac{u_{\infty} \cdot \sin(\theta)}{u_{\infty} \cdot \left[ \cos(\theta) + \frac{v_{\omega R}}{u_{\infty}} \right]} = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta) + \lambda} \quad (30)$$

Jelikož je obvodová rychlost z obecného hlediska funkcí polohy  $\theta$  je ve výsledné rovnici  $\lambda$  nahrazeno symbolem  $\lambda_{\theta}$  ( $\lambda_{\theta}=f(\theta)$ ).

$$tg(\alpha) = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta) + \lambda_{\theta}} \quad (31)$$

Tato rovnice slouží k určení úhlu náběhu  $\alpha$  pro S-VAWT. Úhel  $\alpha$  je zároveň úhlem relativní rychlosti vůči tečně kružnice v bodě  $s$ , kterou vytíná lopatka svojí rotací kolem počátku souřadnicového systému  $x$ - $y$ . Pro zopakování: tento vztah je platný pro S-VAWT s nenatočeným profilem tzn. úhel mezi tětivou profilu a tečnou ke kružnici v bodě  $s$  je  $0^{\circ}$  ( $\beta=0^{\circ}$ ).

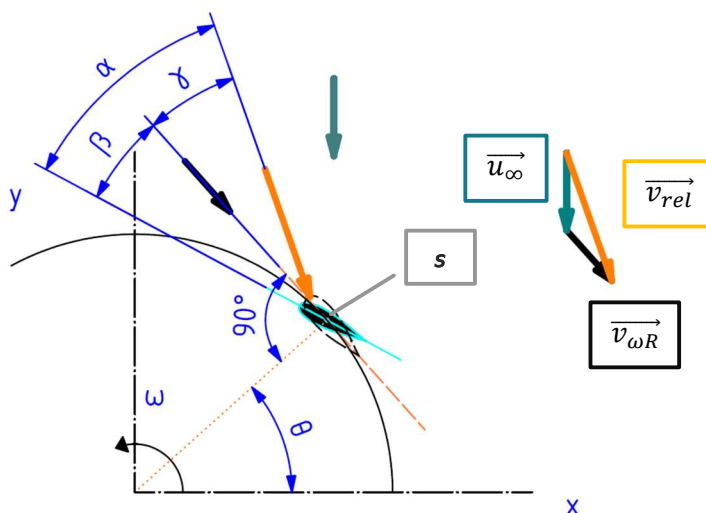
Natáčením profilu vůči bodu  $s$  se začne upravovat výše zmíněný úhel natočení (tzn. úhel mezi tětivou profilu a tečnou ke kružnici v bodě  $s$  již není  $0^{\circ}$ ).

Z toho důvodu je zaveden lokální úhel přítoku  $\gamma_{\theta}$ . Tento úhel je definovaný následujícím vztahem:

$$\alpha = \gamma_{\theta} + \beta \quad (32)$$

Jelikož je úhel lokálního přítoku definovaný jako úhel mezi tečnou na kružnici v bodě  $s$  a relativní rychlostí větru platí pro něj analogický vztah jako pro S-VAWT s nulovým natočením profilu.

$$tg(\gamma_{\theta}) = \frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta) + \lambda_{\theta}} \quad (33)$$

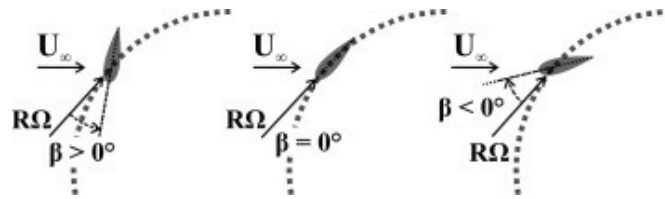


Obrázek 69: Rychlostní rozklad pro DVAWT s nenulovým úhlem náběhu [57]

Na obrázku č. 69 je zobrazena konfigurace, kdy je úhel  $\beta$  kladný. Pro lepší názornost jsou na obrázku č. 70 zobrazeny všechny možné konfigurace úhlu  $\beta$ .

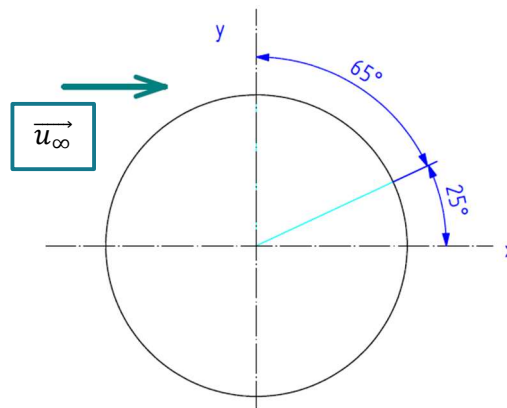


Při znalosti konvence používané geometrie je možné se přesunout k výsledkům souvisejících s úpravou úhlu natočení.



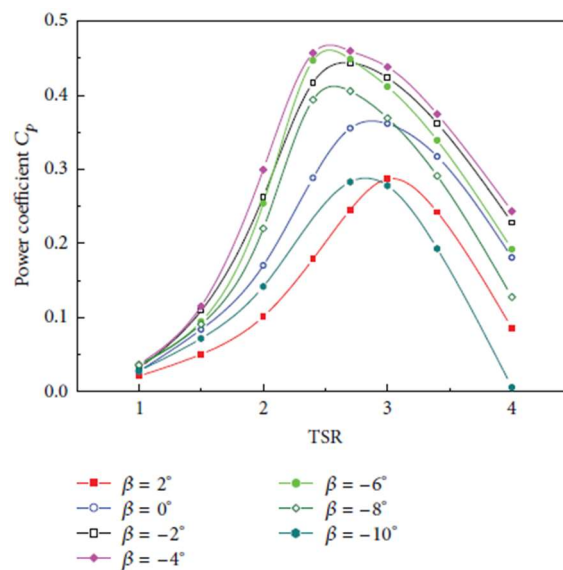
Obrázek 70: Porovnání jednotlivých úhlů dopadu  $\beta$  [57]

Následující studie [57] došla k tomu, že pro profil NACA0015 došlo k nárůstu kroutícího momentu oproti nulovému úhlu natočení v následujících rozsazích: pro  $\beta > 0$  mezi  $25^\circ$  až  $90^\circ$ , pro  $\beta < 0$  mezi  $90^\circ$  až  $360^\circ$  a mezi  $0^\circ$  až  $25^\circ$  (použitý souřadnicový systém je na obrázku č. 71). Z tohoto výsledku je vidět, že větší podíl na nárůstu výkonu má záporný úhel natočení. Pro podmínky zadané studií byl ideálním úhlem  $\beta = -2^\circ$ .



Obrázek 71: Souřadnicový systém použitý ve vyhodnocení výsledků studie [57]

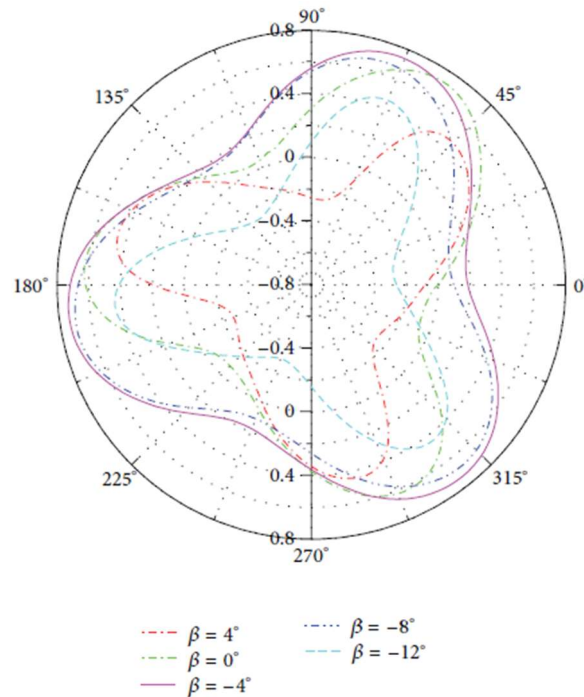
Studie využitá k posouzení předešlých možností aerodynamické optimalizace rotoru [49] došla k výsledkům na obrázku č. 72.



Obrázek 72: Závislosti aerodynamické účinnosti na různých úhlech natočení [49]

Nejvyšších hodnot aerodynamické účinnosti dosahovala konfigurace rotoru s úhlem natočení  $\beta = -4^\circ$ . Oproti nulovému úhlu natočení (označeno modře) je zároveň vidět, že kromě navýšení maximální aerodynamické účinnosti dochází i k výraznému rozšíření rozsahu hodnot koeficientu rychloběžnosti pro účinnosti přesahující hodnotu 0,35.

Na obrázku č. 73 je vidět průběh okamžitého koeficientu výkonu pro jednotlivé polohy lopatek. Nejzajímavější je porovnání úhlu natočení  $\beta = -4^\circ$  a  $\beta = 0^\circ$ . Záporný úhel natočení poskytuje výrazně větší účinnosti v celém spektru jedné otáčky.



Obrázek 73: Okamžitá účinnost při různých úhlech polohy [49]

Úprava úhlu natočení lopatek může tedy mít výrazný vliv nejenom na maximální hodnoty aerodynamické účinnosti, ale i na distribuci výkonu v průběhu otáčky a tedy i menší skoky v jeho přenosu do konstrukce elektrárny.

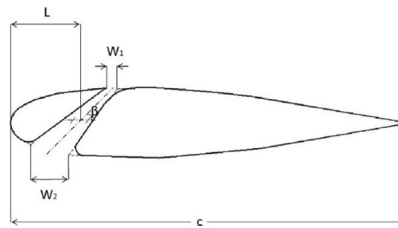
*Z pohledu aerodynamické optimalizace rotoru S-VAWT je, ale důležité zmínit že předchozí závěry je možné brát pouze jako doporučení pro usnadnění počátečního návrhu rotoru. Zároveň je potřeba zmínit, že výsledky jsou vždy uvedeny pouze jako závislosti jednoho typu změn (např. naposledy zmíněné srovnání účinnosti pro různé úhly natočení lopatek) ve skutečnosti se ale na celkové účinnosti podílejí všechny úpravy zároveň. Proto je potřeba provádět optimalizaci a ověřovat podíl jednotlivých změn na výsledné účinnosti pro konkrétní podmínky experimentu/návrhu.*

Tento základní přehled zároveň poukazuje na složitost aerodynamického návrhu rotoru a nespočet kombinací jednotlivých úprav, které mohou mít vliv na výslednou účinnost S-VAWT.

### 7.3.3. Další alternativy vylepšení aerodynamických vlastností

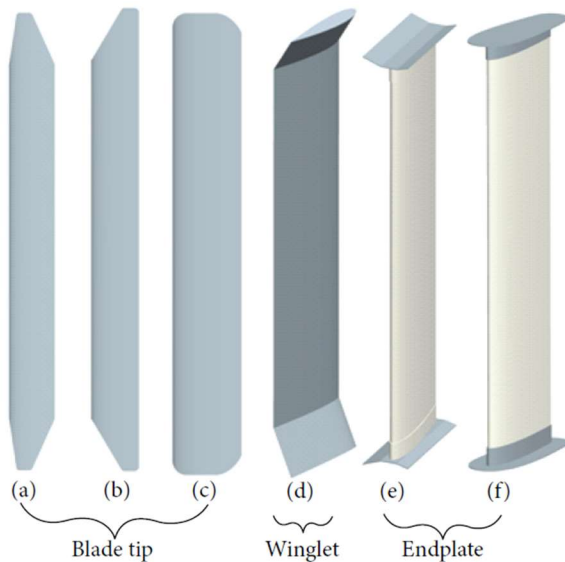
První možností je využití natáčecích mechanismů u DVAWT. Natáčecí mechanismus upravuje úhly natočení pro získání maximálních hodnot kroutícího momentu v celém spektru poloh lopatek, zajišťuje tím úhly náběhu zajišťující maximální hodnoty  $C_L$ . Tato regulace zároveň využívá závěrů z předešlých odstavců věnujících se vlivu úhlu natočení. Využívání natáčecích mechanismů je tedy stejným mechanismem regulace jako v případě změny úhlu náběhu natáčením listů u HAWT.

