



CHALMERS



Framtagning och utprovning av modell för vertikalaxlat vindkraftverk

Kandidatarbete inom Mekanik och maritima vetenskaper

Olle Bjurström
William Daarstad Skúlason
Leo Engström
Johan Marklund
Malte Torshage
Erland Winter

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE I MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

Framtagning och utprovning av modell för vertikalaxlat vindkraftverk

Ett kandidatarbete genomfört vårterminen 2025

Olle Bjurström
William Daarstad Skúlason
Leo Engström
Johan Marklund
Malte Torshage
Erland Winter



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Strömningslära
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Framtagning och utprovning av modell för vertikalaxlat vindkraftverk
Olle Bjurström
William Daarstad Skúlason
Leo Engström
Johan Marklund
Malte Torshage
Erland Winter

© Olle Bjurström, William Daarstad Skúlason, Leo Engström,
Malte Torshage, Johan Marklund, Erland Winter, 2025.

Handledare: Valery Chernoray, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Examinator: Isak Jonsson, Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Bild på den slutgiltiga prototypen.

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2025

Framtagning och utprovning av modell för vertikalaxlat vindkraftverk
Olle Bjurström, William Daarstad Skúlason, Leo Engström,
Johan Marklund, Malte Torshage, Erland Winter
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Laboratory of Fluids and Thermal Sciences,
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

In this bachelor's thesis, both theoretical and practical studies on a vertical axis wind turbine, VAWT, were performed by designing and building a prototype as a reference. Simulations and wind tunnel tests were performed at Chalmers' wind tunnel laboratory with the goal of analyzing and comparing the performance of the prototype with initial theoretical performance estimations and predictions. The primary focus was on power output and aerodynamic forces acting on the wind turbine at different wind speeds.

Wind tunnel tests and computational simulations in StarCCM+ were used to evaluate the turbine's efficiency at specific wind speeds and its overall performance compared to theoretical predictions using equations related to fluid dynamics. The results showed a maximum measured power coefficient, C_p , of 14.7% at a wind speed of 8.4 m/s and a Tip Speed Ratio, TSR, of 1.78. Comparisons between measured wind tunnel data and simulations showed poor agreement in terms of power output. The discrepancies were partly due to the choice of measurement equipment and how aerodynamic and mechanical losses were accounted for. This thesis provides insight into the advantages, disadvantages, and limitations of vertical axis wind turbines and may serve as a foundation for further research in renewable energy technologies.

Sammanfattning

I detta kandidatarbete har teoretiska och praktiska studier genomförts med en dimensionerad och konstruerad prototyp av ett vertikalaxlat vindkraftverk som referens. Studier i simuleringsmjukvara och vindtunneltester i Chalmers vindtunnel-laboratorium utfördes med syftet att analysera samt jämföra prestandan mellan den framtagna prototypen och initiala beräkningar. Värden av högst intresse var vindkraftverkets effektutvinning och storleken på verkande krafter under olika vindhastigheter.

Vindtunneltester och datorsimuleringar i StarCCM+ skulle visa effektiviteten av vindkraftverket vid specifika vindhastigheter och modellens generella prestanda jämfört med teoretiska beräkningar med strömningsmekaniska ekvationer. Resultaten från dessa gav en högst uppmätta effektkoefficient, C_p , på 14.7 % vid en vindhastighet på 8.4 m/s och Tip Speed Ratio, TSR, på 1.78. Jämförelser mellan uppmätta vindtunneldata och simuleringar visade dålig överensstämmelse vad gäller effektuttag. Avvikelserna berodde bland annat på val av mätutrustning samt hur aerodynamiska och mekaniska förluster beaktades. Kandidatarbetet ger inblick i både fördelarna, nackdelarna och begränsningar hos vertikalaxlade vindkraftverk och kan samt vara ett underlag för vidare forskning av vindkraftverk som en källa för förnybar energi.

Förord

Detta kandidatarbete har genomförts under vårterminen 2025 vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper på Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet innefattar ett fördjupning inom studierna av vindkraftverk, iterativ produktframtagning och tillämpning av praktiska tester samt teoretiska beräkningar för analys av ett konstruerat vindkraftverk.

Författarnas tack

Gruppen vill säga ett stort tack till vår handledare Valery Chernoray och examinator Isak Jonsson vid Chalmers Tekniska Högskola för deras vägledning, värdefulla feedback och kontinuerliga stöd under arbetets gång. Vi är tacksamma för deras tålamod och villighet att alltid hjälpa till. Utan deras vilja att dela med sig av sin erfarenhet och kunnighet hade detta arbete inte varit möjligt. En stort tack också till Chalmers Tekniska Högskola.

MMSX21-VT25-091, Göteborg, Maj, 2025

Nomenklatur och akronymer

Nedan är listan över variabler, parametrar och akronymer som använts i detta arbete sorterat i alfabetisk ordning.

Akronymer

Begrepp	Beskrivning
Anfallsvinkel	Vinkel mellan kordlinje och flödesriktning
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAWT	Horisontal Axis Wind Turbine
Inställningsvinkel	Vinkeln mellan kordlinjen och en referenslinje
Korda	Sträcka mellan framkant och bakkant på en ving
rpm	Revolutions per minute (varv per minut)
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

Variabler/Parametrar

Symbol	Beskrivning	Enhet
A	Area	m^2
C_d	Luftmotståndskoefficient	-
C_l	Lyftkraftskoefficient	-
C_p	Effektkoefficient	-
d	Axeldiameter	m
D	Diameter på vindkraftverket	m
F_D	Dragkraft	N

Symbol	Beskrivning	Enhet
F_L	Lyftkraft	N
F_d	Böjkraften upplevd	N
H	Höjd	m
k_t	Vridkonstant	Nm/A
k_v	Hastighetskonstant	rpm/V
l	Längd	m
L_c	Karaktäristisk längd	m
M	Moment	Nm
M_d	Böjmoment	Nm
M_v	Vridmoment	Nm
P	Effekt	W
P_g	Effekt genererad i generator	W
P_m	Effekt beräknad från moment i våg	W
P_v	Potential i luftflödet	W
P_{WT}	Effekt utvunnet av ett VAWT	W
r	Radie	m
Re	Reynolds tal	-
U	Spänning från motor	V
v	Hastighet	m/s
β	Blockage ratio	%
η	Verkningsgrad	-
λ	Tip Speed Ratio	-
μ	Dynamisk viskositet	$Pa\cdot s$
ω	Vinkelhastighet	rad/s
ρ	Densitet	kg/m^3
σ	Spänning	Pa

Innehåll

Nomenklatur	ix
Figurer	xiii
Tabeller	xiv
1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Mål	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Lyftbaserade VAWT	4
2.2 Dragbaserade VAWT	5
2.3 Tillgänglig effekt i luften	5
2.4 Betz lag	6
2.5 Krafter, moment och spänningar	6
2.6 Tip Speed Ratio	7
2.7 Generator	8
2.8 Blockeringsandel	8
2.9 Reynolds-talet	9
2.10 CFD	9
3 Modell- och prototypframtagning	10
3.1 Val av modell	11
3.2 Variabelvärden	11
3.3 Dimensionering av längd och diameter	12
3.4 Dimensionering av axel	12
3.5 Design av vingblad	13
3.5.1 Antal vingblad	13
3.5.2 Vingprofil	13
3.5.3 Inställningsvinkel och fästpunkt	13
3.5.4 Korda	14
3.6 Dimensionering av generator	15
3.7 Summering av designparametrar	16
3.8 Komponentframtagning och montering	17

4	Vindtunneltester och iteration	19
4.1	Test 1	21
4.1.1	Förändringar	21
4.2	Test 2	21
4.2.1	Förändringar	22
4.3	Test 3	22
4.3.1	Förändringar	22
4.4	Test 4	23
4.4.1	Förändringar	23
4.5	Test 5	23
5	CFD	24
5.1	Inställningar för simulering	25
5.2	Utförande av simulering	27
6	Resultat	28
6.1	Prototyp	28
6.2	Vindtunneltester	29
6.3	CFD-simulering	31
7	Diskussion	35
7.1	Prototyp	35
7.2	CFD	35
7.3	Vindtunneltester	36
7.4	Jämförelse av resultat	37
7.5	Fortsatt arbete	38
8	Slutsats	39
A	Appendix 1	I

Figurer

2.1	Illustration av lyftbaserade VAWT	4
2.2	Illustration av dragbaserad VAWT	5
3.1	Modell- och prototypframtagningens delsteg	10
3.2	Olika typer av VAWT	11
3.3	Dimensioner för vindtunnel	12
3.4	Lyftkraft mot luftmotstånd vid olika anfallsvinklar och Reynolds-tal .	14
3.5	Schematisk bild över kalibreringsriggen	15
3.6	Preliminär CAD-modell av vindkraftverket	17
3.7	Preliminär prototyp	18
4.1	Delsteg för tester	19
4.2	Schematisk bild över vindtunneln	20
4.3	Kopplingsschema för vindtunneltesterna	20
4.4	Bild på balanseringsjiggen	21
4.5	Jiggar 8° , 0° , 4° , -4°	22
5.1	Delsteg i simuleringen	24
5.2	Hela beräkningsnätet	25
5.3	Beräkningsnät runt kraftverket	26
5.4	Beräkningsnät runt ett vingblad	26
6.1	Slutgiltig modell monterad i vindtunnel	28
6.2	Resultat från vindtunneltester	30
6.3	C_p vid varierad TSR för respektive inställningsvinklar	30
6.4	Moment och kraft på ett vingblad	31
6.5	Moment på ett vingblad	32
6.6	Kraftmagnitud på ett vingblad	32
6.7	Vinkel av resulterande kraft på ett vingblad	33
6.8	Skalärscen med hastighet i x-led, hela vindtunneln	33
6.9	Skalärscen med hastighet i x-led, VAWT	33
6.10	Skalärscen med hastighet i x-led, förstoraad	34
A.1	Residuals under CFD-simulering	I

Tabeller

3.1	Kontrollberäknings variabler	13
3.2	Verkande kraft, moment och spänning	13
3.3	Beräkningsvärden	15
3.4	Värden från kalibreringen	15
3.5	Tekniska specifikationer	16
6.1	Mätvärden för test med inställningsvinkel på 4 grader	29
6.2	Mätvärden för test med inställningsvinkel på 8 grader	29
6.3	Data från CFD	31

1

Inledning

Idag ligger mycket fokus på att övergå från användning av fossila bränslen till ett större tillit på förnyelsebar energikällor för att bekämpa klimatpåverkan. En metod för att producera elektrisk energi är att använda sig av vindkraft. I övergången till ett mer hållbart och förnyelsebart energisystem är vindkraften en växande källa för elproduktion och energiförsörjning. Vindkraften stod under 2023 för totalt 21% av Sveriges elproduktion vilket motsvarar omkring 35000 GWh [1]. Enligt siffror publicerad av statistikmyndigheten SCB passerade antalet vindkraftsetableringar i bruk i Sverige 5200, och från och med 2022 finns vindkraftverk i 200 av Sveriges 290 kommuner. Under de senaste 20 åren har detta motsvarat en ökning på närmare 880% [2]. Detta är en siffra som med god sannolikhet kommer stiga stadigt de kommande åren med över 300 nytillkomna vindkraftverk etablerade under 2023 [1].

Det finns två typer av vindkraftverk i bruk idag. Vertikal-axlade vindkraftverk, VAWT, och horisontal-axlade vindkraftverk, HAWT. HAWT är vindkraftverksmodellen vanligtvis förknippad med vindkraftproduktion. Majoriteten av alla vindkraftverk byggda i vindkraftsparker och till havs är av typen HAWT. VAWT förekommer främst inom forskning och som prototyper. Anledningen bakom populariteten av HAWT är huvudsakligen på grund av dess jämförelsevis högre verkningsgrad, längre livslängd och färre underhållningsbehov [3]. HAWT har dock problem när det kommer till ljudnivån. Forskning visar att personer som bor nära HAWT kan uppleva försämrad sömn [4] och att VAWT är tystare än HAWT samt att de fungerar bättre vid turbulenta förhållanden [5].

Fortsatt forskning inom vindkraft är intressant för att fortsätta minska klimatpåverkan. Eftersom VAWT är ett understuderat område jämfört med HAWT är det intressant att lägga extra fokus på denna typ av modell då de kan fungera som både komplement till HAWT [6] men också som ett alternativ i miljöer där HAWT inte lämpar sig.

1.1 Syfte

Syftet är att genomföra ett arbete om vertikala vindkraftverk på institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper på Chalmers tekniska högskola. Uppgiften är att bygga ett vertikalexlat vindkraftverk anpassat för teoretiska beräkningar och praktiska tester i Chalmers vindtunnellaboratorium. VAWT är en modell av vindkraftverk med en central vertikal axel som bildar moment från vingprofiler i rotation koncentriskt till axeln. Arbetet innefattar framställningen av rotorblad genom additiv tillverkning, konstruktionen av ett fullständigt fungerande vindkraftverk och jämförelser mellan beräkningar och tester.

Efter arbetets slut ska vindkraftverksmodellen kunna användas både som undervisningsmaterial och hjälpmedel för utförandet av ytterligare studier av vertikala vindkraftverk.

1.2 Mål

Målet med kandidatarbetet är att ta fram en prototyp av ett vertikalexlat vindkraftverk som kan generera effekt. Denna skall sedan testas i en vindtunnel och dess resultat skall analyseras. Resultaten skall jämföras med CFD simuleringar vid liknande förhållanden, för att undersöka hur väl mätvärdena stämmer överens. Den slutgiltiga prototypen skall sedan kunna användas som undervisningsunderlag.

