

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Markus Hansen-Haug

**PIENIKOKOISEN PYSTYAKSELISEN TUULITURBIININ
PERUSSUUNNITTELU**

Tarkastajat: Professori, TkT Jari Backman
 TkT Aki Grönman
Ohjaaja: Professori, TkT Jari Backman

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Markus Hansen-Haug

Pienikokoisen pysty akselisen tuuliturbiinin perussuunnittelu

Diplomityö

2017

86 sivua, 46 kuvaa, 41 yhtälöä, 4 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastajat: Professori, TkT Jari Backman
TkT Aki Grönman

Ohjaaja: Professori, TkT Jari Backman

Hakusanat: tuulivoima, tuuliturbiini, pysty akselinen, Savonius, Darrieus, vastusvoima, nostovoima, staattori

Työssä selvitetään pienikokoisen pysty akselisen tuuliturbiinin suunnitteluun liittyviä erityispiirteitä ja annetaan lähtökohdat roottorin aerodynaamiseen suunnitteluun. Työn alussa tarkastellaan tuulen energian hyödyntämisen perusteoriaa, jonka jälkeen käydään tarkemmin läpi aerodynaamisen nostovoimaa tuottavan siiven toiminnan fysikaaliset perusteet. Pysty akselisista tuuliturbiinivaihtoehdoista vastusvoiman avulla toimivista ratkaisuista käsitellään Savonius-roottoria sekä sen modifikaatioita sanallisesti. Pysty akselisista nostovoimaroottoreista käsitellään tarkemmin suorasiipistä Darrieus-roottoria ja sen toimintaperiaatetta.

Työssä selvitettiin pysty akselisen tuuliturbiinin roottoria suojaavan staattorirakenteen vaikutusta sen toimintaan. Pysty akselinen tuuliturbiini voidaan integroida symmetrisen staattorirakenteen sisälle siten, että staattorirakenne ohjaa virtausta roottorille suotuisalla tavalla. Symmetriseksi suunniteltu staattorirakenne aiheuttaa kuitenkin aina voimakkaat muotovastuksesta aiheutuvat virtaushäviöt, mikä heikentää tuuliturbiinikonaisuuden suorituskykyä. Staattorirakenteen vaikutusta virtaukseen on selvitetty diplomityöhön liittyvään projektin yhteydessä virtausmallinnuksen avulla.

Hyvin pienikokoisissa pysty akselisissa tuuliturbiinisovelluksissa vastusvoimaperiaatteella toimiva roottori on yksinkertaisemman rakenteensa sekä itsestään käynnistyvyytensä ansiosta nostovoimaperiaatteella toimivaa roottoria parempi vaihtoehto. Pienikokoisten pysty akselisten nostovoimaroottoreiden tehokertoimet eivät yllä suurikokoisempien sovelluksien tasolle, sillä pienestä koosta aiheutuvat roottorin pintasuhteen nousu, sekä pienemmät siipiprofiilien jänteen pituudet saavat aikaan roottorin suorituskykyä alentavia voimakkaita aerodynaamisia ilmiöitä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Markus Hansen-Haug

Basic design of a small vertical-axis wind turbine

Master's thesis

2017

86 pages, 46 figures, 41 equations, 4 tables and 5 appendices

Examiners: Professor, D.Sc. (Tech.) Jari Backman
D.Sc. (Tech.) Aki Grönman

Supervisor: Professor, D.Sc. (Tech.) Jari Backman

Keywords: wind energy, wind power, wind turbine, vertical-axis, Savonius, Darrieus, lift, drag, stator

Object of this thesis is to examine the characteristics involved in designing a small vertical-axis wind turbine application and give a baseline for the aerodynamic design of a wind turbine rotor. First the basics of wind energy conversion and the aerodynamic principles of a lift generating airfoil are presented. For drag based vertical-axis wind turbines the emphasis is on the Savonius-rotor concept and its modifications. For lift based vertical axis wind turbines the emphasis is on the straight bladed Darrieus-rotor concept.

The effects on rotor performance of a stator design around a vertical-axis rotor were investigated. A rotor can be integrated inside a stator geometry in a way that the stator channels the incoming airflow in a favorable way for the rotor. A symmetrical design always causes flow losses due to pressure drag, which decreases the overall performance of the wind turbine. The effects of the stator on the flow are investigated through computed fluid dynamics in a project affiliated with this thesis.

In very small sized vertical-axis wind turbine applications the drag based rotor is a better option than the lift based rotor due to its much simpler design and ability to self-start. Small sized lift based vertical-axis wind turbine applications do not reach the same level of efficiency as larger applications due to aerodynamic phenomenon caused by the combination of increased solidity of the rotor and shorter airfoil chord lengths.