Dalšími možnostmi je úprava profilů lopatek VAWT. Lopatky mohou mít například přidané sloty (viz kapitola 4.4). Dále je možné použít měnitelné geometrie odtokové hrany či celé střednice profilu.



Obrázek 74: Profil lopatky VAWT se slotem [58]

Úprava zakončení lopatek může hrát taktéž svoji roli. Prakticky je možné upravovat tvar konce lopatek (blade tip) nebo na konce lopatek přidávat tzv. winglety či koncové desky (endplates). Tyto úpravy se zaměřují na snížení indukovaného odporu, kterou zapříčiňují koncové víry (viz kapitola 4.5).



Obrázek 75: Možnosti úprav konců lopatek S-VAWT [49]



Obrázek 76: Kombinovaná VAWT (SVAWT+DVAWT) [50]

Dále je možné kombinovat odporové a vztlakové VAWT do jedné hybridní VAWT. Častou kombinací je S-VAWT s nainstalovanou menší SVAWT na centrálním hřídeli. SVAWT napomáhá k roztočení kombinované VAWT při nižších rychlostech větru a S-VAWT zajišťuje vyšší hodnoty výkonu při dosažení vyšších otáček a využívá své vyšší účinnosti při větších hodnotách koeficientu rychloběžnosti (při vyšších otáčkách rotoru).

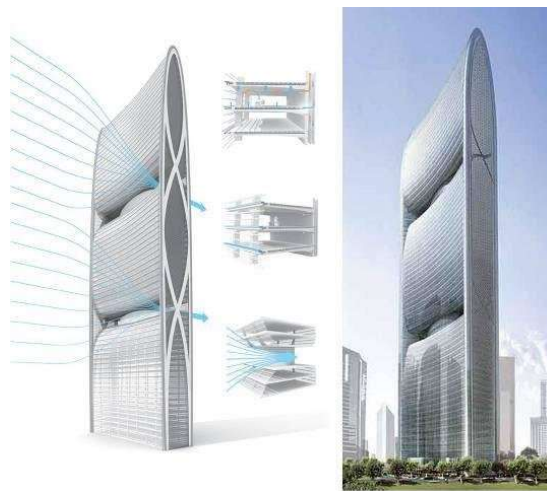
## 7.4. Instalace VAWT

S ohledem na nižší výkony ve kterých se pohybují VAWT se pojí i rozdílné sektory jejich využití a instalace. VAWT jsou v mnoha ohledech lepší platformou (při uvažování podobného výkonu s HAWT) pro decentralizovanou energetiku. Oproti ONS a OFFS farmám o vysokých výkonech, kde se využívají HAWT je často možné VAWT lépe implementovat přímo do rezidenčních oblastí či do jejich blízkého okolí.

První z možností instalace VAWT je jejich umístění na střechy budov. Případně je možné využít sofistikovanějších systémů integrace VAWT přímo do budov.



Obrázek 77: 24 SVAWT umístěných na střeše budovy Oklahoma medical research foundation v Oklahomě, USA [59]



Obrázek 78: SVAWT umístěné do průduch skrz mrakodrap Pearl River Tower v Guangzhou, Čína [60]

Další možností je využití VAWT jako zdroje elektřiny v odlehlých oblastech bez přístupu k elektrické síti (tzv. OFF-grid zapojení). Podobným řešením je využití VAWT jako zdroje energie pro pouliční lampy.



Obrázek 79: SVAWT jako zdroj energie pro telekomunikační věž [61]



Obrázek 80: SVAWT jako zdroj energie pro pouliční lampy [61]

VAWT mají zároveň svoje využití v decentralizované energetice podobně jako HAWT o menších výkonech. V tomto případě je výhodou VAWT jejich jednodušší konstrukce a snadnější příprava základů oproti HAWT. Vertikální konfigurace rotoru VAWT a s ní související menší rozměry umožňují snazší implementaci přímo do zemědělské půdy či jejího okolí.

Podobně jako HAWT je možné využít instalace VAWT v OFFS farmách (VAWT by měly řádově menší výkony oproti HAWT díky problematice týkající se zatížení konstrukce podrobněji popsané v předešlých částech kapitoly). Následující studie [39] zároveň poukazuje na možnost využití optimalizace rozestavení VAWT do větrné farmy pro zvýšení jejich celkové účinnosti. U VAWT může být navýšena jejich účinnost při vhodném rozmístění jednotlivých turbín do větší blízkosti v kontrastu s HAWT, kde je potřeba vzdálenost mezi HAWT zvětšovat kvůli negativnímu vlivu překrytí jednotlivých elektráren.

Zmíněná studie dosáhla maximálního navýšení výkonu 15 % při vzdálenosti  $3xD$  mezi jednotlivými elektrárnami a sklonem  $60^\circ$  mezi vektorem směru větru a spojnicí středu elektráren a stejným směrem rotace jednotlivých elektráren. Další informace je možné najít přímo v samotné studii.

Tyto výsledky mohou pomoci k rozšíření VAWT konfigurace i na poli OFFS větrné energetiky. V porovnání s OFFS farmami využívajícími HAWT elektrárny by mohly VAWT farmy zaujmout roli decentralizovaného zdroje menších výkonů pro odlehlé oblasti nacházející se u pobřeží nebo menší ostrovy. VAWT si zároveň stále zachovávají výhody jednodušší konstrukce a menšího množství komponent ze kterého se skládají což může snížit cenu OFFS VAWT farem a zlevnit budoucí náklady spojené s údržbou. Díky svým menším rozměrům jsou zároveň vhodné pro instalaci na plovoucí základy, které taktéž zlevní instalaci farem.



Obrázek 81: Koncept OFFS farmy s využitím S-VAWT elektráren [39]

## 7.5. Souhrn komerčně dostupných VAWT

Tabulka 2: Souhrn komerčně dostupných VAWT nižších výkonů vhodných pro využití v decentralizované energetice a k instalaci na střechy budov

Výrobce	Typ	Model	Výkon (W)	kWh/rok	Plocha (m <sup>2</sup> )	Výška/šířka (rotor) (m)	Cut-in rychlost (m/s)	Cut-off rychlost (m/s)	Hlučnost
UGE [62]	Gorlov	Hoyi 300	300	-	0,91	1,4/0,8	2,5	30	40 dB (12 m/s)
UGE [62]	Gorlov	VisionAir <sup>3</sup>	1500	2250 (8 m/s)	5,76	3,2/1,8	3	20	41 dB
Windside [63]	Savonius	WS-0,60 City		40 až 400 (podle podmínek)	0,6	2/0,34	-	-	0 dB (ve vzd. 2 m)
SAWT [64]	S-VAWT	P1000-AB	1000	3700 (8 m/s)	-	2/1,8 (+výška věže-5,5m)	2,5	25	-
AEOLOS [65]	S-VAWT	Aeolos-V 1kW	1000	-	-	2/2,8	1,5	30	45 dB
HIVAWT [66]	Darrieus+Savonius	DS-1500	1500	-	-	3/2,8 +(výška věže 4 m)	Pod 3	15	-

Předešlá kapitola ve zkratce popisovala možnosti instalace VAWT v decentralizované energetice. Tabulka č. 4 obsahuje krátký výčet průmyslově vyráběných VAWT malých výkonů vhodných pro instalaci na střechy či pro přímou implementaci do budov nebo pro instalaci do blízkosti infrastruktury. Tabulka je rozdělena do sekcí rozdělujících turbíny dle parametrů důležitých pro jejich výběr. Nejprve je zmíněn jmenovitý výkon a vyrobená energie při předepsané rychlosti větru za jeden rok (pokud je k dispozici). Dále obsahuje rozměry VAWT, náběhovou rychlost a odstavnou rychlost a hlučnost jednotlivých VAWT. Tento základní výčet výrobců a jednotlivých VAWT elektráren může usnadnit prvotní rozhodování při výběru vhodné elektrárny pro dané podmínky.

Obecně je ale možné poukázat na fakt, že u výběru VAWT malých výkonů je faktorem, který rozhodne o vhodnosti či nevhodnosti její instalace, průměrná rychlost větru. S ohledem na nízké povětrnostní profily poblíž infrastruktury například v České republice je většina VAWT, které nabízí trh nevhodná. Zmíněné náběhové rychlosti totiž neznačí rychlost při, které dosahuje elektrárna jmenovitého výkonu, ale pouze rychlost při které začíná VAWT generovat výkon. U většiny elektráren na trhu je jmenovitých hodnot výkonu dosaženo při 10-15 m/s. Tyto hodnoty průměrných rychlostí větru jsou, ale ve výškách mezi 5-15 m velmi vzácné (výška ve, které je předpokládána instalace menších VAWT). Tento fakt staví malé větrné elektrárny do minoritní pozice z hlediska trhu se zdroji energie vhodnými pro decentralizovanou energetiku. Hlavně v porovnání s běžně instalovanou fotovoltaikou.

## **8. Nekonvenční modifikace větrných turbín**

---

Větrné turbíny zmíněné v předešlých kapitolách je možné používat v méně konvenčních konstrukčních řešeních. Základní přehled možných úprav je v následující podkapitole. Výběr variant byl volen s ohledem na konfigurace, které umožňují navýšení výkonu v aplikacích týkajících se decentralizované energetiky.

### **8.1. Větrné turbíny s difuzorem (diffuser-augmented wind turbines, DAWT)**

---

Jednou z možností navýšení výkonu HAWT je umístění rotoru do difuzoru. Difuzor vytváří za turbínou vírovou oblast, která snižuje tlak za rotorem. Snižování tlaku za rotorem navyšuje celkový průtok (zvýšení rychlosti větru) difuzorem.

Použití difuzoru může navýšit získaný výkon 2-5 násobně oproti stejné HAWT bez difuzoru (toto navýšení je výrazné i při nižších rychlostech větru, řádově 5-10 m/s). Difuzor může zároveň sloužit jako zařízení, které zajišťuje natáčení rotoru turbíny ve směru větru. Difuzor zároveň snižuje úroveň hluku.

Difuzor je s ohledem na výrobní náklady a konstrukční řešení vhodný pro HAWT menších výkonů (řádově jednotky až desítky kW). DAWT je tedy řešením vhodným pro menší aplikace v decentralizované energetice. Více informací je možné najít v následujících studiích: [67], [68].

### **8.2. Větrné turbíny s více rotory (multi-rotor wind turbines)**

---

Navyšování výkonu větrných turbín zvětšováním rozměrů rotoru se postupně dostává na své limity z hlediska pevnostního namáhání listů. Jedním z možných řešení tohoto problému je využití více rotorových turbín. Použití více rotorů umožňuje snížení pevnostního namáhání a snížení nákladů na výrobu jednotlivých listů.

Více-rotorové turbíny poskytují i některé výhody z hlediska nárůstu výkonu či možnosti rozmístění jednotlivých elektráren do větší blízkosti ve větrných farmách. Hlavní nevýhodou více-rotorové konfigurace je navýšení množství komponent a s nimi pojící se náročnější údržba celého zařízení. Zároveň tato konfigurace vyžaduje komplexnější konstrukční řešení věže.

Podrobnější informace týkající se problematiky navýšení výkonu, výhod a nevýhod více-rotorových turbín je možné získat v následující studii: [69].

### **8.3. Vznášející se větrná turbína (Buoyant Air turbine, BAT)**

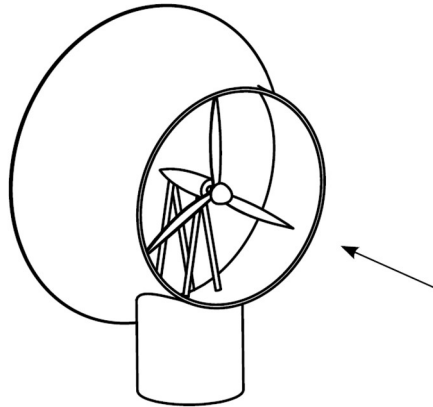
---

V kapitole 2.2 byla zmíněna důležitost volby vhodné lokace pro instalaci větrné elektrárny. Volba lokace je svázána primárně s hodnotami průměrné rychlosti větru. Velké množství oblastí nedosahuje dostatečných průměrných rychlostí větru ve výškách 15-50 m, ve kterých se obvykle nacházejí rotory turbín menších výkonů.