1.3 Avgränsningar

Arbetet har avgränsningar relaterade till kostnad, skala och testning. Projektet utförs som ett kandidatarbete på Chalmers Tekniska Universitet som pågår under vårterminen 2025. Arbetet har blivit tilldelat en budget på 5000 kr för inköp av material, prototyp tillverkning. Utifrån projektets avgränsningar togs beslutet att enbart en prototyp skulle byggas eftersom stort fokus lades på att säkerställa god konstruktionskvalitet och väl genomförda praktiska tester.

Utöver detta sattes begränsningar gällande skalan av beräkningarna och datainsamlingen. Den begränsade tillgängligheten av särskilda simuleringsdatorer avgränsar detaljnivån på datorassisterade beräkningar.

2

Teori

För att jämföra teoretiska beräkningar med uppmätta resultat från praktiska vind-tunneltester behövdes kvantitativa värden. Preliminära beräkningar innefattade effektutveckling, verkande lyft- och motståndskrafter samt moment. Dessa beräkningar tar hänsyn till aerodynamiska och mekaniska förluster, samt approximerar vindkraftverkets utformning för att förenkla uträkningar.

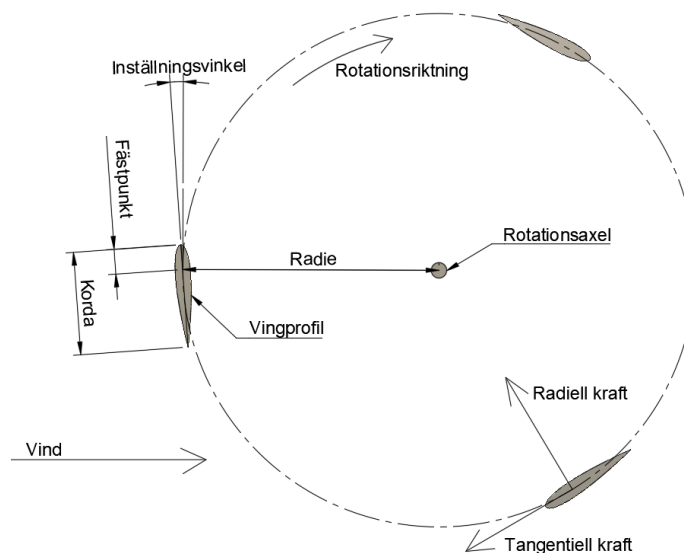
Principen bakom alla typer av vindkraftverk är att utnyttja luftens rörelseenergi. Med hjälp av noggrant designade vingblad kan luftens rörelseenergi utnyttjas för att skapa en rotation runt en axel. Denna axel är monterad till en generator som slutligen omvandlar den roterande rörelseenergin till elektrisk energi.

Det finns 2 typer av vindkraftverk, HAWT och VAWT. Principen bakom elproduktionen av respektive modell förblir liknande, men med skilda rotationsaxlar. HAWT roterar runt den horisontella axeln medan VAWT roterar runt den vertikala axeln. Detta projekt handlar som tidigare nämnt om VAWT och därmed innefattar teorin bara beräkningar som är anpassade för detta.

Det finns två huvudsakliga typer av VAWT, lyftbaserade och dragbaserade. Principen bakom energiomvandlingen förblir densamma för båda varianterna förutom om de använder lyft- eller dragkrafter för att skapa rotation. Utformningen av profilerna bestämmer vilken typ av kraft som driver rotationen. I detta projekt är verkande krafter lyftbaserade.

2.1 Lyftbaserade VAWT

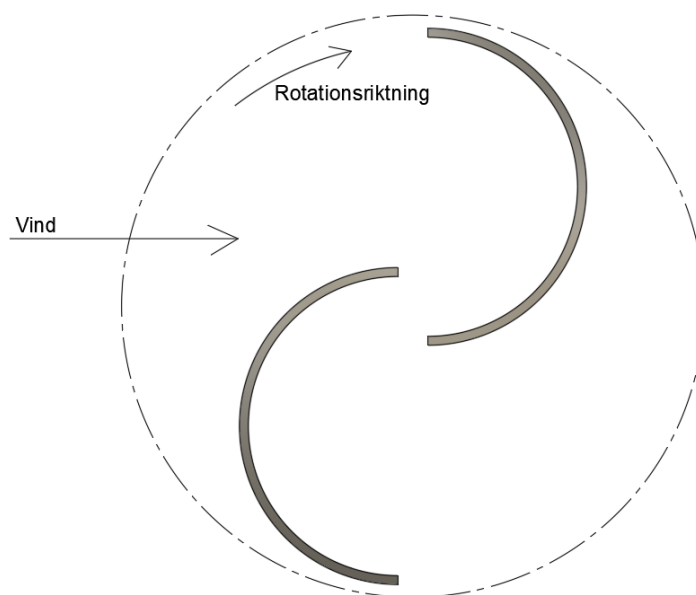
Lyftbaserade VAWT, även kallade Darrieus VAWT är en typ av vertikalaxlade vindkraftverk som omvandlar luftens energi till roterande energi genom att skapa lyftkrafter som i sin tur leder till ett vridmoment. De använder vingprofilsformade vingblad för att skapa en radiell kraft och en tangentiell kraft från luften, se figur 2.1. Den tangentiella kraften skapar huvudsakligen det roterande momentet. Beroende på vart i rotationen bladet befinner sig kommer anfallsvinkeln variera, vilket leder till att kraftens magnitud förändras. Detta betyder att de lyftbaserade vindkraftverkens förmåga att skapa rotation varierar beroende på var i rotationen vingbladen befinner sig. Momentet och som följd effekten varierar därmed oscillerande under rotationen.



Figur 2.1: Illustration av lyftbaserade VAWT

2.2 Dragbaserade VAWT

Dragbaserade VAWT, även kallade Savonius VAWT, är en typ av vindkraftverk som skapar rotation genom att utnyttja dragkrafter genererade av passerande vindflöden. Savonius VAWT består av en skovel med en konkav och en konvex sida, se figur 2.2. Den konkava sidan har högre luftmotstånd än den konvexa sidan vilket resulterar i en tangentiell kraft som roterar kraftverket.



Figur 2.2: Illustration av dragbaserad VAWT

2.3 Tillgänglig effekt i luften

Den effekt som genereras av vindkraftverket sker i omvandlingen av passerade vindens rörelseenergi. För att uppnå maximal effekt bör därför dimensionering, design och placering av vindkraftverket noggrant väljas för att erhålla optimala elproduktionsförhållanden.

Ekvation 2.1 beräknar den totala utvinnbara effekten i det passerande vindflödet utifrån en given frontalarea, vindhastighet och genomsnittligt värde på luftens densitet. Frontalarean är den yta som tas upp av vindkraftverket i vindens riktning. Frontalarean av vindkraftverket är rektangulär och beräknas därmed som produkten av diametern och höjden. Ekvation 2.2 gör denna omskrivning.

$$P_v = 0.5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (2.1)$$

$$A = D \cdot H \Rightarrow P_{WT} = 0.5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot D \cdot H \quad (2.2)$$

För att beräkna vindkraftverkets genererade effekt behövs effektkoefficienten C_P som beskriver hur stor del av vindens energi som omvandlas till rörelseenergi i vindkraftverket.

$$P_v = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot D \cdot H \quad (2.3)$$

C_P tar hänsyn till uppstående aerodynamiska och mekaniska förluster som begränsar vindkraftverkets utvinning av luftmassans kinetiska energi. Vindkraftverkets maximala utvinningsförmåga är i praktiken som högst omkring 59% och vars teoretiska gräns för energiomvandling är begränsad av Betz lag.

2.4 Betz lag

Betz lag säger att ett vindkraftverk med optimal utformning och rörelseenergiutvinning kan maximalt utvinna 59.3% av energin från luftflödet som passerar rotorbladen, eftersom luften inte kan stanna direkt efter att den passerat vindkraftverket.

Då vindkraftverket utvinner energi reduceras hastigheten på luftflödet när luften passerar det. Ifall vindkraftverket kunde utvinna all energi ur luften hade dess hastighet reducerats till 0 m/s. Detta skulle förhindra mer luft från att passera, vilket hade lett till att fortsatt energiomvandling stoppas, då ingen rörelse skulle kvarstå för att driva rotorbladsrotationen.

2.5 Krafter, moment och spänningar

Utöver en effekt ger det passerande luftflödet upphov till en kraft på rotationsaxeln. Kraften orsakar ett böjande moment och därmed en böjspänning. Detta gör det nödvändigt att analysera kraften och dess inverkan då dimensioneringen av vindkraftverket påverkas av magnitud.

Kraften radiellt på vindkraftverket uppstår i form av en dragkraft som skapas av vinden. Därmed behöver dragkoefficienten C_d beräknas. För att lättare uppskatta storleken på dragkoefficienten approximeras vindkraftverket som en cylinder. Extern experimentell data visar ett samband mellan C_d och förhållandet mellan höjden och diametern för cylindrar. Vid ett känt förhållande mellan höjden och diametern på vindkraftverket kan därefter C_d approximeras.

Då C_d har framtagits kan dragkraften beräknas med följande ekvation:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A_p \quad (2.4)$$

Faktorn A_p är den projicerade arean vinkelrätt mot luftflödet. Denna area varierar konstant till följd av rotationen. Den kan dock estimeras till vindkraftverkets frontalarea till följd av den snabba rotationen.

$$A_p = H \cdot D \Rightarrow F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 (H \cdot D) \quad (2.5)$$

Eftersom axeln är statiskt inspänd i nedre änden och fri i övre änden kan böjmomentet beräknas som dragkraften multiplicerat med halva höjden.

$$M_d = \frac{F_d \cdot H}{2} \quad (2.6)$$

Då M_d är definierad kan spänningen i vindkraftverkets centrala axel också beräknas. Eftersom ekvationerna här berör en cirkulär axel används tillhörande representativa böjmotståndsekvation, W_{cirk} :

$$\sigma_a = \frac{M_d}{W_{cirk}} = \frac{M}{\pi(\frac{d}{2})^3/4} = \frac{4M}{\pi(\frac{d}{2})^3} \quad (2.7)$$

Dragkraften, böjmomentet och axelspänningen är viktiga parametrar då dimensioneringen och materialvalet utgår från dessa värden.

2.6 Tip Speed Ratio

För att designa ett effektivt vindkraftverk som klarar av dessa belastningar är det viktigt att ta hänsyn till förhållandet mellan turbinens randhastighet och luftströmmens hastighet. Detta förhållande för det vertikala vindkraftverket kallas Tip Speed Ratio, TSR och betecknas i följande ekvationer λ .

Ekvation 2.8 är en omskrivning av den generella vinkelhastighetsekvationen med insättning av λ . Dessutom byts radien ut mot halva diametern. Detta ger en vinkelhastighet i rad/s . Ekvation 2.9 omvandlar vinkelhastigheten till varvtalet i rpm .

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{\lambda v}{\frac{D}{2}} = \frac{2\lambda v}{D} \quad (2.8)$$

$$rpm = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (2.9)$$

Med känt varvtal kan motorspänningen beräknas. Detta görs med hjälp av hastighetskonstanten k_v . Detta är en konstant som beror på motorn och oftast återfinns i databladet. Slutligen kan vridmomentet beräknas vid känd rotationshastighet och effekt, se ekvation 2.11

$$rpm_{motor} = k_v U \Rightarrow U = \frac{rpm_{motor}}{k_v} \quad (2.10)$$

$$P = \omega M_v \Rightarrow M_v = \frac{P}{\omega} \quad (2.11)$$

2.7 Generator

En generator är en komponent som omvandlar mekanisk roterande energi till elektrisk energi genom elektromagnetisk induktion. Det finns många olika typer av generatorer som passar olika syften, applikationer och dimensioner. Vissa typer av motorer kan agera som generatorer. Till dessa hör bland annat likströmsmotorer och stegmotorer baserade på permanentmagneter.

För att bestämma en lämplig generator som kan hantera krafterna från turbinen, motstå det skiftande varvtalet och överföra rörelseenergin behövs ett antal viktiga variabler bestämmas. För en vald generator finns krav på bland annat nominellt vridmoment, ström, spänning och rotationshastighet.

Vinkelhastigheten, ω , kan bestämmas genom att hitta randhastigheten av vindkraftverkets rotorblad. v betecknar vindhastigheten och är beroende på λ . λ påverkar varvtalet, vilket i sin tur styr generatorvalet.

Vinkelhastigheten och vridmoment kan bestämmas med ekvationer 2.9 och 2.8. Slutligen kan det nominella strömbehovet för generatorn bestämmas genom att beräkna kvoten mellan vridmoment och vridkonstanten.

$$I = \frac{M_v}{k_t} \quad (2.12)$$

Med samtliga ekvationer kan en generator som passar prototypen väljas.

2.8 Blockeringsandel

Blockeringsandelen (β) är ett mått på hur stor andel av vindtunnelns tvärsnittsarea som vindkraftverket blockerar i vindens riktning. Det är en nödvändig variabel att analysera då den påverkar effektkoefficienten, C_p , drastiskt.

$$\beta = \frac{A_{VAWT}}{A_{tot}} \quad (2.13)$$

2.9 Reynolds-talet

Vindkraftverket och dess prestanda är direkt beroende på luftflödet och dess beteende. Det är nödvändigt att analysera luftens egenskaper och hur de påverkar effektiviteten. Detta kan göras med hjälp av det dimensionslösa Reynolds-talet. Detta tal är ett förhållande mellan tröghetskrafter och viskösa krafter i fluiden. Reynolds-talet är där med ett mått på hur turbulent flödet är och ger en övergång från laminärt till turbulent flöde.