Jedním z možných řešení tohoto problému je umístění větrné turbíny do vznášejícího se prstence připevněného k zemi. Vznášející prstenec může být umístěn do výšek, které jsou z pohledu konvenčních věží nedosažitelné. Řádově se jedná o výšky mezi 300-600m. Zároveň je možné navýšením lana optimalizovat výšku, ve které turbína operuje a



optimalizovat tak maximální dosažitelný výkon (rychlostní profil se například mění během noci/dne). Toto řešení je výhodnou alternativou pro odlehlejší oblasti či OFF-grid aplikace [70].



Obrázek 82: DAWT, větrná turbína s difuzorem [71]



Obrázek 83: Větrná turbína s více rotory od firmy VESTAS [69]



Obrázek 84: Vznášející se větrná turbína [70]



## 9. Praktická část-návrh S-VAWT malého výkonu určené pro experimentální testování vlastností rotoru v aerodynamickém tunelu

Cílem praktické části této práce je na základě přehledu technického řešení větrných elektráren v teoretické části práce navrhnout univerzální VAWT malého výkonu vhodnou pro provádění experimentálních měření v aerodynamickém tunelu. Takto navrhnutá VAWT bude nadále sloužit pro experimentální ověřování vlivu různých konfigurací rotoru na aerodynamickou účinnost v daném spektru testovacích rychlostí.

Navrhnutá VAWT může zároveň v budoucnu sloužit pro verifikaci výsledků numerickým modelů případně pro „upscaling“ vedoucí k návrhu prototypu VAWT o vyšším výkonu vhodné pro testování v reálných podmínkách.

### 9.1. Vstupní hodnoty a požadavky na technický návrh

- rozměry aerodynamického tunelu
- rychlostní rozsah 0-10 m/s
- typ elektrárny S-VAWT
- požadavek na vyměnitelnost lopatek a univerzalitu výsledného návrhu
- předpoklad výroby lopatek za pomoci 3D tisku z plastu a zbytku komponent za pomoci konvenčních technologií třískovým obráběním (při využití běžně dostupných polotovarů)
- použití normalizovaných strojních součástí

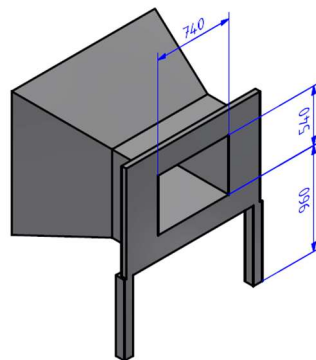
### 9.2. Návrh rozměrů a konfigurace rotoru

Na základě výstupů z teoretické části práce, dostupných experimentálních studií a rozměrů větrného tunelu je proveden návrh rozměrů a konfigurace rotoru a odhadnut rozsah otáček VAWT během měření ve větrném tunelu a posouzena potřeba zařazení převodového ústrojí.

Výsledky předběžného návrhu jsou následně použity pro konkrétní konstrukční návrh S-VAWT.

#### 9.2.1. Parametry aerodynamického tunelu

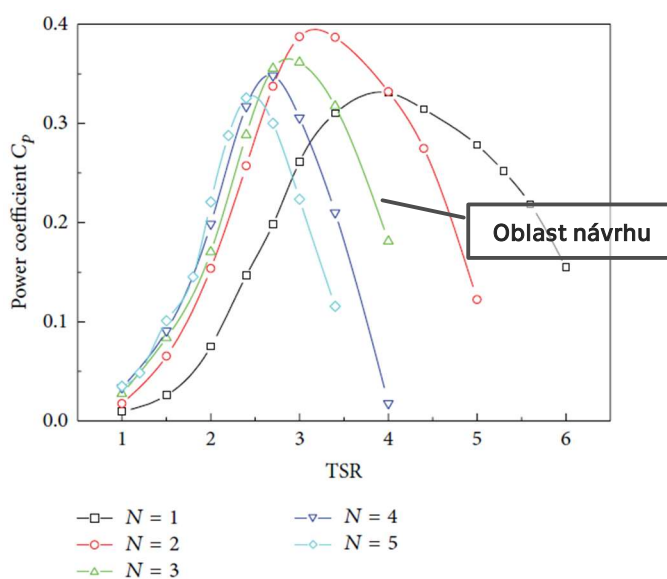
Vybraný tunel, ve kterém by měla probíhat experimentální měření má rozměry zakótované na obrázku č. 85. Maximální dosažitelná rychlost je 20 m/s. Zvolený tunel není uzavřený což je výhodné z pohledu instalace navržené S-VAWT do měřicí polohy.



Obrázek 85: Rozměry větrného tunelu [mm]

## 9.2.2. Volba počtu lopatek

Na základě obrázku č. 65 (86) jsou pro tento návrh vhodné 3 (zelený průběh) nebo 4 lopatky (tmavě modrý průběh). 4 lopatky mohou poskytnout lepší startovací vlastnosti a vyšší výkon při nižších rychlostech větru. Zároveň ale snižují operační rozsah a mohou mít velký vliv na celkovou účinnost. Zároveň u rotoru se 4 lopatkami dochází k výraznějšímu překrývání lopatek během jedné otáčky-efekty překrytí mohou taktéž snížit celkovou účinnost (tyto efekty jsou zároveň výraznější u rotorů menších rozměrů). Z těchto důvodů není rotor se 4 lopatkami příliš vhodnou konfigurací a je upřednostněna alternativa se 3 lopatkami. 3 lopatky dosahují na základě obrázku č. 28 vyšších účinností a zároveň poskytují širší operační rozsah, jsou proto vhodnou volbou pro první návrh S-VAWT.[49]



Obrázek 86: Zvýraznění oblasti návrhu, volba počtu lopatek (obr. č.65), [49]

## 9.2.3. Volba výšky lopatky (h)

Výška větrného tunelu je 540 mm. S ohledem na měření není vhodné využít celou výšku tunelu, ale ponechat prostor mezi stěnami tunelu a testovaným objektem. Ponecháním prostoru mezi konci lopatek a stěnou tunelu dojde během měření k zachování lepších vlastností proudu vzduchu jelikož směrem od stěn větrného tunelu je proudění méně ovlivněno jevy spojenými s obtékáním jeho stěn.

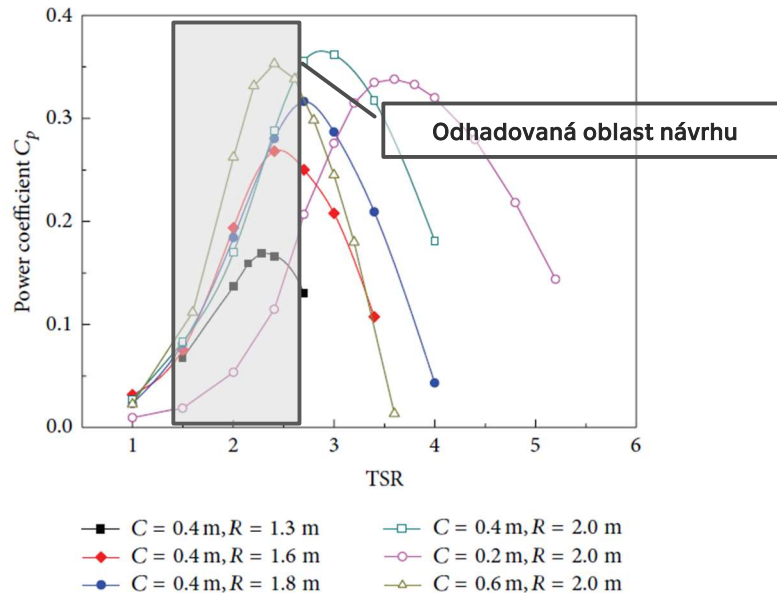
Odsazení od horizontálních stěn je voleno minimálně 50 mm. Zvolená výška lopatek je:  $h=350$  mm. Zároveň je předpokládáno vycentrování rotoru vůči větrnému tunelu tudíž je mezi rotorem a horizontálními stěnami tunelu na obou stranách 95 mm prostor, který by měl přibližně zajistit, že se celá elektrárna nachází v ustáleném proudu vzduchu.

## 9.2.4. Volba poloměru rotace lopatek (R)

Poloměr rotace je volen taktéž s ohledem na rozměry tunelu a je uvažováno ponechání dostatečného prostoru mezi vertikálními stěnami tunelu a lopatkami. Zároveň je poloměr volen s ohledem na tuhost rotoru. Je tedy snahou, aby nebyly vzpěry lopatek příliš dlouhé (málo tuhé). Zvolený poloměr lopatky je  $R=200$  mm. Vzdálenost od vertikálních stěn je tedy 170 mm na každé straně.

## 9.2.5. Volba délky tětiny profilu lopatky (c)

Délka tětiny je volena s ohledem na doporučený interval poměrů  $c/R < 0,1-0,4 >$  z obrázku č. 66 (87). Zvolená délka tětiny lopatky je:  $c=75$  mm. Malé celkové rozměry posouvají předpokládanou oblast maximálních hodnot výkonového koeficientu v závislosti na koeficientu rychloběžnosti více vlevo (obr. č. 87).



Obrázek 87: Zvýraznění oblasti návrhu, volba poměru  $c/R$  (obr. č. 66), [49]

## 9.2.6. Výpočet rozměrových poměrů rotoru navrhované S-VAWT

Poměr  $c/R$ :

$$\frac{c}{R} = \frac{75}{200} = 0,375 \quad (34)$$

Poměr  $h/R$ :

$$\frac{h}{R} = \frac{350}{200} = 1,75 \quad (35)$$

$\sigma$  rotoru:

$$\sigma_{rotoru S-VAWT} = \frac{n \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot R} = \frac{3 \cdot 75}{2 \cdot \pi \cdot 200} = 0,179 \quad (36)$$

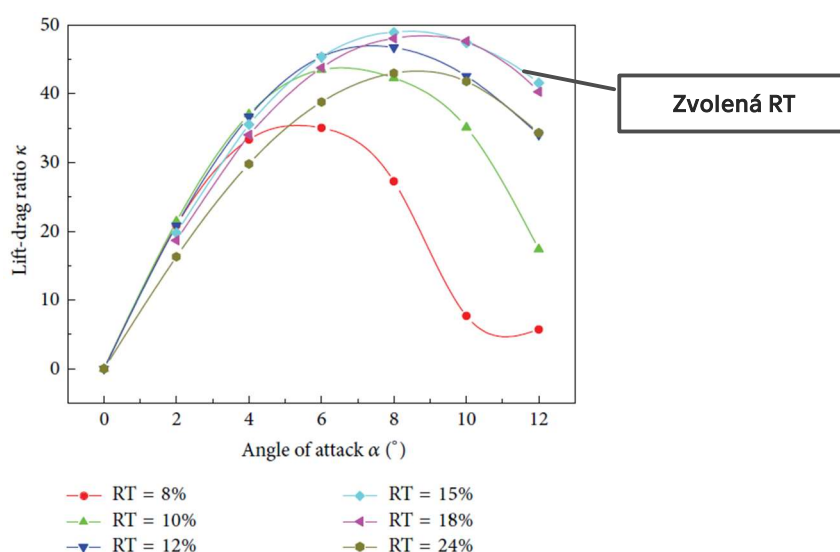
### Diskuse výsledných rozměrů

Poměr  $c/R=0,375$  se nachází ve spektru hodnot méně vhodných pro dosažení maximální účinnosti viz obrázek č. 66 (87). Zároveň je ale nutné poukázat na fakt, že celkové rozměry mají taktéž výrazný vliv na celkovou účinnost. Při porovnání černě označeného průběhu ( $c/R=0,4/1,3$ ) a olivově označeného průběhu ( $c/R=0,6/2$ ) je možné vidět, že i při srovnatelném poměru  $c/R$  může nastat velký rozdíl v maximální dosažitelné hodnotě účinnosti, proto je snahou volit délku tětiny větší i s ohledem na méně příznivý poměr  $c/R$ .