Den generella formeln för Reynoldstalet kan ses i ekvation 2.14, där L_c är den karakteristiska längden för det specifika fallet. För en cylinder i tvärflöde är L_c cylinderns diameter, medan för en vingprofil är L_c dess korda.

$$Re = \frac{\rho V_{vind} L_c}{\mu} = \frac{V_{vind} L_c}{\nu} \quad (2.14)$$

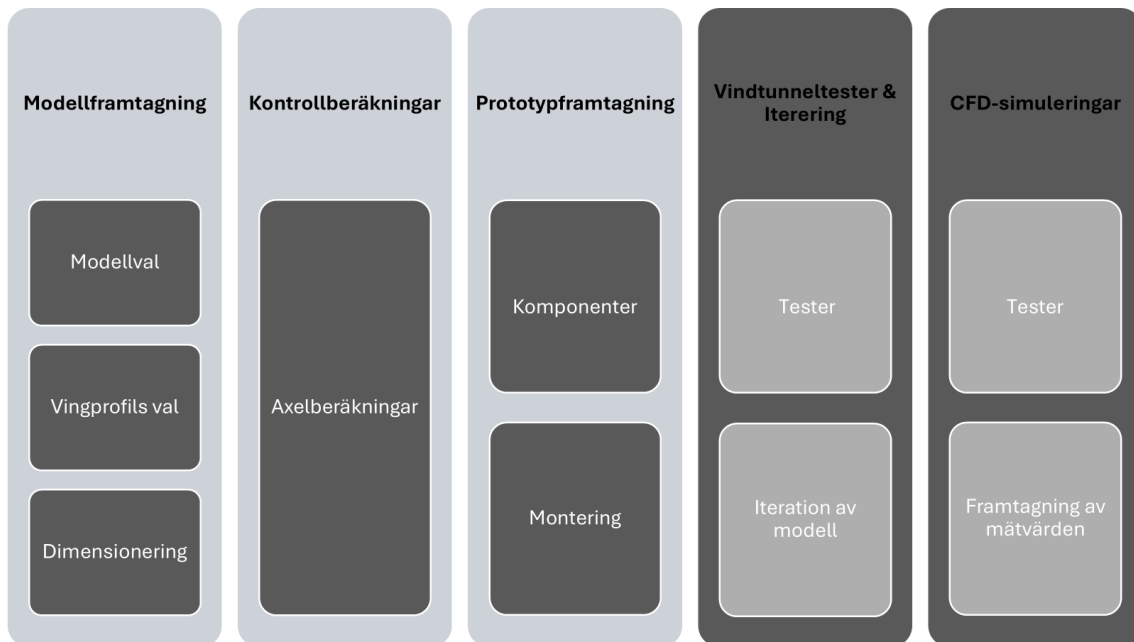
2.10 CFD

Computational Fluid Dynamics, CFD, är ett numeriskt verktyg som används för att analysera flöden. Objektet som undersöks delas upp i nätverk av mindre celler benämnt beräkningsnät. Verktöget approximerar sedan flödet kring beräkningsnätet genom iteration med finita volymmetoden, finita elementmetoden eller finita differensmetoden.

3

Modell- och prototypframtagning

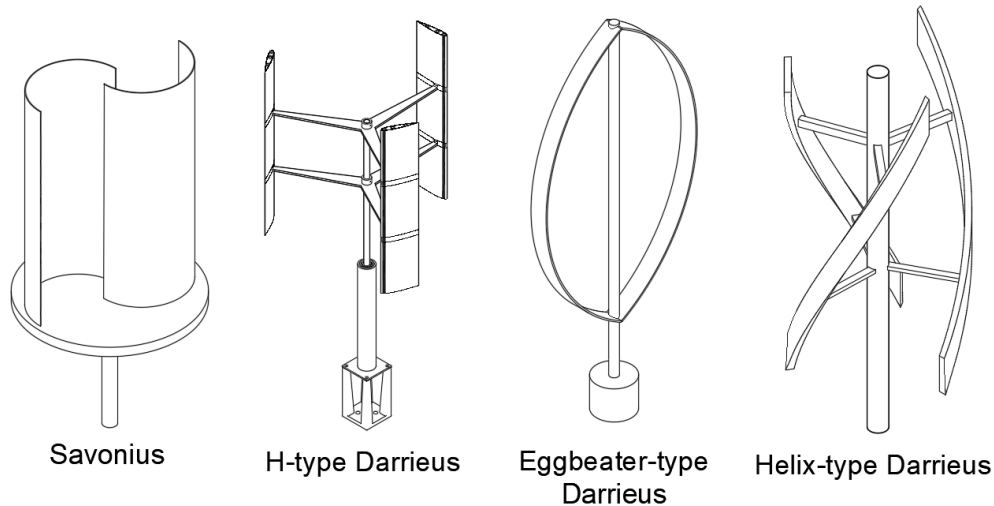
Projektets omfattande storlek medförde att arbetet delades upp mindre delsteg. Detta gjordes för att kartlägga arbetet och effektivt utnyttja den tillgängliga tiden. I figur 3.1 illustreras hur arbetet var uppdelat. Kapitel 3 innehåller modellframtagning, kontrollberäkningar och prototypframtagning.



Figur 3.1: Modell- och prototypframtagningens delsteg

3.1 Val av modell

Utifrån projektets avgränsningar beslutades det att enbart en prototyp skulle tillverkas. Därmed behövdes ett beslut fattas över vilken variant av VAWT som skulle konstrueras. VAWT förekommer i flera olika modeller, se figur 3.2.



Figur 3.2: Olika typer av VAWT

Det finns två huvudsakliga typer av VAWT:s: Darrieus och Savonius. Darrieus skapar rotation via lyftkraft och Savonius skapar rotation via dragkraft. Beslutet togs att typen skulle vara Darrieus då dessa har potential att uppnå högre effektkoefficient, C_p , än Savonius [7].

Darrieus VAWT förekommer i flera olika modeller, se figur 3.2, Darrieus-H valdes som modell. Motivationen bakom modellvalet var dess jämförelsevis enkla design som möjliggör en snabbare tillverkningsprocess. En enklare design som är lättare att arbeta med ger säkrare resultat och möjlighet till snabbare förändringar.

3.2 Variabelvärden

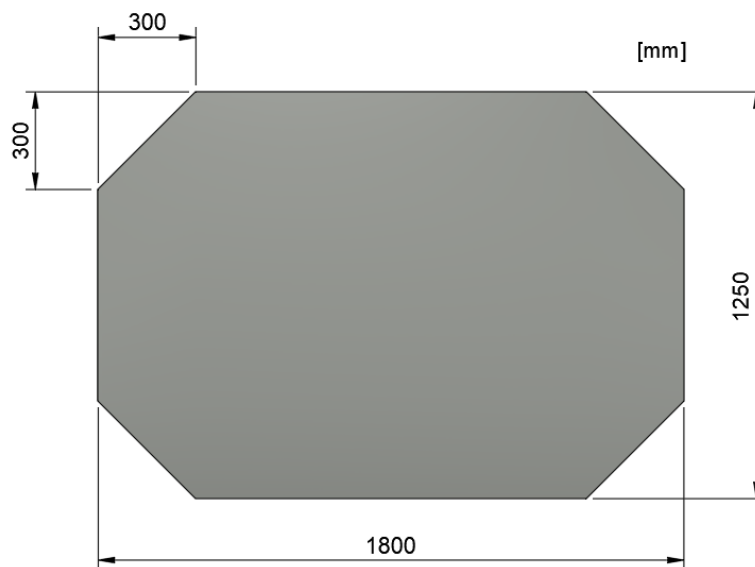
Under modellframtagningen gjordes olika beräkningar för att dimensionerna komponenterna för att klara drift i liknande förhållanden. En marknadsundersökning visade att modellen har varierande nominell vindhastighet men att $10 \frac{m}{s}$ var bland de vanligare [8].

TSR beslutades utifrån tidigare forskning som visade att ett värde på runt 2.6 var optimalt [9]. För att underlätta beräkningar valdes $\lambda = 2.5$.

3.3 Dimensionering av längd och diameter

Eftersom vindtunneln som användes vid testerna har en begränsad tvärsnittsarea fanns risken att väggarna kunde påverka resultaten från testerna. Det var därför nödvändigt att förstå hur stor inverkan tunnelns väggar har på effekten. Data från tidigare forskning visar att tunnelns väggar inte bidrar med ökad påverkan inom *blockage ratio*-spannet 3.5 – 13.4% [10].

Överskrids spannet syns tydliga ökning av C_p vilket tyder på att väggarna har en direkt påverkan på resultatet. För att undvika detta beslutades det att *blockage ratio* skulle hållas inom spannet.



Figur 3.3: Dimensioner för vindtunnel

Vindtunneln har en tvärsnittsarea på $2.07m^2$, se figur 3.3 för dimensioner. Preliminärt valdes både diameter och längd till $0.4m$ vilket ger ett *blockage ratio* på 7.7%. Diametern är den svepta cirkeln sett ovanifrån och längden syftar på vingbladens längd. Detta möjliggjorde fortsatta tester med ökad diameter eller längd för att undersöka hur deras förhållande påverkar effektiviteten utan att överskrida den övre gränsen.

3.4 Dimensionering av axel

Inför dimensioneringen av turbinens axel utfördes ett antal kontrollberäkningar för att säkerställa att den inte skulle haverera under drift. Krafter, moment och spänningar bestämdes med hjälp av ekvationerna 2.5, 2.6 och 2.7. Ekvationerna utfördes med värdena i tabell 3.1 och resultaten visas i tabell 3.2.

Parameter	Värde	Enhet
Höjd (h)	0.4	m
Diameter (D)	0.4	m
Lufthastighet (v)	10	$\frac{m}{s}$
Densitet (ρ)	1.2	$\frac{kg}{m^3}$
Dragkoefficient (C_d)	0.62	-
Axeldiameter (d)	12	mm

Tabell 3.1: Kontrollberäknings variabler

Betäckning	Värde	Enhet
F_d	25	N
M_d	7.5	Nm
σ	44.21	MPa

Tabell 3.2: Verkande kraft, moment och spänning

Initialt valdes $d = 12mm$ då stänger med måttet fanns tillgängliga. Utifrån beräkningarna beslutades materialet till silverstål då det klarar av en spänning på $44MPa$ och fanns i slipad form.

3.5 Design av vingblad

Nedan beskrivs hur beslut togs om antalet blad, vingprofil, inställningsvinkel och korda. Vid design av vindkraftverket behövdes flertalet beslut fattas, så som hur många blad som skulle användas, vingprofil för bladen, dess inställningsvinkeln och korda.

3.5.1 Antal vingblad

Beslut togs att modellen skulle vara av typen 3-blad. Eltayeb et al visar att en 3-bladig modell presterar bättre över olika TSR-värden än modeller med fler blad [11]. Zheng, Zhang, Wang och Zhou visar även att modeller med färre blad har sämre livslängd än flerbladiga modeller [12].

3.5.2 Vingprofil

För Darrieus-H är bladen formade som extruderade vingprofiler. I detta arbete valdes NACA0015, en symmetrisk vingprofil med ett tjocklek-till-kordaförhållande på 15%. Profilen erhåller tillräcklig inre volym för att möjliggöra placering av en axel inuti vingbladen. NACA0015 är en välstuderad profil som passar väl för konstruktioner som dessa tack vare dess tillförlitliga prestanda. Profilen har dessutom använts vid tidigare designer av vertikala vindkraftverk [13].

3.5.3 Inställningsvinkel och fästpunkt

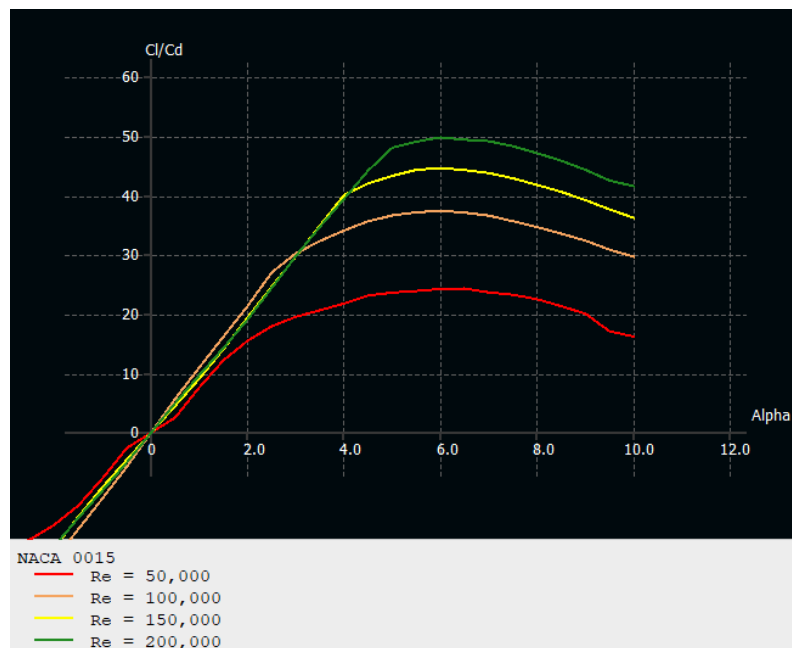
Inställningsvinkel valdes initialt till 4° och fästpunkten valdes till 25% av kordans längd räknat från framkant, se 2.1 för illustration av parametrar. Tidigare studier har använt 4° samt fästpunkt vid 25% av kordans längd och gett goda resultat [13]. Under framtagningen av modellen var möjlighet till korrigering av inställningsvinkeln ett krav.

3.5.4 Korda

På grund av skalfaktorer valdes ett korda till diameter-förhållande som är betydligt större jämfört med liknande vindkraftverk i större skala. Anledningarna till detta var främst att bladen skulle vara möjliga att tillverka.

Blad med mindre korda är svårare att producera med hög måttnoggrannhet. Mindre blad hade även gett mindre utrymme för inre strukturer, så som axlar, vilket var nödvändigt.

Den valda vingprofilen, NACA0015, förlorar prestanda (minskande C_L/C_d) vid avtagande Reynolds-tal, se figur 3.4. Datan hämtades från XFRL5, ett program som visade prestationsförmågan för NACA0015 vid olika anfallsvinklar (Alpha) samt Reynolds-tal. Reynolds-talet ligger mellan 50 000 och 200 000 där det tydligt syns hur ett lägre Reynolds-tal medför sämre prestanda över en bred mängd anfallsvinklar. Reynolds-talet är proportionellt mot kordan, se ekvation 2.14. Alltså ger en större korda en effektivare vinge.



Figur 3.4: Lyftkraft mot luftmotstånd vid olika anfallsvinklar och Reynolds-tal

Med hänsyn till dessa faktorer valdes en vinge med korda på 80 mm. Med 15% tjocklek blir vingen 12 mm tjock. Detta är tillräckligt för att få plats med en genomgående 5 mm tjock silverstålsaxel.

3.6 Dimensionering av generator

Kontrollberäkningar utfördes för att välja generator. För en VAWT är $\max(C_p) = 35\%$ [7]. Ekvation 2.1, 2.8, 2.9 och 2.11 användes med värden i tabell 3.1 samt max effektuttag för att beräkna varvtal, effekt och vridmomentet. Se tabell 3.3

Tabell 3.3: Beräkningsvärden

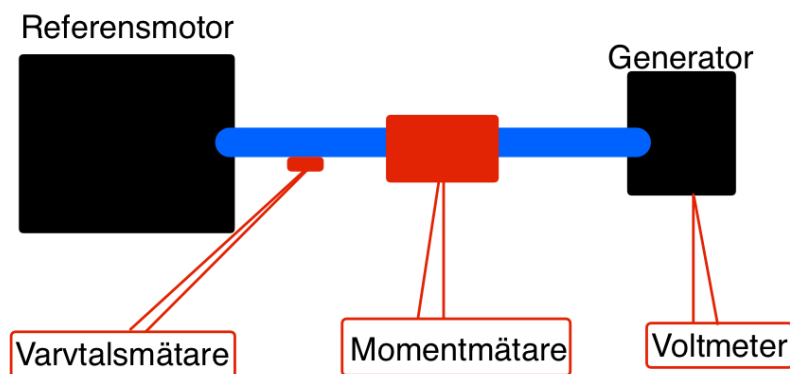
Parameter	Värde	Enhet
P	34	W
rpm	1193	$\frac{rad}{s}$
M_v	0.268	Nm

Utifrån tabell 3.3 och för säkerhetsmarginal i testerna valdes en generator på 300W och 2800rpm från Amazon [14]. Denna har en nominell spänning på 24V och maximal ström på 16.5A.

Generatoren kalibrerades för att bestämma hastighetskonstanten k_v och verkningsgraden η . Detta gjordes genom att koppla ihop generatoren med en referensmotor med känt varvtal och vridmoment, se bild 3.5. De uppmätta värdena syns i tabell 3.4.

Tabell 3.4: Värden från kalibreringen

Varvtal [rpm]	motstånd [Ω]	η [-]	k_v [V/ Ω]
597	5	0.47	141
1196	5	0.55	141
597	10	0.35	134
1196	10	0.43	134



Figur 3.5: Schematisk bild över kalibreringsriggen

3.7 Summering av designparametrar

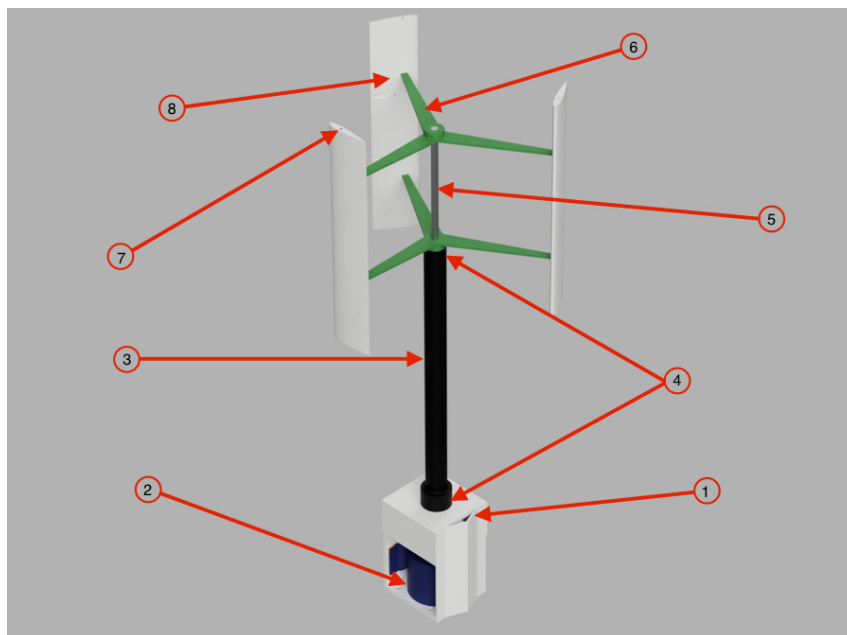
Summering av designparametrarna går att se i tabell 3.5. Parametrarna ligger till grund för prototypframtagningen.

Tabell 3.5: Tekniska specifikationer

Parameter	Värde	Enhet
Diameter (D)	400	mm
Höjd (h)	400	mm
Antal vingblad	3	st
Vingprofil	NACA0015	-
Korda	80	mm
Inställningsvinkel (kan justeras)	4	grader
Fästpunkt, från framkant	25%	%
Mittaxel diameter (d)	12	mm
Mittaxel längd	812	mm
Vingaxel diameter	5	mm
Lagerhus längd	512	mm
Avstånd mellan stag	212	mm
Motoreffekt	350	W
Maximalt varvtal motor	2800	rpm
Nominell spänning motor	24	V
Maximal ström motor	16,5	A

3.8 Komponentframtagning och montering

Utifrån valda parametrar för prototypen togs en CAD-modell fram, se bild 3.6. Den preliminära CAD-modellen bestod av följande komponenter: generatorhus(1), generator(2), lagerhus(3), kullager(4), centrumaxel(5), stag(6), vingaxlar(7) och vingprofiler(8).



Figur 3.6: Preliminär CAD-modell av vindkraftverket

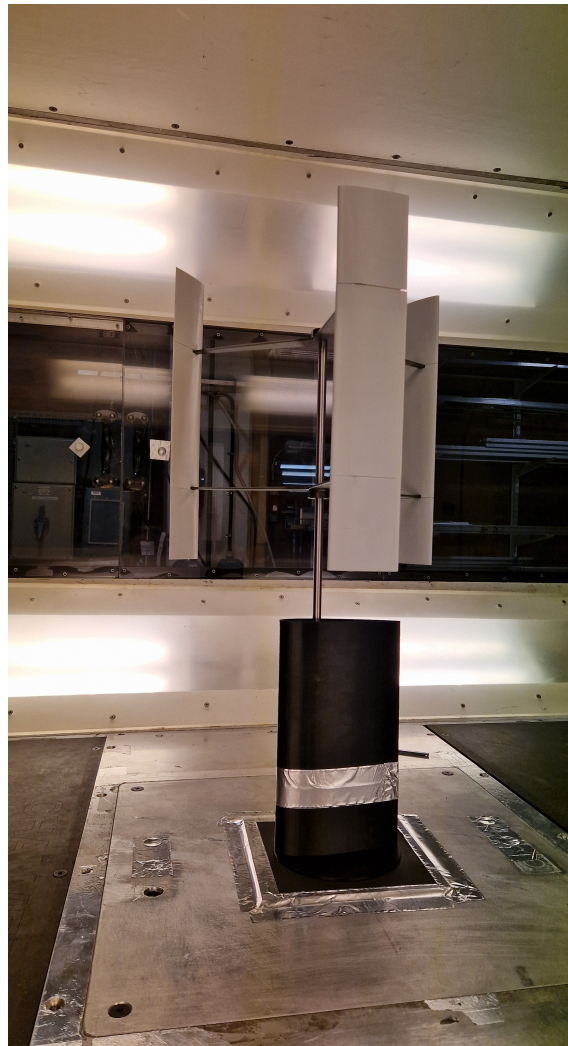
Komponenterna i CAD-modellen producerades antingen internt eller köptes in. Nedan beskrivs hur komponenterna monterades och producerades.

För att säkerställa generatorns stabilitet under drift togs ett generatorhus fram. Huset producerades med 8mm -tjocka aluminiumplattor som svetsades ihop. Hål gjordes för att fästa generatoren i sidoväggen och motorkuddar användes för att minska vibrationsöverföringar mellan komponenterna.

För att fästa centrumaxeln med generatoren användes en axelkoppling och ett lagerhus. Lagerhuset producerades internt av ett stålrör och 2 lagersäten. De monterades ovanpå generatorhuset med skruvar och i lagerhuset placerades 2 kullager som stabiliserade centrumaxeln.

För att kunna koppla samman vingprofilerna med centrumaxeln togs 2 stag samt axlar för vingprofilerna fram. Stagen sågades ut från 3mm tjock stålplåt och ytbehandlades innan hål gjordes centralt för att möjliggöra montering på centrumaxeln. Stagen fästes med hjälp av 2 ställskruvar som fästes mot centrumaxeln. Hylsor med gängade hål svetsades fast för att möjliggöra infästning av vingaxlarna. Stänger av slipat silverstål med diametern 5mm kapades till 400mm långa vingaxlar, som bidrog med ökad styvhet till vingarna.

Vingprofilerna framställdes genom 3D-skrivning, vilket underlättar framtagning av flera profiler vid behov av ändringar. Framställning kunde ske med två olika material, PETG eller PLA. PETG användes då det inte är lika sprött som PLA. Vingprofilerna bestod av tre separata sektioner. De övre och undre sektionerna kunde demonteras medan den centrala delen var fäst till vingaxeln. Den preliminära prototypen syns nedan i bild 3.7.

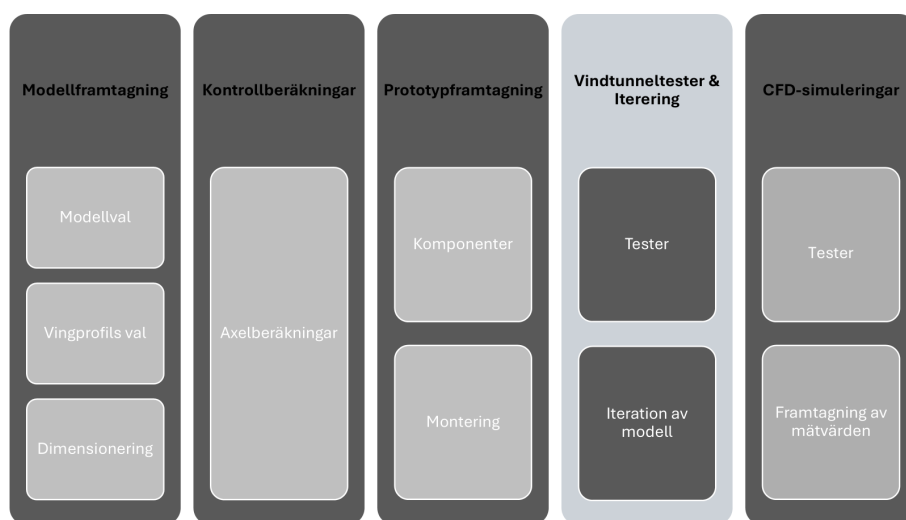


Figur 3.7: Preliminär prototyp

4

Vindtunneltester och iteration

När prototypen var framtagen kunde tester utföras i vindtunneln, illustrerat i figur 4.1. I detta kapitel beskrivs hur testerna utfördes, observationer från testerna och hur modellen uppdaterades utefter dessa observationer.

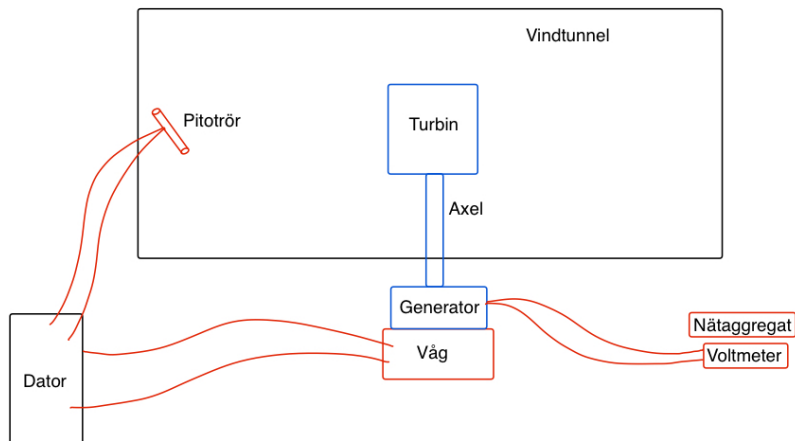


Figur 4.1: Delsteg för tester

Vindtunneltesterna genomfördes i Chalmers Vindtunnellaboratorium. I vindtunneln kan hastigheten på vinden justeras utifrån önskade värden och hållas konstant. Vågen monterad i tunnelns golv möjliggjorde mätning av kraft och moment i 3 dimensioner.