Poměr  $h/R$  je také malý se srovnáním doporučených hodnot z diskuse obrázku č. 30. Doporučením je přesahovat alespoň hodnoty 4 a více. S ohledem na rozměry tunelu by ale volba rotoru s poměry  $h/R$  4 a více znamenala malou délku tělavy a tudíž další snižování rozměrů a zmenšování  $Re$ , které hraje v neprospěch celkové účinnosti. Malý poměr  $h/R$  pravděpodobně zapříčiní větší vliv 3D efektů spojených s prouděním kolem lopatek (jako je například nárůst indukovaného tlaku atd.). 3D jevy proudění vzduchu mohou zapříčinit menší vhodnost této konfigurace pro porovnání či verifikaci 2D CFD simulací.

### 9.2.7. Volba leteckého profilu lopatek rotoru

V této fázi práce je prozatím zvolen symetrický profil s relativní tloušťkou  $RT=18\%$ , volba je učiněna na základě výsledků obrázku č. 63 (88). Tento profil poslouží pro návrh lopatek a názornější grafickou interpretaci výsledné S-VAWT.



Obrázek 88: Zvýraznění oblasti návrhu, volba leteckého profilu (obr. č. 63), [49]

Symetrický letecký profil s maximální hodnotou  $RT=18\%$  je například NACA0018 podrobněji popsán v kapitole 4.6.1. NACA0018 je tedy zvolen pro tvorbu 3D modelu lopatek S-VAWT.

### 9.3. Výpočet výkonu navržené S-VAWT

Pro určení výkonu jsou využity již známé rozměry rotoru. Dále je potřeba znát rozsah měřených rychlostí. Experimentální měření by měla prozatím sloužit k optimalizaci rotoru v nižších rychlostech větru (podobným reálným podmínkám ve kterých by operovala S-VAWT například při umístění na střechy budov), tudíž předpokládaný rozsah rychlostí větru se pohybuje mezi 0-10 m/s.

V případě potřeby využití S-VAWT pro „upscaling“ je možné využít i vyšších intervalů rychlostí pro navýšení  $Re$  tato problematika, ale není v této práci dále rozvíjena.

Výpočet průměrné plochy  $A_{S-VAWT}$ :

$$A_{S-VAWT} = h \cdot 2 \cdot R = 0,35 \cdot 2 \cdot 0,2 = 0,14 \text{ m}^2 \quad (37)$$

Odhadovaná maximální účinnost je  $C_{p\text{odhad}}$  je 20 %.

$$C_{p_{odhad}} = 0,2 \quad (38)$$

Hustota vzduchu (předpokládané podmínky měření:  $t_{vzduchu}=15^{\circ}\text{C}$ ,  $p_{atmos}=101\,325\text{ Pa}$ ) [72]

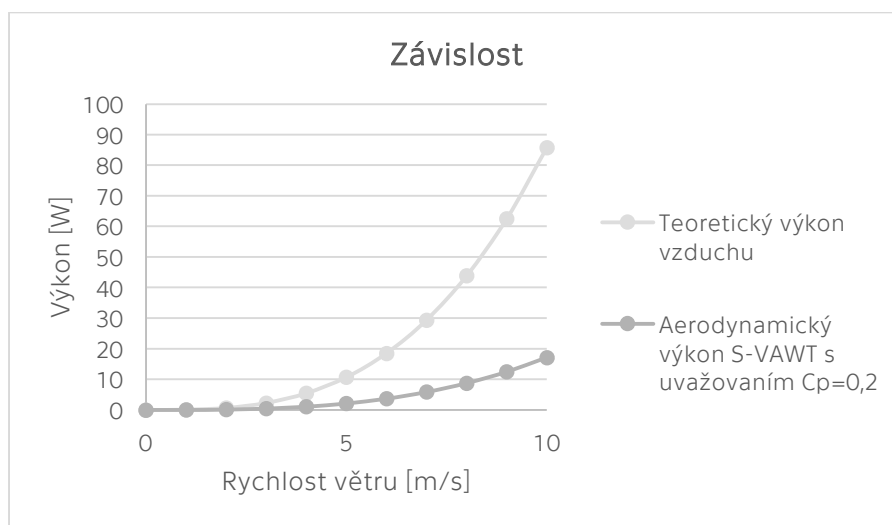
$$\rho_{vzduch-odhad} = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (39)$$

Odhadovaný aerodynamický výkon navrhované S-VAWT:

$$P_{S-VAWT} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_{P-odhad} \quad (40)$$

Teoretický výkon vzduchu

$$P_{teor} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (41)$$



Obrázek 89: Závislost výkonu navrhované S-VAWT na rychlosti větru

## 9.4. Volba elektromotoru (generátoru)

Maximální předpokládaný výkon s uvažováním 20% účinnosti je přibližně 17 W (na základě obrázku č. 89 a definovaných vstupních hodnot).

Při známé hodnotě výkonu je možné zvolit vhodný elektromotor, který bude použit v generátorovém režimu.

Kritéria pro volbu elektromotoru:

- Malá velikost
- Možnost měření při nízkých otáčkách (řádově stovek/min)

Na základě zmíněných kritérií byl vybrán letecký RC motor *Turnigy Aerodrive SK3-6374-149KV* [73].

Nejdůležitější specifikace elektromotoru (generátoru):

- 149 KV (149 otáček/min odpovídá napětí 1V)
- Maximální výkon: 2250 W

Zvolený motor splňuje kritérium malých rozměrů, pro určení generovaného napětí je ale potřeba znát otáčky S-VAWT během měření ve větrném tunelu. Otáčky jsou přibližně odhadnuty v dalších odstavcích.

## 9.5. Odhad otáček S-VAWT

---

Na základě studie [74] jsou odhadnuty otáčky dosažitelné u S-VAWT. Ve studii byla testována DVAWT se spirálovými lopatkami vyššího výkonu (100 W) se  $\sigma=0,3$ . Pro rychlost větru 4 m/s bylo dosaženo 26 ot/min, pro rychlost 10 m/s bylo dosaženo 258 ot/min.

Pro potřeby technického návrhu S-VAWT je tento rozsah otáček užitečnou informací z pohledu hodnot napětí na generátoru, které se využijí k vyhodnocení získaného výkonu pomocí měřící elektroniky.

Zvolený elektromotor (generátor) dosahuje napětí 1V při 149 ot/min. Při uvažování rozsahu otáček ze zmíněné studie by během měření bylo dosahováno malých hodnot napětí.

Získané hodnoty napětí pro zvolené otáčky generované vybraným elektromotorem (generátorem):

- 30 ot/min ~ 0,2 V
- 100 ot/min ~ 0,67 V
- 200 ot/min ~ 1,34 V

Tyto hodnoty jsou z hlediska snímání generovaného napětí nedostatečné a ztráty v měřící elektronice by mohly přesahovat generované hodnoty. Z tohoto důvodu je v konstrukčním návrhu zařazena jednostupňová převodovka s ozubenými koly s přímými zuby.

Zvolený převodový poměr:

$$i_{12} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{12}{40} = \frac{3}{10} = 0,3 \quad (42)$$

Převodový poměr je 0,3. Použitý převodový poměr tedy urychluje otáčky v poměru 3,33.

Získané hodnoty napětí při zařazení převodovky pro zvolené otáčky generované elektromotorem (generátorem):

- 30 ot/min ~ 0,6 V
- 100 ot/min ~ 2 V
- 200 ot/min ~ 4 V

Díky zařazení převodovky je dosahováno vyšších hodnot napětí, které zajistí přesnější sběr naměřených dat. Zároveň jsou do navrhnutého zařízení ale vneseny další mechanické ztráty. Účinnost jednostupňové převodovky s přímými zuby se může pohybovat v rozmezí 94-99% [75]. Tento pokles účinnosti je tedy nutné uvažovat při výpočtu aerodynamické účinnosti S-VAWT.

*Počty zubů byly voleny s ohledem na běžně dostupná ozubená kola s přímými zuby (použitý modul ozubení je  $m=1,5$ ).*

Na základě rozboru vstupů a návrhu rozměrů S-VAWT je možné přistoupit k diskusi konkrétního návrhu.

## 9.6. Technický návrh rotoru S-VAWT

---

Rotor musí na základě požadavků zmíněných na začátku této kapitoly splňovat univerzálnost a možnou zaměnitelnost lopatek. Zároveň by měly všechny komponenty splňovat technologické požadavky na výrobu konvenčními způsoby třískového obrábění s ohledem na zachování co nejnižší ceny prototypu. Zároveň by měly být využívány normalizované polotovary pro snížení ceny a normalizované součásti pro snížení množství vyráběných komponent.

*Čísla v závorkách se odkazují na komponenty na obrázcích na následující straně.*

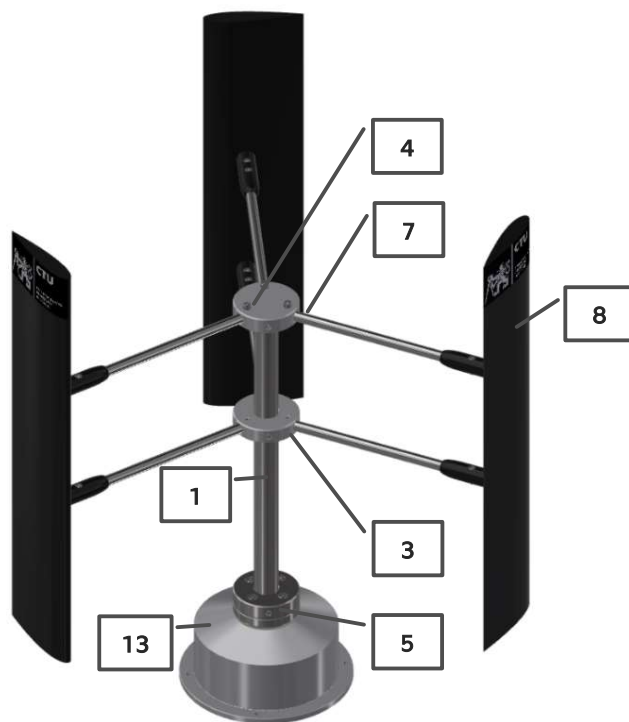
Rotor navržené S-VAWT je tvořen hřídelem věže (1) (polotovar-kruhová trubka) ve kterém jsou vyřezány tři závity pro stavěcí šrouby s vnitřním šestihranem (2), které zajistí axiální polohu tří prstenců. Střední prstenec (3) je průchozí, vrchní (4) a spodní prstence (5) jsou zaslepeny pro snazší montáž. Vrchní a střední prstenec mají vyvrtány tři díry po 120°. Těmito dírami jsou vertikálně vyvrtány díry pro šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem (6), tyto šrouby zajišťují axiální polohu vzpěr (7) lopatek uložených do tří děr v obou prstencích. Na vzpěry jsou upnuty lopatky (8), které se vyrobí za pomoci 3D tisku z plastu.

Jednotlivé lopatky jsou axiálně zajištěny vždy dvěma šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem (9) na každou vzpěru. Lopatky mají půlené díry, analogicky jsou vyhotovena zakončení vzpěr (vzpěry jsou protikusem lopatek). Tento tvarový spoj zajišťuje snadnou montáž a demontáž lopatek. Šrouby s vnitřním šestihranem jsou v lopatkách částečně zapuštěny, aby docházelo k menšímu narušení proudu vzduchu, který obtéká šroubové hlavy.

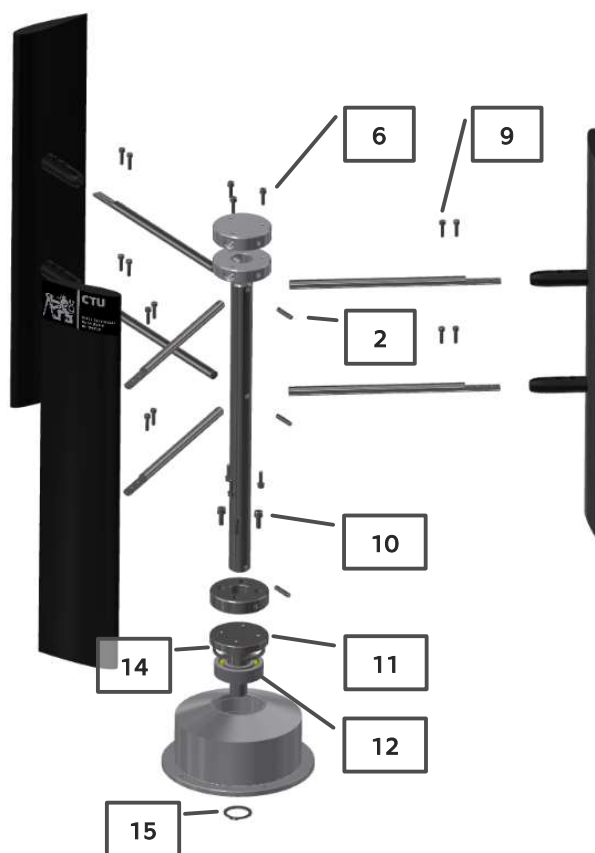
Spodní prstenec je následně čtyřmi šrouby s válcovou hranou s vnitřním šestihranem (10) upnut k centrálnímu hřídeli (11). Centrální hřídel je uložený v jednořadém valivém kuličkovém ložisku (12), toto ložisko je zároveň uloženo v podstavě (13). Ložisko je axiálně zajištěno vnitřním pojistným kroužkem v podstavě (14) a vnějším pojistným kroužkem (15) na hřídeli.

Podstava má přírubu umožňující upnutí S-VAWT k přípravkům, které vymezí její polohu ve větrném tunelu.

Takto smontovaný rotor s podstavou již může sám o sobě sloužit například k měření otáček na „prázdnou“ bez zátěže. Hodnoty otáček bez zátěže jako funkce rychlosti větru mohou být například vstupem pro 2D CFD analýzu proudění kolem rotujících lopatek.



Obrázek 90: Rotor navrhnuté S-VAWT

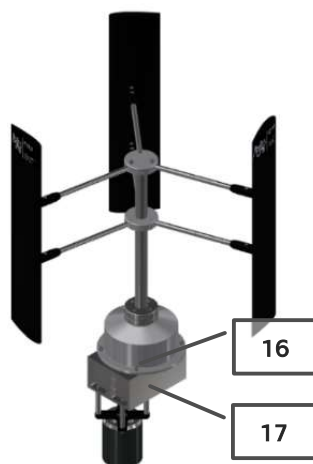


Obrázek 91: Rozkládací sestava rotoru navrhnuté S-VAWT

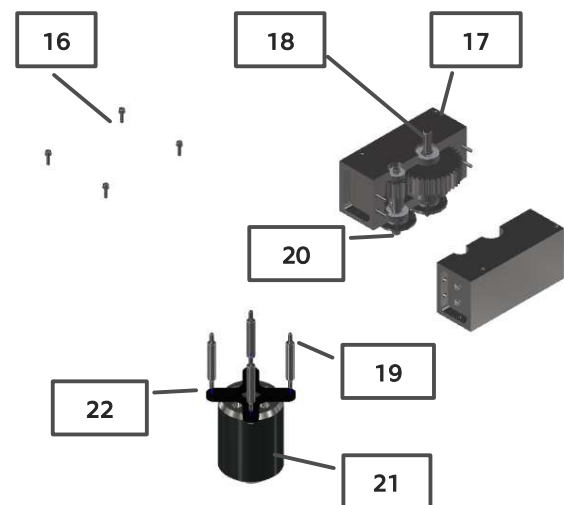


K základně je možné pomocí 4 šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem (16) upevnit převodovku (17). Vstupní hřídel převodovky (18) má drážku pro pero, která společně s vnitřní drážkou pro pero centrálního hřídele přenesou krouticí moment z rotoru elektrárny do převodovky. Toleranční pole jsou zvolena tak, aby v tomto spoji nebyly přechodné tolerance tzn. spoj byl snadno rozmontovatelný, jelikož je požadována snadná montáž a demontáž převodovky od podstavu. Tento hřídel a jeho vnitřní drážka totiž plní funkci spojky s převodovkou.

Převodovka má předpřipravené díry pro čtyři distanční šrouby (19), které dostatečně vymezí vzdálenost mezi hřídelem elektromotoru a výstupním hřídelem převodovky (20). Elektromotor (21) je k distančním šroubům upnut přes upínací kříž a sadu šestihranných matic (22). Krouticí moment je mezi výstupním hřídelem převodovky a hřídelem elektromotoru přenesen kleštinou.



Obrázek 92: Navržená S-VAWT s nainstalovanou převodovkou



Obrázek 93: Navržená S-VAWT s odinstalovanou převodovkou

Hodnoty napětí a proudu generované elektromotorem během měření ve větrném tunelu umožní výpočet celkového výkonu S-VAWT. Při znalosti účinnosti elektromotoru, znalosti/odhadu účinnosti převodovky a měřící elektroniky je možné přímo vypočítat aerodynamickou účinnost rotoru navržené S-VAWT ( $C_{p_{S-VAWT}}$ ), tento výpočet je možné provést na základě rovnice č. 5 z kapitoly č. 2.1. Během měření zároveň proběhne snímání otáček (oproti měření „naprázdno“ již se zátěží).

Přílohy této bakalářské práce obsahují kompletní výkresovou dokumentaci pro výrobu všech nenormalizovaných komponent navržené S-VAWT. Součástí příloh jsou taktéž sestava převodovky a celková sestava S-VAWT. Zároveň je obsažena montážní dokumentace, která podrobněji popisuje sestavení navržené S-VAWT.

## 9.6.1. Možnosti konfigurace rotoru

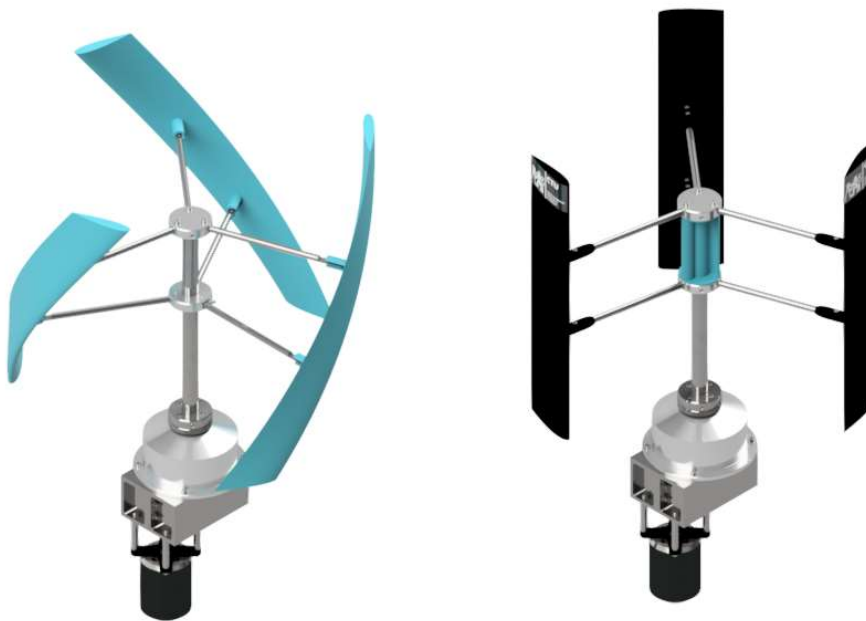
Návrh S-VAWT byl koncipovaný tak, aby splnil požadavek na jednoduchou výměnu lopatek. Lopatky mohou být vyměňovány během jednoho měření což může výrazně zkrátit dobu potřebnou pro proměření vícero konfigurací rotoru během jednoho experimentu.

Lopatky budou na základě požadavku zadání vyrobeny za pomoci 3D tisku z plastu. 3D tisk z plastu umožňuje výrobu tvarově složitých lopatek při zachování nízké ceny oproti konvenčním způsobům jako je například CNC frézování či odlévání lopatek z kovu/plastu.

Lopatky je možné tisknout s různými leteckými profily, různou délkou tělivity profilu, „winglety“, sloty a dalšími alternativami aerodynamické optimalizace rotoru zmíněnými v 7. kapitole. Kromě výměny lopatek je možné vyhodnocovat i vliv různých rozměrů poloměru rotoru ( $R$ ) na hodnoty výkonového koeficientu. Změny je možné zajistit výrobou dalších sad vzpěr o jiných rozměrech. Vzpěry jsou vyrobeny z běžně dostupného tyčového materiálu, proto již není jejich výroba tak ekonomicky nákladná.

Vyvtáním dalších děr pro stavěcí šrouby v hřídeli věže je možné přestavět navrženou S-VAWT na Gorlovovu VAWT se spirálovými lopatkami. Přestavba S-VAWT na Gorlovovu VAWT je vidět na obrázku č. 94. Upínací otvory lopatek musí být oproti S-VAWT z jedné strany otevřené pro zachování smontovatelnosti.

Další možností je instalace Savoniova rotoru na hřídel věže mezi střední a vrchní prstenec (možnost testování kombinace odporové a vztlakové elektrárny). Savoniův rotor by byl proti rotaci zajištěn pomocí tvarového spoje s průchozími dírami pro šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem (6), které axiálně zajišťují polohu vzpěr v prstencích. Koncepční řešení Savoniova rotoru je na obrázku č. 94. Savoniův rotor může mít různé tvary.



Obrázek 94: Možnosti úprav konfigurace rotoru S-VAWT

Další možností je kompletní přestavba na Savoniovu VAWT. Centrum rotoru by bylo podobně jako v případě instalace menšího Savoniova rotoru upnuto mezi vrchní a střední prstenec. Rotačně by byl rotor opět zajištěn pomocí tvarových spojů využívajících již vyhotovených děr pro axiální zajištění vzpěr lopatek.



Obrázek 95: S-VAWT přestavěná na Savoniovu VAWT

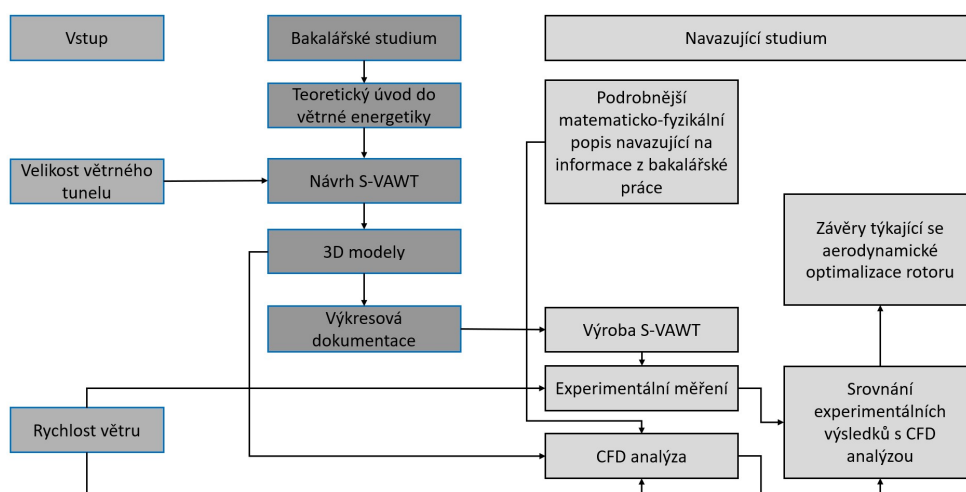
Všechny úpravy rotoru zvýrazněné tyrkysovou barvou jsou určeny pouze pro názornou ukázkou univerzality celého návrhu. Tvar lopatek určených pro testování se může lišit.