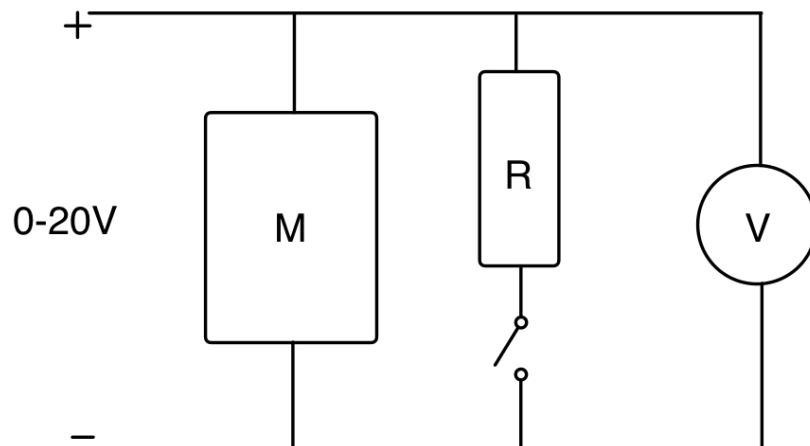
Prototypen monterades i vågen och en varvtalsmätare fästes i centralaxeln. Eftersom vindkraftverkets rotationsaxel är koaxiell med vågens rotationsaxel, är det moment som kraftverket genererar från vinden samma som det moment som vågen registrerar. För att minska vindens påverkan på vågen konstruerades ett skydd i form av en vingprofil som sattes runt lagerhuset. Skarvar, skarpa vinklar och lösa komponenter tejpades för att minska deras luftpåverkan och hålla komponenterna på plats. En schematisk bild kan ses i figur 4.2.

Initialt kopplades generatoren in i ett nätaggregat och användes som en motor för att sätta turbinen i rörelse. När turbinen uppnått eventuell självdrift kopplades istället generatoren in i en multimeter för att läsa av utvunnen effekt. Mellan generatoren och multimetern kunde eventuella motstånd med varierad resistans kopplas till kretsen.



Figur 4.2: Schematisk bild över vindtunneln

På axelkopplingen var dessutom en takometer monterad som mätte varvtalet på rotationen. En schematisk bild på dessa komponenter kan ses i figur 4.3.



Figur 4.3: Kopplingsschema för vindtunneltesterna

Data från multimetern och takometern antecknades för hand under testerna medan värdena från vågen sparades digitalt genom det inbyggda programmet.

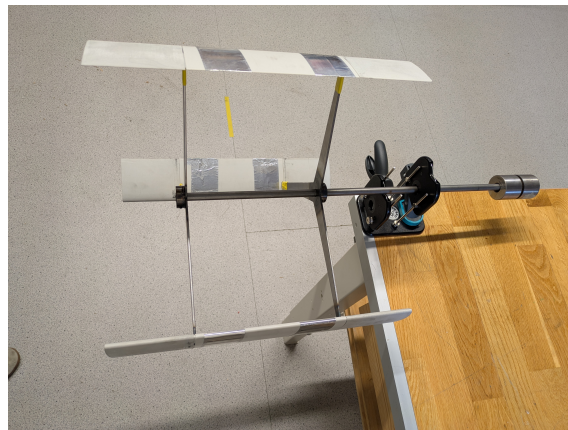
4.1 Test 1

Utifrån de första testerna observerades i takt med rotation- och vindhastighetsökning starkare vibrationer. Detta medförde att kraftverket inte kunde köras i önskade hastigheter för att undvika slitage och skador.

4.1.1 Förändringar

För att reducera vibrationerna togs beslutet att öka vindkraftverkets styvhet vilket uppnåddes på ett antal olika sätt. Motorfästet stabiliserades genom att svetsa förstärkningsplåtar mellan väggarna för att öka styvheten i konstruktionen. Lagerhuset förlängdes ytterligare för att minska längden där det böjande momentet verkade.

För att ytterligare reducera vibrationerna i vindkraftverket togs beslutet att balansera turbinen. Detta valdes att göra statiskt med hjälp av en balanseringsjigg, se figur 4.4. Tejp applicerades strategiskt på stagens ändrar för att centrera turbinens tyngdpunkt.



Figur 4.4: Bild på balanseringsjiggen

Eftersom inställningsvinklarna kan ha stor påverkan på resultatet, bestämdes det att de skulle kontrolleras noggrant för att säkerställa att de var korrekt och jämnt inställda. Detta gjordes manuellt med hjälp av ett skjutmått och geometriska beräkningar. Slutligen smordes kullagren med motorolja som en tilläggsåtgärd för att reducera värme- och friktionsförluster.

4.2 Test 2

De förändringar som gjordes på modellen inför det andra testet visade sig vara effektiva. Vibrationerna reducerades avsevärt och vindkraftverket genererade högre lyftkraft till följd av korrekta inställningsvinklar. Under testerna uppmärksammades att prototypen inte roterade som tänkt. Detta uppstod på grund av friktion från kullager och motorn.

4.2.1 Förändringar

Prototypförändringarna som utfördes efter det andra testet gjordes för att minska friktionen som uppstod. Generatoren medför alltid en viss friktion vilket inte kan motverkas och kvarstod under följande tester. Kullagren smordes ytterligare in med motorolja för att minska friktionen.

4.3 Test 3

Tredje vindtunneltesterna gav tillfälligt goda resultat och kunde bibehålla rotation. Vindkraftverket kunde generera effekt vid lägre vindhastighet än tidigare, samt nå ett högre TSR. Efter en kort tid med jämnt varvtal minskade snabbt varvtalet och vindkraftverket stannade. Gruppen försökte återstarta vindkraftverket men det kunde inte bibehålla rotation. Vindkraftverket avinstallerades från vågen och gruppen upptäckte att vingprofilerna hade tappat fäste från sina axlar, vilket gjorde att inställningsvinklarna inte var korrekta.

4.3.1 Förändringar

För att spänna fast bladen och bibehålla inställningsvinkel limmades vingbladen fast mot vingaxel med superlim. Detta med förhoppning att de inte skulle tappa fäste. Flertalet jigg, se figur 4.5, tillverkades för att snabbare och mer exakt kunna ställa in inställningsvinkeln.



Figur 4.5: Jigg, 8°, 0°, 4°, -4°

Jiggarna tillverkades i trä med hjälp av en laserskärare. En separat jigg för vinklarna -4°, 0°, 4° och 8° valdes då detta innefattade ett brett spektrum av möjliga vinklar. Jiggen placerades i vindkraftverkets rotationscentrum och sattes mot bladet för att säkerställa korrekt inställningsvinkel.

4.4 Test 4

Fjärde testet gav till en början goda resultat. Vindkraftverket bibehöll rotationshastigheten vid 7.9 m/s vind och en TSR på ca 1.2. Efter en kort tid släppte limfogen mellan vingblad och vingaxlar och inställningsvinkel avvek från 4 grader för samtliga blad. Vindkraftverket kunde då inte längre bibehålla rotation på egen hand även vid högre vindhastighet och testet avbröts.

4.4.1 Förändringar

Förändringarna som gjordes för att motverka rotation av vingprofilerna var inte tillräckliga. För att ytterligare stärka profilernas motstånd till rotation ommodellades dem för att möjliggöra montering med stoppskruvar. Stoppskruvarna bidrog med en klämkraft som ytterligare stärkte vingarnas rotationsmotstånd.

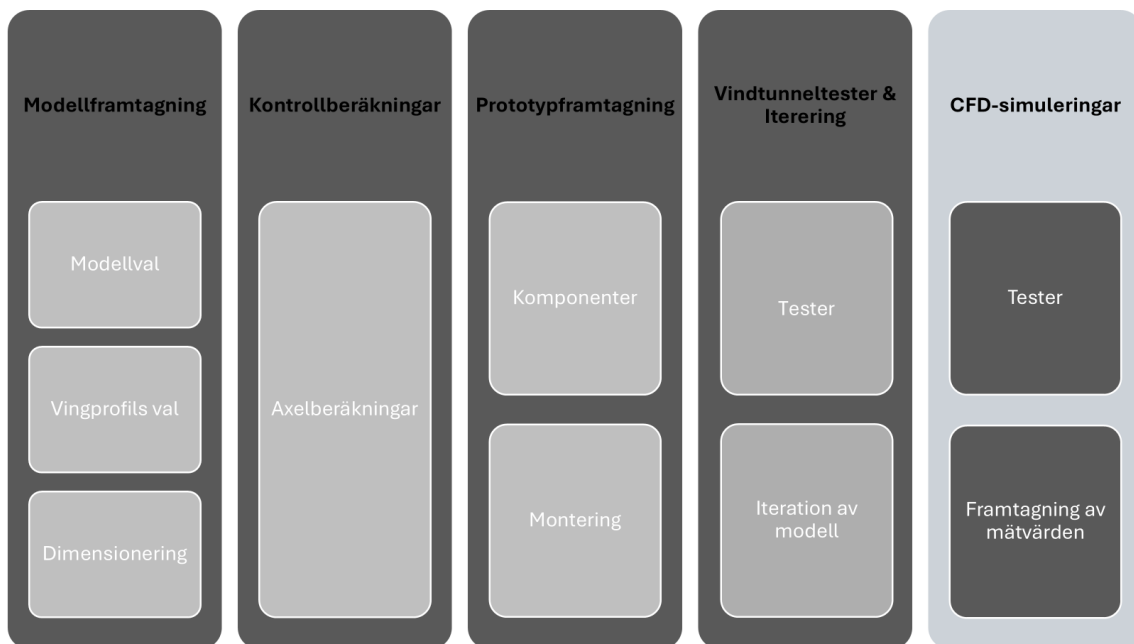
4.5 Test 5

De förändringar som gjordes sedan tidigare tester löste de problem som fanns. Stoppskruvarna tillförde tillräcklig klämkraft för att hålla inställningsvinkeln konstant. Därmed kunde utförliga tester utföras vid olika inställningsvinklar utan risk att de avvek. De tester som utfördes på modellen skedde vid varierad vindhastighet och varierad resistans för inställningsvinklarna -4° , 0° , 4° och 8° , då dessa vinklar var de vinklar som jiggarna tillät. Insamlad data från test 5 kan ses i tabell 6.1 samt 6.2.

5

CFD

Parallellt med prototyp tillverkningen gjordes CFD simuleringar, se figur 5.1.



Figur 5.1: Delsteg i simuleringen

CFD-beräkningarna gjordes i simuleringsprogramvaran StarCCM+. Eftersom den valda modellen hade ett tvärsnitt som nästan var konstant ovanifrån valdes simuleringarna att genomföras i 2D. I denna vy togs ingen hänsyn till stagen då de är försumbara.

Enligt Bianchini et al. [15], ger 2D simuleringar av Darrieus VAWT godtyckligt korrekta resultat vid gynnsamma förutsättningar. De hävdar att både prestandan och flödesfältet runt turbinen är tillräckligt nära vad en 3D modell hade fått. Fördelen med att göra simuleringar i 2D är att det sparar på datorkraft, beräkningskostnader och framförallt tid.

För att beräkna moment, lyftkrafter och effekt användes metoden rigid body motion med användning av två beräkningsnät. Ett stationärt beräkningsnät omslutande vindkraftverket samt ett roterande beräkningsnät i området runt bladen. Simuleringen kördes ett antal iterationer för att sedan rotera ett bestämt tidssteg för att sedan göra nya iterationer.

5.1 Inställningar för simulering

CFD-simuleringen anpassades för att efterlikna miljön i vindtunneln. Väggar konstruerades enligt vindtunnelns specifikationer för att värden från simuleringarna och praktiska tester ska kunna jämföras. TSR sattes till 2.5 och vindhastigheten 10m/s .

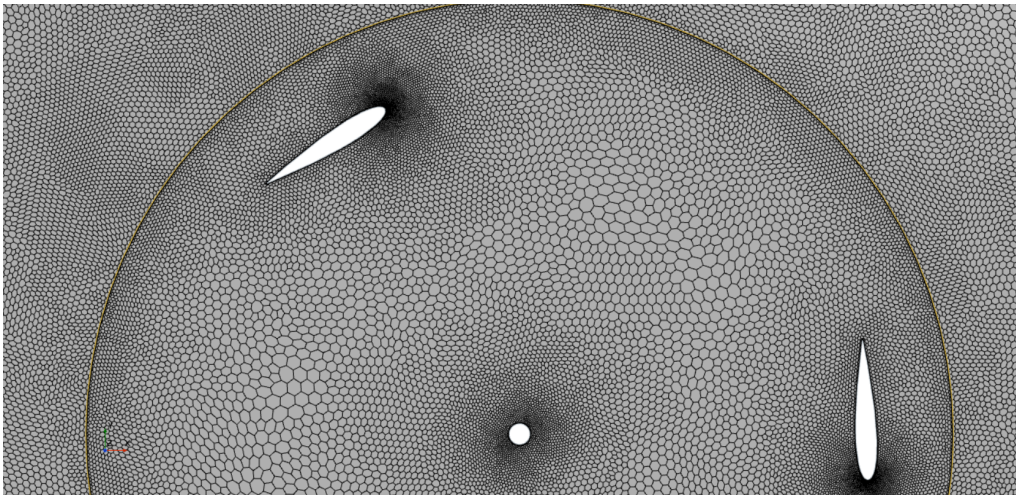
Samtliga simuleringar utfördes *implicit unsteady* i 2D. Gasen betedde sig som ett turbulent, segregerat flöde. Ekvationerna antog att densiteten var konstant, vilket är ett rimligt antagande med hänsyn till de låga hastigheterna. Eftersom flödet bestämdes som turbulent användes Reynolds-averaged Navier-Stokes-ekvationerna för att lösa problemet med $k - \omega$ som turbulensmodell. Övergången från laminärt till turbulent flöde valdes att modelleras med hjälp av $\gamma - Re\theta$ -metoden. Dessa inställningar valdes för att efterlikna det fysiska problemet samtidigt som beräkningskraften förblir rimlig för simuleringarnas skala.