## 9.7. Možnosti návaznosti na bakalářskou práci

S-VAWT byla navrhována tak, aby poskytovala univerzalitu pro experimentální měření týkající se aerodynamické optimalizace jejího rotoru. Zároveň tato bakalářská práce obsahuje základní doporučení pro volbu lopatek a vícero možností úprav rotoru.

Na základě tohoto přehledu je možné se rozhodnout jakým směrem se může profilovat experimentální činnost spojená s problematikou návrhu a optimalizací větrných turbín s vertikální osou rotace.

Možnosti návaznosti na tuto bakalářskou práci jsou nastíněny v blokovém schématu níže.



Obrázek 96: Blokové schéma rozpracování úlohy

## 10. Závěr

---

V této bakalářské práci byl nejprve uveden základní úvod do problematiky obnovitelných zdrojů a větrné energetiky. Následně byla provedena rešerše týkající se aerodynamiky a technického řešení větrných turbín. Pro lepší přehled o rozdílech mezi jednotlivými turbínami, jejich výhodami a možnou aplikací tak bylo učiněno pro tři nejpoužívanější typy větrných turbín ve větrné energetice.

S ohledem na zaměření práce na vztlkové větrné turbíny s vertikální osou rotace bylo přistoupeno k podrobnější analýze aerodynamického návrhu rotoru. Na základě této analýzy byl navrhnout prototyp turbíny malého výkonu určené pro experimentální ověřování dílčích úprav rotoru ve větrném tunelu.

Navržená turbína poskytuje univerzalitu pro testování všech možností úprav rotorů vztlkových turbín s vertikální osou rotace zmíněných v rešeršní části. Pro prototyp byla zároveň vytvořena výkresová dokumentace, která poslouží k jeho výrobě.

Práce zároveň v rešeršní části týkající se větrné energetiky zmínila možnosti instalace turbín s vertikální osou rotace v decentralizované energetice, zároveň také poukazuje na problémy s aplikací turbín, které jsou k dispozici na trhu. V kombinaci s technickým přehledem o vlastnostech jednotlivých turbín je možné v navazující činnosti optimalizovat vztlkovou větrnou turbínu s vertikální osou rotace přímo pro podmínky v decentralizované energetice.

Navrhnutá turbína může zároveň sloužit k experimentální verifikaci numerických simulací.

Tato práce je tedy pouze součástí širšího celku a předpokládá se další návaznost na její výstupy.

## Seznam veličin

Wh ... jednotka energie [J] [W.s.3600]

toe ... jednotka ropného ekvivalentu, toe je jednotkou energie uvolněné při spálení jedné tuny ropy, 1toe= 11,63 MWh

Ek ... kinetická energie [J]

m ... hmotnost tělesa, systému [kg]

v ... rychlost [m.s<sup>-1</sup>]

p ... tlak [Pa], [N.m<sup>-2</sup>]

v ... měrný objem, stavová rovnice ideálního plynu [m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>]

ρ ... hustota [kg.m<sup>-3</sup>]

r ... měrná plynová konstanta, stavová rovnice ideálního plynu ( $r_{\text{vzduch}}=287,15 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ )

T ... termodynamická teplota [K]

P ... mechanický výkon [W]

t ... čas, časový úsek [s]

P<sub>teor</sub> ... teoretický výkon větru [W]

P<sub>VT</sub> ... výkon větrné turbíny [W]

η<sub>VT</sub> ... celková účinnost větrné turbíny [1], [%]

η<sub>AER</sub> ... aerodynamická účinnost turbíny [1], [%]

η<sub>MECH</sub> ... mechanická účinnost mechanických komponent turbíny [1], [%]

η<sub>EL</sub> ... elektrická účinnost elektrických komponent turbíny [1], [%]

C<sub>p</sub> ... výkonový součinitel [1], [%]

C<sub>pBETZ</sub> ... teoreticky odvozená hodnota výkonového součinitele podle Betze [1], [%]

KF ... kapacitní faktor [1], [%]

ρ<sub>P</sub> ... hustota výkonu [W/m<sup>2</sup>]

τ<sub>W</sub> ... smykové napětí na stěně [N/m<sup>2</sup>]

A ... obecná plocha tělesa obtékaného tekutinou [m<sup>2</sup>]

F<sub>P</sub> ... aerodynamická síla způsobená tlakem působícím na plochu tělesa obtékaného tekutinou [N]

F<sub>τ</sub> ... aerodynamická síla způsobená smykovým napětím působícím na plochu tělesa obtékaného tekutinou [N]

U ... vektor příchozí rychlosti, sekce aerodynamiky [m.s<sup>-1</sup>]

F<sub>x</sub> ... rozklad aerodynamické síly do směru x [N]

**$F_y$**  ... rozklad aerodynamické síly do směru  $y$  [N]  
 **$D, F_L$**  ... aerodynamický odpor [N]  
 **$L, F_D$**  ... aerodynamický vztlak [N]  
 $\theta$  ... úhel sklonu obecné plochy tělesa obtékaného tekutinou, sekce aerodynamiky [°]  
 $A$  ... plocha  $A$  pro výpočet  $C_L$  a  $C_D$  koeficientu, sekce aerodynamiky [ $m^2$ ]  
 $C_L$  ... koeficient aerodynamického vztlaku [1]  
 $C_D$  ... koeficient aerodynamického odporu [1]  
 $Re$  ... Reynoldsovo číslo [1]  
 $\mu$  ... dynamická viskozita [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ], [Pa.s], [ $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ]  
 $\nu$  ... kinematická viskozita [ $m^2 \cdot s$ ]  
 $U, u$  ... střední rychlost proudu tekutiny, rovnice pro výpočet  $Re$  [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 $l$  ... charakteristický rozměr, rovnice pro výpočet  $Re$  [m]  
 $D_{TŘECÍ}$  ... třecí aerodynamický odpor [N]  
 $D_{TLAKOVÝ}$  ... tlakový aerodynamický odpor [N]  
 $AR$  ... štíhlost křídla [1]  
 $c$  ... délka tětivy leteckého profilu [m]  
 $f$  ... prohnutí leteckého profilu [m]  
 $t$  ... tloušťka leteckého profilu [m]  
 $RT$  ... relativní tloušťka leteckého profilu [1], [%]  
 $RC$  ... relativní prohnutí [1], [%]  
 $\lambda$  ... koeficient rychloběžnosti [1]  
 $\omega$  ... úhlová rychlost [ $rad \cdot s^{-1}$ ]  
 $r$  ... poloměr rotace (rotoru) [m]  
 $n$  ... otáčky [ $1 \cdot min^{-1}$ ], [ $1 \cdot s^{-1}$ ]  
 $v_{větru}$  ... rychlost příchozího větru [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 **$M_k$**  ... kroutící moment [N.m]  
 $\alpha$  ... úhel náběhu, pro HAWT, VAWT [°]  
 $\beta$  ... úhel otočení, pro HAWT [°]  
 $\Theta$  ... úhel natočení, pro HAWT [°]  
 **$V$**  ... vektor příchozí rychlosti, pro HAWT [ $m \cdot s^{-1}$ ]  
 **$U$**  ... vektor obvodové rychlosti, pro HAWT [ $m \cdot s^{-1}$ ]

**W** ... vektor relativní rychlosti [m.s<sup>-1</sup>]  
**W<sub>in</sub>** ... vektor indukované rychlosti [m.s<sup>-1</sup>]  
**F<sub>TO</sub>** ... kroutící síla, pro HAWT [N]  
**F<sub>TH</sub>** ... přítláčná síla, pro HAWT [N]  
**F<sub>TOTAL</sub>** ... celková síla, pro HAWT [N]  
**D** ... průměr rotoru elektrárny [m]  
**H** ... celková výška elektrárny [m]  
**R** ... poloměr rotace, pro VAWT [m]  
**V<sub>inf</sub>, u<sub>∞</sub>** ... rychlost vzduchu v nekonečné vzdálenosti, pro VAWT [m.s<sup>-1</sup>]  
**u, ωR, v<sub>ωR</sub>** ... obvodová rychlost, pro VAWT [m.s<sup>-1</sup>]  
**V<sub>R</sub>/v<sub>rel</sub>** ... relativní rychlost, pro VAWT [m.s<sup>-1</sup>]  
**F<sub>blade</sub>** ... celková aerodynamická síla na lopatku, pro VAWT [N]  
**F<sub>t</sub>** ... tečná složka celkové aerodynamické síly, pro VAWT [N]  
**F<sub>n</sub>** ... normálová složka celkové aerodynamické síly, pro VAWT [N]  
**σ<sub>rotoru VAWT</sub>** ... mříž rotoru [1], [%]  
**h** ... výška lopatek/hloubka lopatek [m]  
**n** ... počet lopatek, rozměry VAWT [1]  
**θ** ... úhel polohy lopatky VAWT, azimut lopatky VAWT [°]  
**β** ... úhel natočení, pro VAWT [°]  
**γ** ... lokální úhel přítoku, pro VAWT [°]  
**γ<sub>θ</sub>** ... lokální úhel přítoku jako funkce azimutu lopatky, pro VAWT [°]  
**σ<sub>rotoru S-VAWT</sub>** ... mříž rotoru navržené S-VAWT [1], [%]  
**A<sub>S-VAWT</sub>** ... průmětná plocha navržené S-VAWT [m<sup>2</sup>]  
**C<sub>p</sub><sub>odhad</sub>** ... odhadovaný výkonový součinitel navržené S-VAWT [1], [%]  
**ρ<sub>vzduch-odhad</sub>** ... odhadovaná hustota vzduchu při experimentu [kg.m<sup>-3</sup>]  
**P<sub>S-VAWT</sub>** ... odhadovaný výkon navržené S-VAWT [W]  
**i<sub>12</sub>** ... převodový poměr [1]  
**m** ... modul ozubeného kola [mm]

## Seznam zdrojů

- [1] *Paris Agreement | Climate Action* [online]. [vid. 2021-08-30]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en#tab-0-0](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en#tab-0-0)
- [2] *Sources of Greenhouse Gas Emissions | US EPA* [online]. [vid. 2021-08-27]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
- [3] *Temperatures | Climate Action Tracker* [online]. [vid. 2021-08-28]. Dostupné z: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>
- [4] *| Greenhouse Gas (GHG) Emissions | Climate Watch* [online]. [vid. 2021-08-28]. Dostupné z: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=percentage&end\\_year=2018&sectors=&source=CAIT&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=percentage&end_year=2018&sectors=&source=CAIT&start_year=1990)
- [5] *non-renewable energy | National Geographic Society* [online]. [vid. 2021-09-25]. Dostupné z: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/non-renewable-energy/>
- [6] *World | Building, Electricity/Heat, Fugitive Emissions, Manufacturing/Construction, Other Fuel Combustion, Transportation | Greenhouse Gas (GHG) Emissions | Climate Watch* [online]. [vid. 2021-09-25]. Dostupné z: [https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=area&end\\_year=2018&regions=WORLD&sectors=building%2Celectricity-heat%2Cfugitive-emissions%2Cmanufacturing-construction%2Cothers-fuel-combustion%2Ctransportation&source=CAIT&start\\_year=1990](https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=sector&chartType=area&end_year=2018&regions=WORLD&sectors=building%2Celectricity-heat%2Cfugitive-emissions%2Cmanufacturing-construction%2Cothers-fuel-combustion%2Ctransportation&source=CAIT&start_year=1990)
- [7] *Renewable Resources | National Geographic Society* [online]. [vid. 2021-09-25]. Dostupné z: <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/renewable-resources/>
- [8] LEE, Joyce a Feng ZHAO. *Global Wind Report 2021. Global Wind Energy Council* [online]. 2021, 75. Dostupné z: <http://www.gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>
- [9] IEA. *World Energy Outlook 2019 Ⅰ. World Energy Outlook Series* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019%0Ahttps://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019%0Ahttps://webstore.iea.org/download/summary/2467?fileName=Japanese-Summary-WEO2019.pdf>
- [10] *Global Wind Report 2021 | Global Wind Energy Council* [online]. [vid. 2021-08-27]. Dostupné z: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [11] *Energy - Wikipedia* [online]. [vid. 2021-09-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Energy>
- [12] *(PDF) TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF AN OFF-GRID MICRO-HYDROKINETIC RIVER SYSTEM AS A REMOTE RURAL ELECTRIFICATION OPTION* [online]. [vid. 2022-04-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/320505835\\_TECHNO-ECONOMIC\\_ANALYSIS\\_OF\\_AN\\_OFF-GRID\\_MICRO-HYDROKINETIC\\_RIVER\\_SYSTEM\\_AS\\_A\\_REMOTE\\_RURAL\\_ELECTRIFICATION\\_O](https://www.researchgate.net/publication/320505835_TECHNO-ECONOMIC_ANALYSIS_OF_AN_OFF-GRID_MICRO-HYDROKINETIC_RIVER_SYSTEM_AS_A_REMOTE_RURAL_ELECTRIFICATION_O)



PTION/figures?lo=1

- [13] *File:Power County Wind Farm 002.jpg - Wikimedia Commons* [online]. [vid. 2022-04-02]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3APower\\_\\_County\\_\\_Wind\\_\\_Farm\\_\\_002.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3APower__County__Wind__Farm__002.jpg)
- [14] *File:Windpark 3425.jpg - Wikimedia Commons* [online]. [vid. 2022-04-02]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windpark\\_\\_3425.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windpark__3425.jpg)
- [15] *Wind Energy Factsheet | Center for Sustainable Systems* [online]. [vid. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://css.umich.edu/factsheets/wind-energy-factsheet>
- [16] *History of Europe's wind industry · WindEurope* [online]. [vid. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://windeurope.org/about-wind/history/>
- [17] *Offshore Wind Outlook 2019 – Analysis - IEA* [online]. [vid. 2021-08-27]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>
- [18] *UK offshore wind capacity factors – Energy Numbers* [online]. [vid. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://energynumbers.info/uk-offshore-wind-capacity-factors>
- [19] • *Solar PV capacity factor globally 2020 | Statista* [online]. [vid. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/799330/global-solar-pv-installation-cost-per-kilowatt/>
- [20] *Fixed Wind Foundations: An Independent Concept Screening Approach* [online]. [vid. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://2hoffshore.com/blog/concept-screening-fixed-wind-foundations/>
- [21] *Excipio Energy unveils new hybrid floating offshore wind platform* [online]. [vid. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/excipio-energy-unveils-new-hybrid-floating-offshore-wind-platform/>
- [22] LETCHER, Trevor M. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. B.m.: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780128094297.
- [23] *Electricity Mix - Our World in Data* [online]. [vid. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- [24] REPORT, W N A. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. *World Nuclear Association*. 2011, 10.
- [25] DUMONT, Olivier, Guido Francesco FRATE, Aditya PILLAI, Steven LECOMPTE, Michel DE PAEPE a Vincent LEMORT. Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage* [online]. 2020, **32**, 101756. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/J.EST.2020.101756
- [26] *For the Green Deal, hydrogen also needs to be green - Aurelia Turbines* [online]. [vid. 2021-09-09]. Dostupné z: <https://aureliaturbines.com/articles/for-the-green-deal-hydrogen-also-needs-to-be-green>
- [27] *Synthetic fuels | Bosch Global* [online]. [vid. 2021-09-26]. Dostupné z: <https://www.bosch.com/stories/synthetic-fuels/>
- [28] SCHAFFARCZYK, A P. *Green Energy and Technology Introduction to Wind Turbine Aerodynamics* [online]. 2020. ISBN 9783030410278. Dostupné z: <http://www.springer.com/series/8059>

- [29] MUNSON, Bruce R., Donald F. YOUNG, Theodore H. OKIISHI a Wade W. HUEBSCH. Fundamentals of Fluid Mechanics 6th edititon. *Fundamental of Fluids Mechanics*. 2009, 93–146.
- [30] VAN DYKE, Milton a Frank M. WHITE. *An Album of Fluid Motion* [online]. 1982. ISSN 0098-2202. Dostupné z: doi:10.1115/1.3241909
- [31] *Wing profile nomenclature - Airfoil - Wikipedia* [online]. [vid. 2022-05-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil#/media/File:Wing\\_profile\\_nomenclature.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil#/media/File:Wing_profile_nomenclature.svg)
- [32] *NACA 0018 (naca0018-il)* [online]. [vid. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>
- [33] KISHORE, Ravi Anant, Colin James STEWART a Shashank PRIYA. Wind energy harvesting : micro-to-small scale turbines. 2018.
- [34] *Wind turbine design with superpowers - Ashes - Wind turbine design with superpowers* [online]. [vid. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.simis.io/>
- [35] *The Future of Wind Turbines: Comparing Direct Drive and Gearbox | Engineering.com* [online]. [vid. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/the-future-of-wind-turbines-comparing-direct-drive-and-gearbox>
- [36] *Wind turbine with gearbox - ifm-electronic* [online]. [vid. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/applications/060/wind-energy.html#!/content/documents/cs/shared/applications/060/1020/1020/1020>
- [37] *Pitch and yaw | SKF | SKF* [online]. [vid. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.skf.com/ph/industries/wind-energy/drivetrain/pitch-and-yaw>
- [38] (1) (PDF) *Correlation of Mechanical Properties to Rain Erosion Resistance of Polymeric Materials* [online]. [vid. 2022-04-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/331249559\\_Correlation\\_of\\_Mechanical\\_Properties\\_to\\_Rain\\_Erosion\\_Resistance\\_of\\_Polymeric\\_Materials/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/331249559_Correlation_of_Mechanical_Properties_to_Rain_Erosion_Resistance_of_Polymeric_Materials/figures?lo=1)
- [39] HANSEN, Joachim Toftegaard, Mahak MAHAK a Iakovos TZANAKIS. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy* [online]. 2021, **171**, 1371–1381. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/J.RENENE.2021.03.001
- [40] (1) (PDF) *Wind power integration in Southern Brazil: Steady-state analysis* [online]. [vid. 2022-04-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/261302567\\_Wind\\_power\\_integration\\_in\\_Southern\\_Brazil\\_Steady-state\\_analysis/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/261302567_Wind_power_integration_in_Southern_Brazil_Steady-state_analysis/figures?lo=1)
- [41] *Welcome to the „wild west“ of wind law - E&E News* [online]. [vid. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.eenews.net/articles/welcome-to-the-wild-west-of-wind-law/>
- [42] *Wind turbine regulations* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://eng.mst.dk/air-noise-waste/noise/wind-turbines/wind-turbine-regulations/>

- [43] *Wind Turbines Distance From Residential - Engineering's Advice* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://engineeringsadvice.com/wind-turbines-distance-from-residential/>
- [44] *How Loud Is A Wind Turbine? | GE News* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/reports/how-loud-is-a-wind-turbine>
- [45] *Sound Attenuation Calculator - Inverse Square Law | WKC Group* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.wkcgroup.com/tools-room/inverse-square-law-sound-calculator/>
- [46] *Onshore Wind Turbine SG 3.4-145 | Siemens Gamesa* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-3-4-145>
- [47] *IEC 61400 - Wikipedie* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61400](https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61400)
- [48] SABER, E., R. AFIFY a H. ELGAMAL. Performance of SB-VAWT using a modified double multiple streamtube model. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2018, **57**(4), 3099–3110. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/J.AEJ.2018.07.009
- [49] LIANG, Ying Bin, Li Xun ZHANG, Er Xiao LI, Xiao Hong LIU a Yong YANG. Design considerations of rotor configuration for straight-bladed vertical axis wind turbines. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. 2014, **2014**. ISSN 16878140. Dostupné z: doi:10.1155/2014/534906
- [50] (1) (PDF) *Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use* [online]. [vid. 2022-04-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/333316757\\_Experimental\\_Vibration\\_Analysis\\_of\\_a\\_Small\\_Scale\\_Vertical\\_Wind\\_Energy\\_System\\_for\\_Residential\\_Use/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/333316757_Experimental_Vibration_Analysis_of_a_Small_Scale_Vertical_Wind_Energy_System_for_Residential_Use/figures?lo=1)
- [51] *NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il)* [online]. [vid. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- [52] *NACA 0015 (naca0015-il)* [online]. [vid. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il>
- [53] *NACA 4415 (naca4415-il)* [online]. [vid. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il>
- [54] *GOE 420 AIRFOIL (goe420-il)* [online]. [vid. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe420-il>
- [55] *S1210 12% (s1210-il)* [online]. [vid. 2022-04-22]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1210-il>
- [56] DANA O, Louis Angelo, Ning QIN a Robert HOWELL. A numerical study of blade thickness and camber effects on vertical axis wind turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* [online]. 2012, **226**(7), 867–881. ISSN 09576509. Dostupné z: doi:10.1177/0957650912454403
- [57] REZAEIHA, Abdolrahim, Ivo KALKMAN a Bert BLOCKEN. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy* [online]. 2017, **197**, 132–150. ISSN 0306-2619. Dostupné

z: doi:10.1016/J.APENERGY.2017.03.128

- [58] MOHAMED, Omar S., Ahmed A. IBRAHIM, Ahmed K. ETMAN, Amr A. ABDELATAH a Ahmed M.R. ELBAZ. Numerical investigation of Darrieus wind turbine with slotted airfoil blades. *Energy Conversion and Management: X* [online]. 2020, **5**, 100026. ISSN 2590-1745. Dostupné z: doi:10.1016/J.ECMX.2019.100026
- [59] Oklahoma Medical Research Foundation (OMRF) Wind and Solar PV Design and Engineering Phase II DRAFT. nedatováno.
- [60] KOSTINA, E. K., M. Yu DUDCHENKO a O. V. MYRONENKO. Modern trends in architecture. Green architecture as a form of efficient architecture energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, **698**(3). ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/698/3/033048
- [61] *Gallery | Oy Windside Production Ltd* [online]. [vid. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://windside.com/gallery/>
- [62] *V-Air Wind Technologies* [online]. [vid. 2022-05-11]. Dostupné z: <http://www.visionairwind.com/>
- [63] *Oy Windside Production Ltd* [online]. [vid. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://windside.com/>
- [64] *SAWT Inc.-The products of small vertical axis wind turbine* [online]. [vid. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.sawtenergy.com/p1000.html>
- [65] *Aeolos Wind Turbine Company - Wind Turbines – Home Wind Generators – Small Wind Turbines* [online]. [vid. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.windturbinestar.com/english.html>
- [66] *Hi-VAWT | Hi-Energy | VASWT | VAWT | Wind Turbines | Wind Power | Vertical Axis Small Wind Turbines* [online]. [vid. 2022-05-11]. Dostupné z: <http://www.hi-vawt.com.tw/en/welcome.html>
- [67] OHYA, Yuji, Takashi KARASUDANI, Tomoyuki NAGAI a Koichi WATANABE. Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond. *Renewable Energy and Environmental Sustainability* [online]. 2017, **2**, 2. Dostupné z: doi:10.1051/REES/2016022
- [68] HALAWA, Amr M., Takanori UCHIDA, Koichi WATANABE a Yuji OHYA. Validation Study of Multi-Rotor Systems Using Two Shrouded Wind Turbines. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2020, **1618**(3). ISSN 17426596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1618/3/032017
- [69] VAN DER LAAN, Maarten Paul, Søren Juhl ANDERSEN, Néstor Ramos GARCÍA, Nikolas ANGELOU, Georg Raimund PIRRUNG, Søren OTT, Mikael SJÖHOLM, Kim Hylling SØRENSEN, Julio Xavier Vianna NETO, Mark KELLY, Torben Krogh MIKKELSEN a Gunner Christian LARSEN. Power curve and wake analyses of the vestas multi-rotor demonstrator. *Wind Energy Science* [online]. 2019, **4**(2), 251–271. ISSN 23667451. Dostupné z: doi:10.5194/WES-4-251-2019
- [70] *High-flying turbine produces more power | MIT News | Massachusetts Institute of Technology* [online]. [vid. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://news.mit.edu/2014/high-flying-turbine-produces-more-power-0515>
- [71] SCHAFFARCZYK, A P. *Green Energy and Technology Introduction to Wind Turbine*