I simuleringsmjukvaran skapades ett beräkningsnät med varierande cellstorlekar för att uppnå en balans mellan beräkningstid och beräkningsnoggrannhet. Runt bladkanterna och i slipströmmen bakom turbinen var cellstorlekarna finare eftersom områden som dessa ställer högre krav på simuleringsupplösningen för att ge mer tillförlitliga resultat. Runt bladytorna och rotationsaxeln användes även prismatiska lager för att uppnå en bättre simulering av gränsskikten. Beräkningsnätet kan ses i figur 5.2, 5.3 samt 5.4.

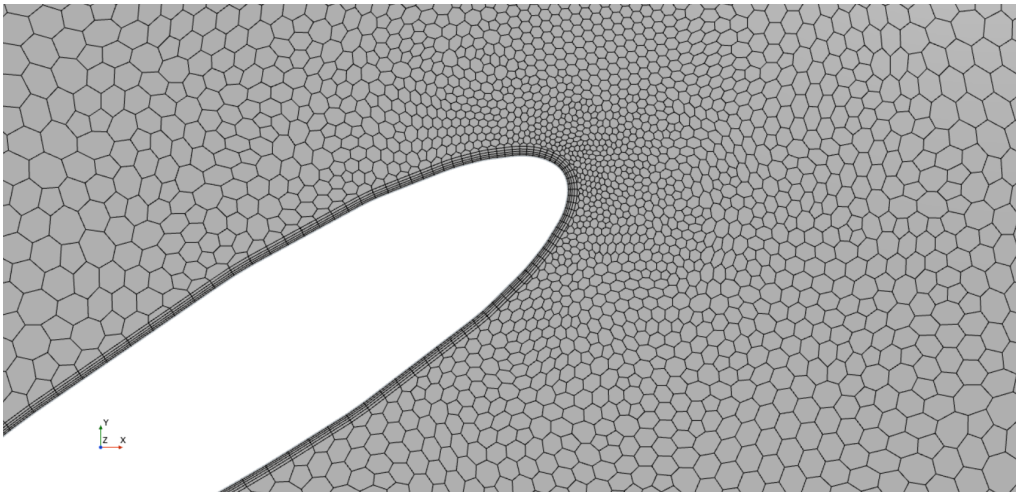
Simcenter STAR-CCM+



Figur 5.2: Hela beräkningsnätet



Figur 5.3: Beräkningsnät runt kraftverket



Figur 5.4: Beräkningsnät runt ett vingblad

Profilerna i figur 5.3 roterar medurs inuti ett luftflöde som börjar från figurens vänstra ytterkant och flödar i höger riktning med en hastighet på 10m/s .

5.2 Utförande av simulering

För att påskynda simuleringen användes olika numeriska inställningar under olika faser. Under de första 0.7 sekunderna användes ett tidssteg på 1 ms och 20 inre iterationer per steg. Därefter minskades tidssteget till 0.1 ms och antalet inre iterationer ökades till 150, vilket gällde för de återstående 0.3 sekunderna. Totalt omfattade simuleringen över 400 000 iterationer. Bild på residuals kan ses i Appendix A.1.

Data som hämtades från simuleringen omfattade krafter i x- och y-led samt moment runt z-axeln för hela vindkraftverket. För ett enskilt vingblad registrerades krafter och positioner i x- och y-led samt moment runt z-axeln. Även för axeln hämtades krafter i x- och y-led samt moment runt z-axeln.

6

Resultat

I detta kapitel presenteras den slutgiltiga prototypen och mätvärden som hämtades från vindtunneltesterna samt CFD-simuleringarna.

6.1 Prototyp

Den slutgiltiga prototypen, färdigbyggd och monterad i vindtunneln, syns i figur 6.1. Tejp för turbinbalansering och en ytterligare nedtejpad vingprofil går också att se.



Figur 6.1: Slutgiltig modell monterad i vindtunnel

6.2 Vindtunneltester

Resultatet från vindtunneltesterna är presenterade i tabellerna 6.1, 6.2 samt figurerna 6.2 och 6.3. Effekten P_g beskriver effekten genererad i generator, P_m är effekt beräknad utifrån moment upplevd i vågen, P_v är den potential som finns i luftflödet.

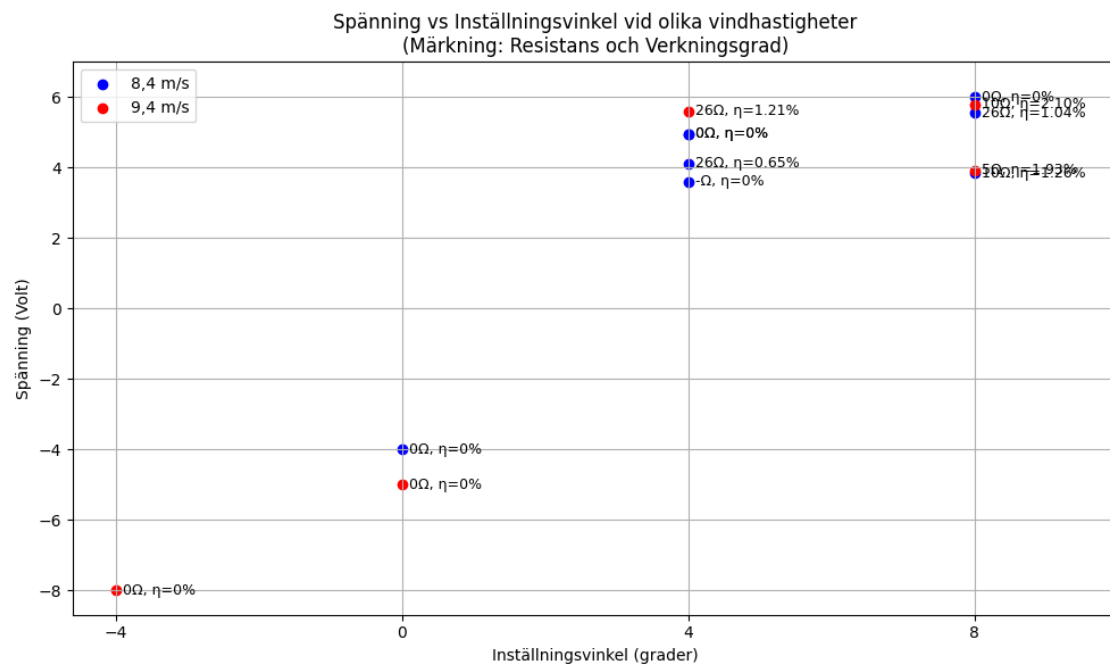
Tabell 6.1: Mätvärden för test med inställningsvinkel på 4 grader

Vind [m/s]	ω [rad/s]	λ	R [Ω]	U [V]	P_g [W]	P_m [W]	P_v [W]
7.6	47.44	1.248	-	-	0	4.73	42.1
8.5	65.97	1.552	-	-	0	6.47	58.9
8.5	55.50	1.306	26	4.12	0.65	5.94	58.9
9.4	75.40	1.604	26	5.6	1.21	8.58	79.7

Tabell 6.2: Mätvärden för test med inställningsvinkel på 8 grader

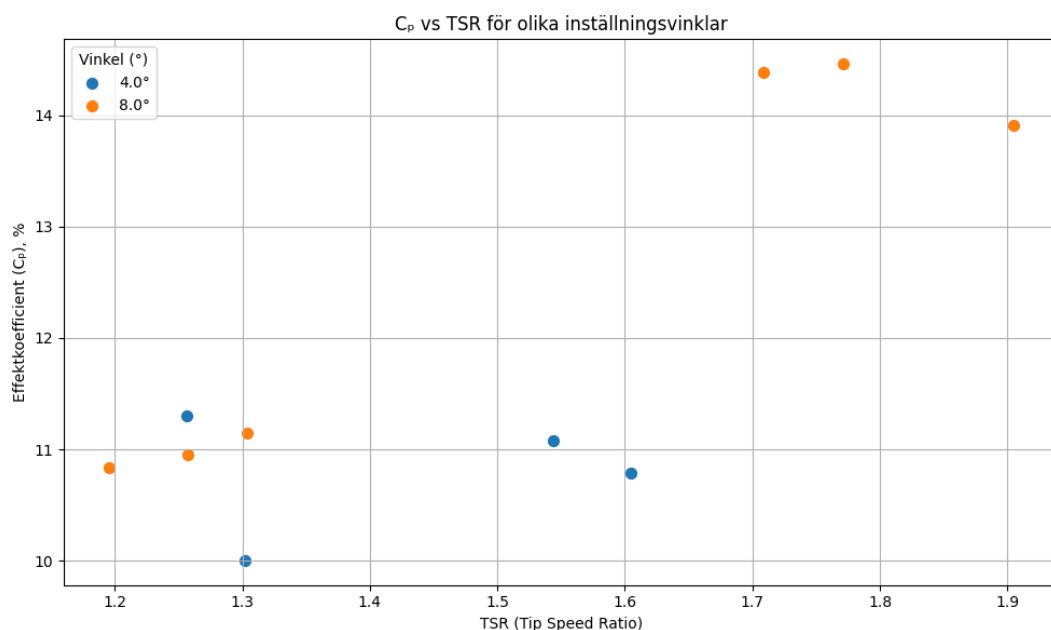
Vind [m/s]	ω [rad/s]	λ	R [Ω]	U [V]	P_g [W]	P_m [W]	P_v [W]
7.6	49.22	1.295	-	-	0	4.60	42.1
8.4	80.63	1.920	-	-	0	8.09	56.9
8.4	74.87	1.783	26	5.55	1.18	8.37	56.9
8.5	53.51	1.259	10	3.85	1.48	6.51	58.9
9.4	80.01	1.702	10	5.79	3.35	11.32	79.7
9.4	56.55	1.203	5	3.92	3.07	8.79	79.7

Från dessa tabellerade värden kunde två olika grafer presenteras för att visualisera resultatet. I figur 6.2 presenteras hur den uppmätta spänningen varierar med olika inställningsvinklar. I figur 6.3 presenteras hur C_p varierar med TSR.



Figur 6.2: Resultat från vindtunneltester

Figuren ovan visar att modellen inte fungerar med en inställningsvinkel på 0° eller -4° . Vid dessa vinklar genererades inte tillräcklig lyftkraft för att uppnå egendrift. Det krävdes i dessa fall en ström och därmed en effekt för att bibehålla rotationshastighet. Detta gällde vid både 8.4 m/s och 9.4 m/s.



Figur 6.3: C_p vid varierad TSR för respektive inställningsvinklar

I figur 6.3 visas hur effektkoefficienten som vindkraftverket genererar varierar med olika TSR för olika inställningsvinklar. Det går att utläsa att effektkoefficienten är högre vid ökande TSR, och att en inställningsvinkel på 8° är bättre än 4° .

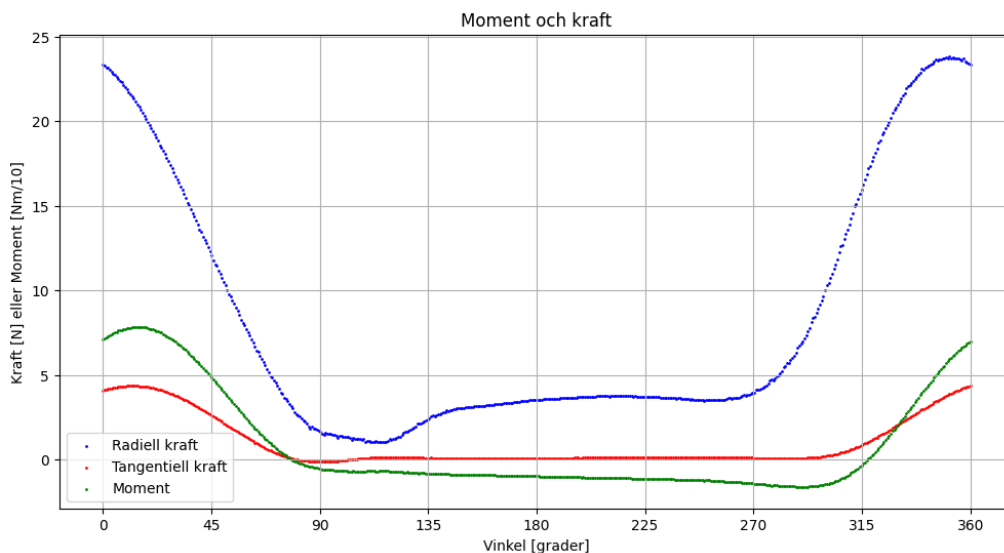
6.3 CFD-simulering

Hämtad data från CFD-simulering kan ses i tabell 6.3.

Tabell 6.3: Data från CFD

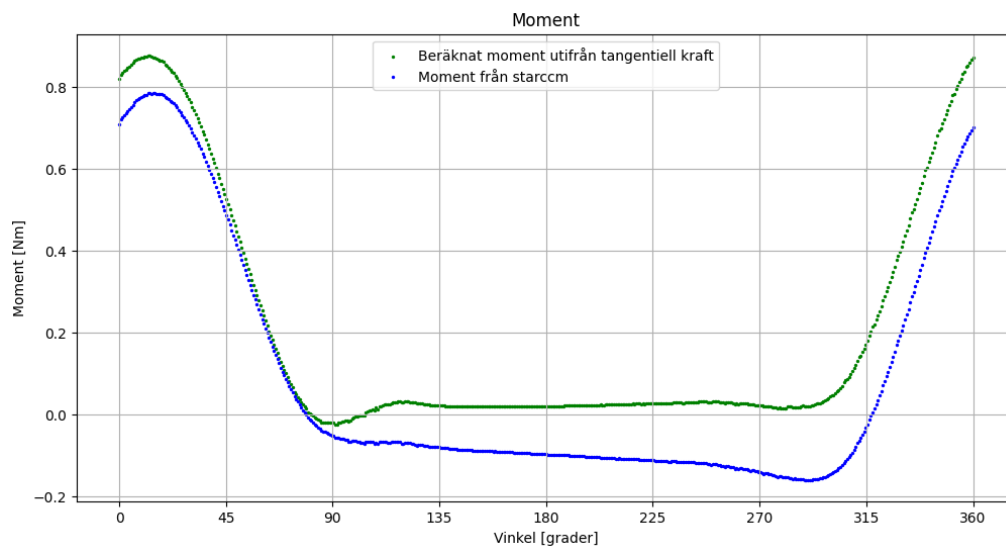
Parameter	Värde	Parameter	Värde
Största kraft [N]	22.59	Största moment [Nm]	0.596
Minsta kraft [N]	6.34	Minsta moment [Nm]	-0.110
Snittkraft [N]	14.46	Snittmoment [Nm]	0.243
Kraftamplitud [N]	16.25	Momentamplitud [Nm]	0.707
		Effekt [W]	30.38
		C_p	0.320

Figur 6.4 visar radiell kraft, tangentiell kraft samt moment som ett vingblad upplever, runt rotationsaxeln vid olika rotationsvinklar. Radiell kraft, tangentiell kraft samt moment är som störst där bladet möter vinden ortogonalt. Notera att momentet är multiplicerat med 10 i grafen för att tydligare visa momentet.



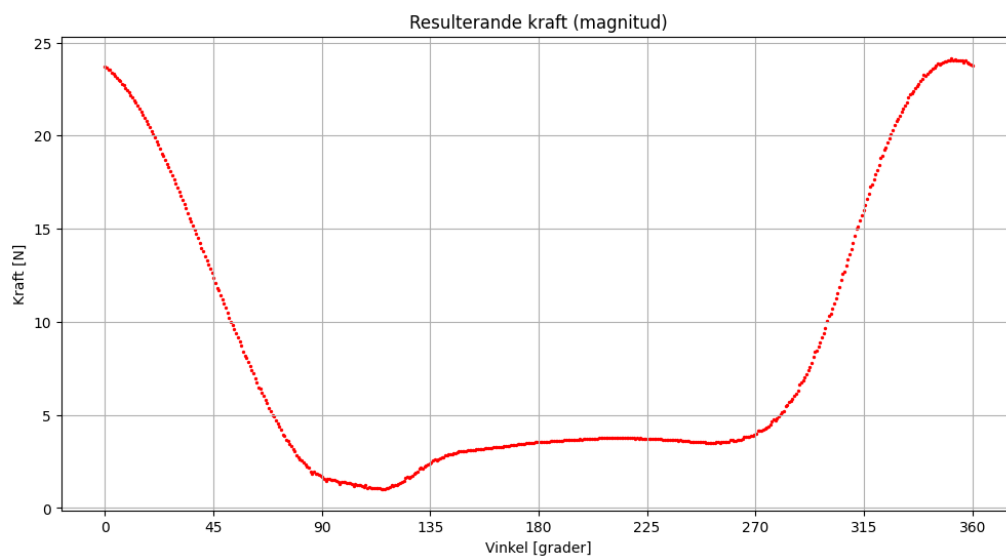
Figur 6.4: Moment och kraft på ett vingblad

Figur 6.5 visar momentet ett vingblad producera beräknat utifrån den tangentiella kraften samt momentet hämtat direkt från CFD-simuleringen.



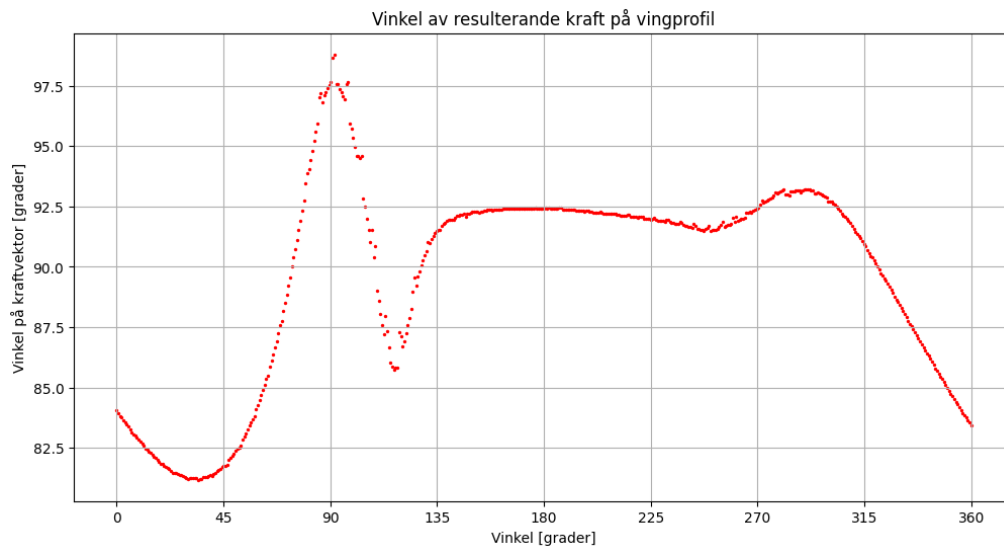
Figur 6.5: Moment på ett vingblad

Kraften på bladen är riktad in mot centrum av vindkraftverket och som störst då bladet möter vinden (mellan -90° och 90°), se figur 6.6 samt figur 6.7. När bladet är ortogonalt mot vinden är kraften vinklad framåt, vilket ger upphov till det moment som alstrar effekt.

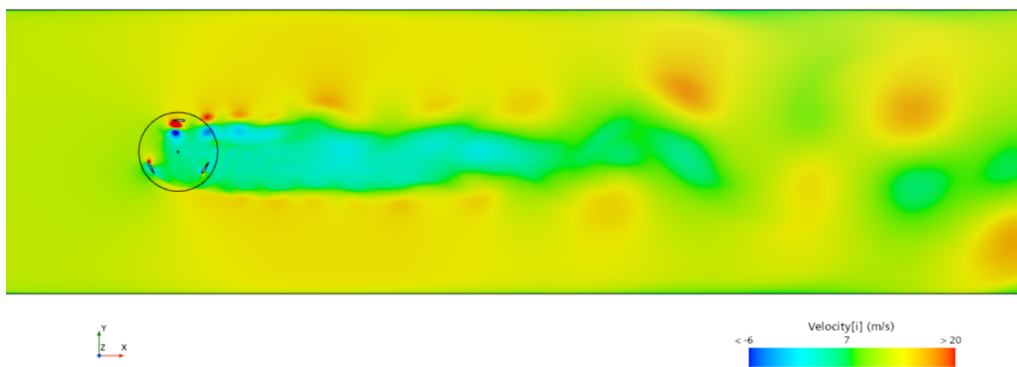


Figur 6.6: Kraftmagnitud på ett vingblad

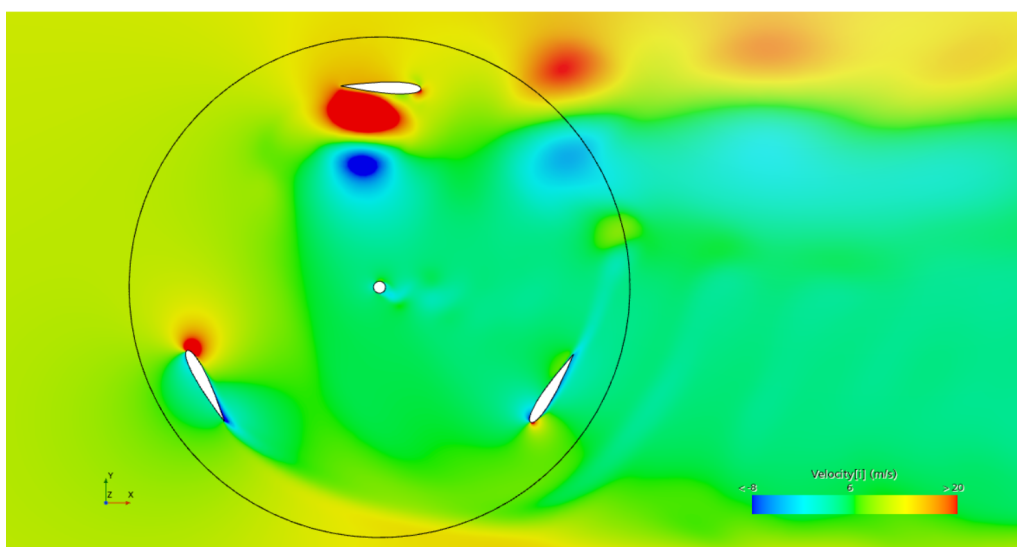
I figur 6.8, 6.9 samt 6.10 visas luftens hastighet i x-led (samma riktning som friströmmen).



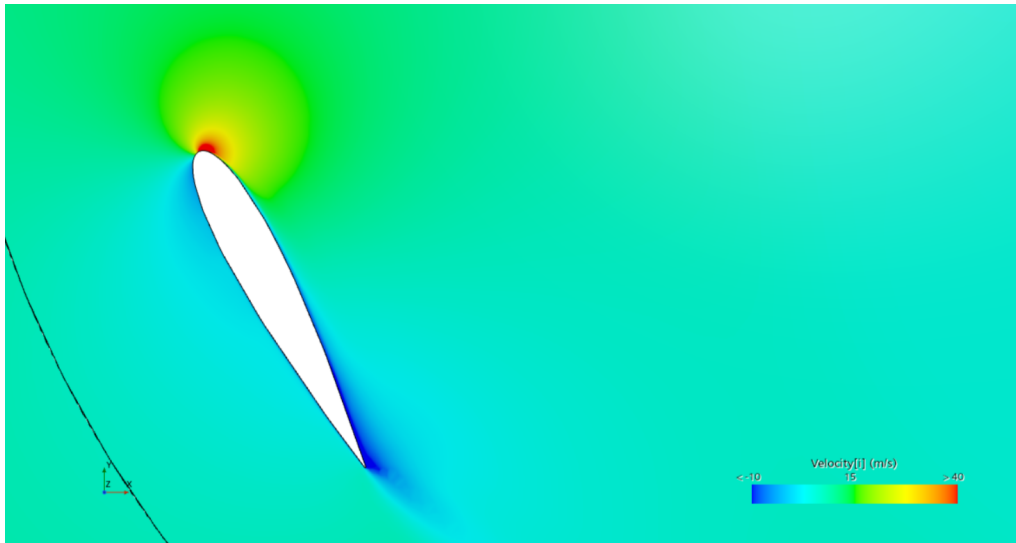
Figur 6.7: Vinkel av resulterande kraft på ett vingblad



Figur 6.8: Skalärscen med hastighet i x-led, hela vindtunneln



Figur 6.9: Skalärscen med hastighet i x-led, VAWT



Figur 6.10: Skälärscen med hastighet i x-led, förstörad

7

Diskussion

I detta kapitel diskuteras hur troliga resultaten är, vad som kunde gjorts annorlunda och vilka delar för bara i fokus vid fortsatt arbete.

7.1 Prototyp

Den slutgiltiga prototypen klarar att uppnå självdrift inom kontrollerad miljö. Vibrationer uppstår när varvtalet ökar vilket leder till att tester vid det önskade TSR-värdet 2.5 inte är möjligt. Vibrationerna kan uppstå på grund av flera anledningar. Framtagningen av komponenterna medför viss differens i mått vilket leder till att tyngdpunkten för blad och stag inte är centrerad korrekt över centralaxeln. Vibrationer kan också förekomma vid högre hastigheter på grund av att prototypen och vågen inte är stabil och styv nog vilket gör att den rör sig under användning.

Friktionen som verkar mellan centralaxeln, generator och lager kvarstår, vilket leder till förluster i utvunnen effekt. Prototypen anses ha uppfyllt önskade mål även om förbättringar är möjliga inom flera områden.

7.2 CFD

Simuleringarna visade tydligt att det moment som genereras varierar beroende på bladets position i sin rotation. Detta är rimligt att anse, då vingbladets anfallsvinkel är varierande och eftersom vingens anfallsvinkeln har direkt inflytande på lyft- samt dragkraften.

Kraftmagnituden anser gruppen också är rimlig eftersom kraften uppmäts som störst då vingbladet pekar normalt mot vindriktningen. Eftersom vinden har då inte förlorat någon potential eller hastighet och bladet kan generera ett stort moment. Figur 6.5 visar på en relativt stor skillnad mellan ett blads genererade momentet och den tangentiella kraften. Kraften ger upphov till ett snittmoment som är större än vad bladet upplever. Anledningen till det skulle kunna vara så är att den radiella kraften ger upphov till ett bromsande moment. Den radiella kraften är riktad in mot rotationscentrum av kraftverket, men om dess angreppspunkt på bladet är bakom fästpunkten kan det skapa ett moment som motverkar rotationen.

Simuleringarna gav en effektkoefficient på cirka 32%, vilket är högt för ett VAWT med $TSR = 2.5$. Anledning att det är så högt kan vara på grund av väggarnas påverkan. I skalärsценerna (figur 6.8, 6.9 samt 6.10) är det tydligt att hastigheten ökar

kraftigt i området mellan väggar och kraftverk, vilket visar på att väggarna har en påverkan.

I CFD simuleringen identifierades ett antal felkällor. En felkälla var att simuleringarna var utförda i 2D, vilket kan medföra att resultaten inte helt överensstämmer med verkligheten. 2D kan liknas med att vindkraftverket är oändligt högt, därför finns ingen påverkan av exempelvis vingpetsvirvlar. Vingpetsvirvlar kan öka luftmotståndet av en ving, vilket i det här fallet skulle kunna innebära att 2D-simulering ger en högre effektkoefficient än det verkliga fallet.