- Aerodynamics* [online]. B.m.: Springer, 2020. Dostupné z: <http://www.springer.com/series/8059>
- [72] *Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient vs. Temperature and Pressure* [online]. [vid. 2022-04-29]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d\\_600.html](https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html)
- [73] *Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-149kv Brushless Outrunner Motor* [online]. [vid. 2022-04-28]. Dostupné z: [https://hobbyking.com/en\\_us/turnigy-aerodrive-sk3-6374-149kv-brushless-outrunner-motor.html?queryID=974f263a8e9a0aef24241bc87a9ae2b4&objectID=17314&indexName=hbk\\_live\\_products\\_analytics](https://hobbyking.com/en_us/turnigy-aerodrive-sk3-6374-149kv-brushless-outrunner-motor.html?queryID=974f263a8e9a0aef24241bc87a9ae2b4&objectID=17314&indexName=hbk_live_products_analytics)
- [74] HAN, Dowon, Young Gun HEO, Nak Joon CHOI, Sang Hyun NAM, Kyoung Ho CHOI a Kyung Chun KIM. Design, fabrication, and performance test of a 100-W helical-blade vertical-axis wind turbine at low tip-speed ratio. *Energies* [online]. 2018, 11(6), 1–17. ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en11061517
- [75] *Know Which gear is more efficient / Maxpower Gears Valsad* [online]. [vid. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://maxpowergears.com/know-gear-efficient/>

## Seznam příloh

- MONTÁŽNÍ DOKUMENTACE S-VAWT
- BP-01-01 SESTAVA S-VAWT
- BP-01-02 PŘEVODOVÝ MECHANISMUS
- BP-02-01 PODSTAVA I
- BP-02-02 CENTRÁLNÍ HŘÍDEL
- BP-02-03 HŘÍDEL VĚŽE
- BP-02-04 PRSTENEC-SPODNÍ
- BP-02-05 PRSTENEC-STŘED
- BP-02-06 PRSTENEC-VRCHNÍ
- BP-02-07 VZPĚRA
- BP-02-08 DISTANČNÍ ŠROUB
- BP-03-01 VSTUPNÍ HŘÍDEL
- BP-03-02 VÝSTUPNÍ HŘÍDEL
- BP-03-03 SKŘÍŇ I
- BP-03-04 SKŘÍŇ II
- BP-03-05 VÍKO I
- BP-03-06 VÍKO II
- BP-03-07 OZUBENÉ KOLO VSTUPNÍ
- BP-03-08 OZUBENÉ KOLO VÝSTUPNÍ

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Predikce nárůstu teploty s ohledem na množství emitovaných skleníkových plynů [3].....	2
Obrázek 2: Souhrn emisí CO <sub>2</sub> jednotlivých sektorů mezi roky 1990-2018 [6].....	3
Obrázek 3: CO <sub>2</sub> emise pro sektor energie (z obrázku č.2) rozdělený do dalších sub sektorů mezi roky 1990-2018 [6].....	3
Obrázek 4: Celková celosvětová spotřeba energie v roce 2019 [8].....	4
Obrázek 5: Celková celosvětová výroba elektřiny v roce 2019 [8].....	4
Obrázek 6: Celosvětová poptávka po energii podle zdroje (levá osa) a s ní související emise (pravá osa) podle daného scénáře. Zleva: Dohodnutá opatření, udržitelné vývoj a momentální opatření [9].....	5
Obrázek 7: Plocha A v závislosti na typu větrné turbíny [12].....	7
Obrázek 8: ONSHORE farma [13].....	9
Obrázek 9: OFFSHORE farma [14].....	9
Obrázek 10: OFFS turbíny s různými typy pevných základů [20].....	11
Obrázek 11: Plovoucí OFFS turbíny s různými druhy plovoucích základů [21].....	11
Obrázek 12: Nainstalovaný výkon ve větrné energetice [10].....	13
Obrázek 13: Celosvětová výroba elektřiny [23].....	14
Obrázek 14: Porovnání uhlíkové stopy na 1GWh vyrobené energie pro různé zdroje energie [24].....	14
Obrázek 15: HAWT zleva, VAWT zprava.....	17
Obrázek 16: Větrný mlýn [28].....	18
Obrázek 17: Halladayova ("americká") větrná turbína [28].....	18
Obrázek 18: Síly působící na těleso způsobené obtékáním tekutiny [29].....	20
Obrázek 19: Působení tlaku a smykového napětí na elementární plochu dA [29].....	20
Obrázek 20: Vztah pro výpočet plochy A pro letecký profil [29].....	21
Obrázek 21: Chování tekutiny mezi dvěma deskami [29].....	23
Obrázek 22: Příklad možného tvaru rychlostního profilu [29].....	23
Obrázek 23: Vliv Re na charakter proudění při obtékání tělesa tekutinou [29].....	25
Obrázek 24: Změna charakteru mezní vrstvy při obtékání nekonečně dlouhé desky [29].....	26
Obrázek 25: Laminární proudění kolem plátu, Re=10 000 [30].....	27
Obrázek 26: Malá turbulentní oblast v laminární mezní vrstvě, Re=200 000 [30].....	27
Obrázek 27: Turbulentní mezní vrstva, Re=3500 [30].....	28
Obrázek 28: Znázornění nekonstantního tlaku na povrchu tělesa [29].....	28
Obrázek 29: Proudění okolo nekonečně dlouhého válce pro uvažování nekonečného Re [29].....	29
Obrázek 30: Obtékání nekonečně dlouhého válce s odtržením [29].....	30
Obrázek 31: Odtržení tekutiny u povrchu leteckého profilu NACA64A015 při nenulovém úhlu náběhu [30].....	31
Obrázek 32: Separace tekutiny při obtékání desky pod sklonem 20° vůči proudu tekutiny, Re=10 000 [30].....	32
Obrázek 33: Porovnání stejného odporu dvou těles rozdílných tvarů [29].....	34
Obrázek 34: Porovnání symetrického a nesymetrického profilu [29].....	35
Obrázek 35: Porovnání vztlakového koeficientu při použití zařízení navyšujících vztlak [29].....	36
Obrázek 36: Koncové víry [29].....	37
Obrázek 37: Porovnání vlivu štíhlosti křídla [29].....	38

Obrázek 38: Letecký profil [31].....	39
Obrázek 39: letecký profil NACA0018 [32].....	40
Obrázek 40: Závislost vztlakového koeficientu na úhlu náběhu, NACA0018 [32].....	40
Obrázek 41: Závislost odporového koeficientu na úhlu náběhu, NACA0018 [32].....	40
Obrázek 42: Závislost poměru vztlakového a odporového koeficientu na úhlu náběhu, NACA0018 [32].....	41
Obrázek 43: Závislost vztlakového poměru odporovém koeficientu, NACA0018 [32].....	41
Obrázek 44: Účinnosti větrných turbín v porovnání s Betzovým limitem [28].....	42
Obrázek 45: List HAWT s viditelnou proměnnou geometrií průřezu [34].....	45
Obrázek 46: Rychlostní rozklad na listu HAWT [34] .....	45
Obrázek 47: Silový rozklad na listu HAWT, 1 [34].....	46
Obrázek 48: Silový rozklad na listu HAWT, 2 [34].....	46
Obrázek 49: Řez HAWT s převodovkou [36].....	47
Obrázek 50: Detail hydraulického mechanismu natáčení úhlu náběhu listů lopatek [36] .....	48
Obrázek 51: Detail elektrického mechanismu natáčení úhlu náběhu lopatek [36] .....	48
Obrázek 52: Řez DD HAWT [36].....	49
Obrázek 53: Porovnání velikosti větrných elektráren [38].....	49
Obrázek 54: Schéma rozmístění větrných turbín [40] .....	50
Obrázek 55: Úplav za větrnými turbínami zvýrazněný díky mlze [41].....	50
Obrázek 56: Princip funkce odporové turbíny [28] .....	53
Obrázek 57: Savoniova VAWT [28].....	53
Obrázek 58: Rychlostní a silový rozklad na listu DVAWT [48].....	54
Obrázek 59: Silový rozklad pro DVAWT s více lopatkami [48] .....	55
Obrázek 60: Théta-Darrieus VAWT [28].....	55
Obrázek 61: H-Darrieus VAWT [28].....	55
Obrázek 62: Gorlovova VAWT [50].....	55
Obrázek 63: Závislosti poměru $C_L/C_D$ na relativní tloušťce profilu (RT) pro různé úhly náběhu pro symetrické profily [49].....	58
Obrázek 64: Závislosti poměru $C_L/C_D$ na relativní tloušťce profilu (RT) pro různé úhly náběhu pro asymetrické profily s různými tvary středící křivky [49].....	58
Obrázek 65: Závislost aerodynamické účinnosti na koeficientu rychloběžnosti a počtu lopatek [49].....	59
Obrázek 66: Závislost aerodynamické účinnosti na poměru $c/R$ [49].....	60
Obrázek 67: Závislost aerodynamické účinnosti na poměru $h/R$ [49].....	61
Obrázek 68: Rychlostní rozklad pro DVAWT [56] .....	61
Obrázek 69: Rychlostní rozklad pro DVAWT s nenulovým úhlem náběhu [57].....	62
Obrázek 70: Porovnání jednotlivých úhlů dopadu $\beta$ [57].....	63
Obrázek 71: Souřadnicový systém použitý ve vyhodnocení výsledků studie [57].....	63
Obrázek 72: Závislosti aerodynamické účinnosti na různých úhlech natočení [49] .....	63
Obrázek 73: Okamžitá účinnost při různých úhlech polohy [49].....	64
Obrázek 74: Profil lopatky VAWT se slotem [58].....	65
Obrázek 75: Možnosti úprav konců lopatek S-VAWT [49].....	65
Obrázek 76: Kombinovaná VAWT (SVAWT+DVAWT) [50] .....	65
Obrázek 77: 24 SVAWT umístěných na střeše budovy Oklahoma medical research foundation v Oklahomě, USA [59].....	66
Obrázek 78: SVAWT umístěné do prúdůch skrz mrakodrap Pearl River Tower v Guangzhou, Čína [60].....	66



Obrázek 79: SVAWT jako zdroj energie pro telekomunikační věž [61].....	66
Obrázek 80: SVAWT jako zdroj energie pro pouliční lampy [61] .....	66
Obrázek 81: Koncept OFFS farmy s využitím S-VAWT elektráren [39].....	67
Obrázek 82: DAWT, větrná turbína s difuzorem [71].....	70
Obrázek 83: Větrná turbína s více rotory od firmy VESTAS [69].....	70
Obrázek 84: Vznášející se větrná turbína [70].....	70
Obrázek 85: Rozměry větrného tunelu [mm] .....	71
Obrázek 86: Zvýraznění oblasti návrhu, volba počtu lopatek (obr. č.65), [49] .....	72
Obrázek 87: Zvýraznění oblasti návrhu, volba poměru c/R (obr. č. 66), [49].....	73
Obrázek 88: Zvýraznění oblasti návrhu, volba leteckého profilu (obr. č. 63), [49] .....	74
Obrázek 89: Závislost výkonu navrhované S-VAWT na rychlosti větru .....	75
Obrázek 90: Rotor navrhnuté S-VAWT .....	78
Obrázek 91: Rozkládací sestava rotoru navrhnuté S-VAWT .....	78
Obrázek 92: Navržená S-VAWT s nainstalovanou převodovkou .....	79
Obrázek 93: Navržená S-VAWT s odinstalovanou převodovkou.....	79
Obrázek 94: Možnosti úprav konfigurace rotoru S-VAWT .....	80
Obrázek 95: S-VAWT přestavěná na Savoniovu VAWT .....	81
Obrázek 96: Blokové schéma rozpracování úlohy.....	81

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Povětrnostní třídy dle IEC 61400 .....	51
Tabulka 2: Souhrn komerčně dostupných VAWT nižších výkonů vhodných pro využití v decentralizované energetice a k instalaci na střechy budov.....	68