När simuleringen utfördes ställdes tidssteg samt antal inre iterationer in. För långa tidssteg ger stora mellanrum mellan vindkraftverkets rotation, vilket kan ge ett mindre tillförlitligt resultat. Ett lågt antal inre iterationer kan leda till att simuleringen inte konvergerar innan den byter position. Detta leder till ett mindre tillförlitligt resultat.

Ytterligare en felkälla kan vara finheten på beräkningsnätet, vilket kan ha påverkat resultatet av simuleringen. Beräkningsnätet består av flera olika parametrar så som geometrin av nätets celler samt mängd av celler. Dessa parametrar påverkar tiden simuleringen tar samt hur säker den är.

7.3 Vindtunneltester

Resultaten visade att vindkraftverket kunde uppnå självdrift med en inställningsvinkel på 8° och 4° medan varken 0° eller -4° kunde generera effekt. Dessutom visade vindtunneltesterna, motsatt förväntade resultat, att vindkraftverket presterade bättre med en inställningsvinkel på 8° grader jämfört med 4° . Detta var oväntat då 4° förväntades vara den bästa inställningsvinkeln enligt tidigare forskning. Anledningen bakom detta kan vara på grund av att prototypen tillverkades på jämförelsevis liten skala med modellerna som analyserades under förundersökningen. Dessutom är förhållandet mellan kordan och diametern för det tillverkade kraftverket större för att ha utrymme för inre strukturer. Dessa faktorer kan möjligtvis göra så att den optimala inställningsvinkeln blir förändrad, och därmed varför 8° presterade bäst. Detta kan liknas vid flygplansvingar, som vanligtvis har högre anfallsvinklar vid lägre hastigheter och lägre anfallsvinklar vid högre hastigheter.

Resultatet från vindtunneltesterna visade även att den högsta effektkoefficienten som uppnåddes hamnade på 14.7%. Detta är en låg siffra jämfört med vad VAWT vanligtvis uppnår.

En tydlig förklaring till varför effektkoefficienten är så pass låg är för att vindkraftverket aldrig kunde komma upp i tillräckligt hög TSR för att få maximal effektutvinning. Som tidigare nämnt presterar Darriues-H bäst vid en TSR på ca 2.5. Under vindtunneltesterna var den högst uppmätta TSR $\lambda = 1.9$. Anledningen till att högre TSR inte testades var för att krafterna och vibrationerna blev för stora, och därmed fanns det risk för haveri.

En av de troligtvis största anledningarna till att effektkoefficienten är så låg beror på att det är för mycket motstånd i rotationen, dels i kullagren och dels i generatortorn. Det finns även flertalet felkällor som är svåra att undvika på grund av den utrustning som fanns tillgänglig. Dessa innefattar bland annat att vindtunneln är relativt liten och väggarna är inte helt släta. En annan felkälla som påverkar resultatet är att vingprofilernas yta inte är helt slät, vilket får en påverkan på luftflödet. Detta är svårt att undvika på de tillverkades genom 3D-skrivning i väldigt liten skala. Vid vindtunneltesterna uppstod vibrationer vid höga varvtal, som beror på att konstruktionen inte är tillräckligt styv. Detta leder till dels varierade krafter som påverkar effektiviteten, och dels till felaktiga mätvärden.

Alla de felkällor som nämndes ovan har en stor påverkan på resultatet och kan förklara varför effektkoefficienten är så låg. Vissa av dem kan åtgärdas, medan andra inte kan påverkas till följd av den utrustning som fanns för projektet.

7.4 Jämförelse av resultat

Eftersom modellen av vindkraftverket i vindtunneln inte kunde nå det TSR som efterfrågades och som simulerades med CFD är direkt jämförelse av resultaten svår. Vindkraftsmodellen hade även hög inre friktion vilket ledde till att uppmätta effekter i motorn var betydligt lägre än den mekaniska effekt vingbladen producerade.

CFD-resultaten visade stor variation i kraft över en rotation. Den här periodiska variationen i kraft kan ha varit en bidragande faktor till de vibrationer som modellen av vindkraftverket upplevde i vindtunneln. Dessa vibrationer kan också ha påverkat effekten som kunde plockas ut i vindtunneltesterna, då vibrationerna kan ha gett upphov till en ökad friktion i exempelvis lager.

Trots att bladvinkeln kunde hållas konstant i de sista vindtunneltesterna upplevde vindkraftverket för stora vibrationer för att kunna testas i lika hög TSR som i CFD-simuleringarna. Eftersom TSR har en väldigt stor påverkan på effekten blir därmed testerna svåra att jämföra eftersom de utfördes i kraftigt varierande TSR. För att kunna jämföra resultatet hade vindtunneltesterna behövts utföras i TSR på 2.5. För att uppnå detta hade prototypen behövts styvas upp.

Testerna från CFD kan dessutom enbart jämföras mot vindtunneltesterna vid 4° då detta var de enda simuleringarna som gjordes i CFD.

7.5 Fortsatt arbete

Vid fortsatt arbete rekommenderas det att fortsätta utifrån felkällorna nämnda ovan inom de olika områdena. Ett alternativ till detta hade varit att ta fram en annan modell av VAWT för att jämföra den emot Darrieus-H modellen från detta projekt.

Vid vidareutveckling blir den centrala delen konstruktionen. I nuläget klarar kraftverket inte att nå upp till optimala TSR-värden. För att minska vibrationerna och möjliggöra tester vid optimala TSR bör fokus ligga på att centrera tyngdpunkten i turbinen samt öka kraftverkets styvhet och stabilitet.

Stabiliteten hos kraftverket påverkas av konstruktionens styvhet, dess vikt samt tyngdpunktens placering. För att maximera stabiliteten bör tyngdpunkten optimeras och placeras så lågt som möjligt inom konstruktionen. Samtidigt bör materialvalet för kraftverkets komponenter utvärderas och optimeras för att öka styvheten och vikten utan att kompromissa med hållfastheten. En balanserad kombination av låg tyngdpunkt, hög styvhet och optimerad viktfördelning är avgörande för att uppnå en stabil och säker konstruktion.

För att potentiellt kunna minska vibrationer kan ett alternativ till Darrieus-H vara Darrieus-helical. Darrieus-helical använder sig av krökta blad vilket leder till att det cykliska krafterna samt momenten, som tydligt kunde utläsas i CFD-simuleringarna, sprids ut jämnare över en rotation.

8

Slutsats

Den framtagna prototypen utgör ett värdefullt pedagogiskt verktyg för undervisning inom områdena vertikalaxlade vindkraftverk och strömningslära. Genom sin tydliga konstruktion och mätbarhet möjliggör den konkret förståelse för aerodynamiska principer och energikonvertering. För framtida arbete finns potential att vidareutveckla prototypen, exempelvis genom att anpassa den till andra vindkraftskonfigurationer eller implementera nyare tekniska lösningar i linje med den fortlöpande utvecklingen inom branschen.

Det pågår för närvarande en omfattande teknikutveckling inom vindkraftsområdet, där både etablerade lösningar som HAWT och nyare alternativ som VAWT vidareutvecklas för att öka effektiviteten och anpassningsförmågan. Denna utveckling tyder på att olika tekniker lämpar sig för olika användningsområden, vilket i sin tur breddar möjligheterna för att optimera elproduktion utifrån varierande geografiska och miljömässiga förutsättningar.

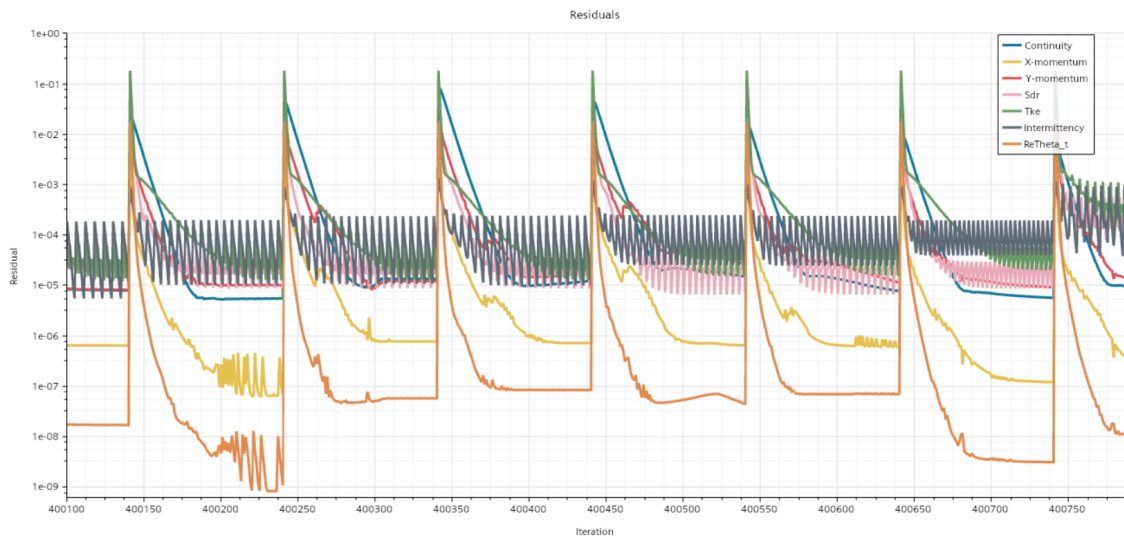
Litteraturförteckning

- [1] Energimyndigheten. "Vindkraftsstatistik." Hämtad 18 januari 2025. (2024), URL: <https://www.energimyndigheten.se/statistik/officiell-energistatistik/tillforsel-och-anvandning/vindkraftsstatistik/?currentTab=0>.
- [2] S. centralbyrå (SCB). "Antalet vindkraftverk har ökat med nästan 900 procent." Hämtad 18 januari 2025. (2024), URL: <https://www.scb.se/pressmeddelande/antalet-vindkraftverk-har-okat-med-nastan-900-procent/>.
- [3] A. Ahmad, M. A. Khan, M. Sharif, N. Ahmed och U. Naseem. "Comparison between horizontal and vertical axis wind turbine." Hämtad 18 januari 2025. (2023), URL: https://www.researchgate.net/publication/368840356_Comparison_between_horizontal_and_vertical_axis_wind_turbine.
- [4] E. Pedersen och K. P. Wayne, "Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments," *Occupational and Environmental Medicine*, årg. 64, nr 7, s. 480–486, 2007. DOI: 10.1136/oem.2006.031039. URL: <https://oem.bmj.com/content/64/7/480>.
- [5] H. i Halmstad. "Forskningsresultat från ett 200 kW vertikalaxlat vindkraftverk." Hämtad 18 januari 2025. (2017), URL: <https://www.mynewsdesk.com/se/hh/pressreleases/forskningsresultat-fraan-ett-200-kw-vertikalaxlat-vindkraftverk-1973179>.
- [6] S. A. Ali, S. M. U. Naqvi och H. S. Kim. "A review of comparative performance of horizontal axis wind turbines (HAWTs) and vertical axis wind turbines (VAWTs)." Hämtad 18 januari 2025. (2020), URL: <https://arxiv.org/abs/2002.10447>.
- [7] Energy Encyclopedia, *Types of Wind Turbines*, <https://www.energyencyclopedia.com/en/renewable-energy/wind-energy/types-of-wind-turbines>, Accessed: 2025-05-06, 2025.
- [8] Amazon.com, *800W 12V Vertical Axis Wind Turbine Generator with Controller*, <https://www.amazon.com/Vertical-Turbine-Generator-Generators-Controller/dp/B0CJFG2X8T>, Accessed: 2025-05-13, 2025.
- [9] Y. Zhang, X. Li, J. Wang och M. Chen, "Computational Fluid Dynamics Analysis of Wind Turbine Blade Aerodynamics," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, årg. 230, s. 104–115, 2024. DOI: 10.1016/j.jweia.2023.104115. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823013768>.
- [10] H.-G. Jeong, S.-H. Lee och S.-D. Kwon, "Effect of Blockage Ratio on Wind Tunnel Testing of Small Vertical-Axis Wind Turbines," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, årg. 34, nr 3, s. 98–106, 2014. DOI: 10.7836/kses.2014.34.3.098.

- [11] W. Eltayeb, J. Somlal, A. R. Singh och F. Alsaif, "Enhancing Darrieus Wind Turbine Performance through Varied Plain Flap Configurations for the Solar and Wind Tree," *Scientific Reports*, årg. 14, nr 30014, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-81853-6. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-81853-6>.
- [12] H.-D. Zheng, B. Zhang, S.-B. Wang och G.-Z. Zhou, "Effects of Blade Numbers on Wind-Induced Fatigue Lives of Straight-Bladed Vertical-Axis Wind-Turbine Tower Bases," *Metals*, årg. 12, nr 2, s. 321, 2022. DOI: 10.3390/met12020321. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/2/321>.
- [13] P. Deglaire, "Analytical Aerodynamic Simulation Tools for Vertical Axis Wind Turbines," diss., Uppsala University, 2010.
- [14] *OTOTEC Elmotor för PMA 350w vindkraftverk och elskoter - DC 24V magnetisk generator*. URL: https://www.amazon.se/dp/B07RGYQJ9N?ref_=pe_111951831_1111173731_fed_asin_title.
- [15] A. Bianchini, F. Balduzzi, P. Bachant, G. Ferrara och L. Ferrari, "Effectiveness of two-dimensional CFD simulations for Darrieus VAWTs: A combined numerical and experimental assessment," *Energy Conversion and Management*, årg. 136, s. 318–328, 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.01.026.

A

Appendix 1



Figur A.1: Residuals under CFD-simulering

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se



CHALMERS