ALKUSANAT

Työ on tehty yhteistyössä Pasatel Oy:n kanssa ja mielenkiintoisesta sekä haastavasta työn aiheesta sekä projektin rahoituksesta kiitokset kuuluvatkin Pasatel Oy:lle ja sen henkilöstölle. Toivottavasti tekemästani tutkimuksesta on merkittävää hyötyä projektin jatkokehityksen kannalta. Työn tekemisen aikana saadusta ammattitaitoisesta ohjauksesta ja kommentoinnista kiitokset työn ohjaajalle ja 1. tarkastajalle professori Jari Backmanille, sekä työn 2. tarkastajalle tutkijaopettaja Aki Grönmanille.

LUT:n virtaustekniikan osastolle kiitokset kannustavasta sekä mielekkäästä työilmapiiristä, ja kiitos koko LUT:n henkilöstölle laadukkaasta opetuksesta opiskelujeni aikana.

Yliopisto-opintojen aikana on ollut ilo tavata myös joukko ystäviä, joista on ollut apua sekä opiskeluissa että vapaa-ajalla. Iso kiitos kuuluu myös vanhemmilleni heiltä saamastani tuesta ja kannustuksesta kaikessa ja aina tarvittaessa.

Lappeenrannassa 23.1.2017

Markus Hansen-Haug

SISÄLLYSLUETTELO

Symboliluettelo	7
1 Johdanto	9
2 Tuulivoimateoria	11
2.1 Tuulesta hyödynnettävä energia.....	11
2.2 Tuuliturbiinin teho ja momentti	13
2.3 Roottorin siiven aerodynamiikka	16
2.3.1 Nostovoimaroottorin siiven aerodynamiikka.....	18
3 Vastusvoimaan perustuvat pysty akseliset tuuliturbiinit	25
3.1 Roottorin vaiheiden- sekä siipien lukumäärä.....	29
3.2 Sivusuhteen sekä päätylevyjien vaikutus	31
3.3 Siipiprofiilin muoto	33
3.4 Siipien välistys ja limittäisyys	34
3.5 Keskiakselin sekä muiden rakenneosien vaikutus	36
3.6 Staattorirakenteen vaikutus Savonius-roottorin toimintaan.....	36
4 Nostovoimaan perustuvan pienikokoisen pysty akselisen tuuliturbiinin suunnittelu	39
4.1 Aerodynaaminen laskentamalli suorasiipiselle Darrieus-roottorille	41
4.2 Roottorin pienen halkaisijan vaikutus	45
4.3 Pintasuhteen sekä kärkinopeussuhteen vaikutus.....	50
4.4 Alhaisen Reynoldsin luvun vaikutus siipiprofiilin suorituskykyyn	52
4.4.1 Alhaisella Reynoldsin luvun alueella toimivan siipiprofiilin suorituskyvyn parantaminen	54
4.5 Siipiprofiilin valinta pienikokoiselle Darrieus-roottorille	56
4.6 Siiven asetuskulman vaikutus	58
4.6.1 Siiven asetuskulman säätö	60
5 Staattorirakenteen vaikutus roottorin toimintaan	62
5.1 Staattorin geometrian määrittäminen	63
5.2 Staattorirakenteen vaikutus kohtauskulmaan.....	69

6	Testattava prototyyppi	71
7	Staattorirakenteen virtausmallinnus	76
8	Yhteenveto ja johtopäätökset	80
	Lähdeluettelo	83

LIITTEET

I	Eri muotojen vastusvoimakertoimien arvoja
II	Savonius-roottorin suorituskykyä koskevia tutkimuksia
III	Tuulitunnelin tukkeutumisvaikutuksen arviointi
IV	Esimerkkejä H-Darrieuksen siipiprofiilivaihtoehdoista
V	Esimerkkejä turbulaattorigeometrioista

SYMBOLILUETTELO

A	Pinta-ala [m ²]
c	Siipiprofiilin jänne [m]
C_p	Tehokerroin [-]
D	Vastusvoima [N], halkaisija [m]
d	Siiven halkaisija [m]
E	Energia [J]
e	Limittäisyys [m], välistys [m]
H	Korkeus [m]
L	Nostovoima [N]
l	Pituus [m]
\dot{m}	Massavirta [kg/s]
M	Momentti [Nm]
N	Pyörimisnopeus [1/s], Lukumäärä [-]
V	Virtausnopeus [m/s]
P	Teho [W]
p	Paine [Pa]
Q	Vääntömomentti [Nm]
R, r	Säde [m]
Re	Reynoldsin luku
u	Kehänopeus [m/s]
w	Suhteellinen nopeus [m/s]
α	Kohtauskulma [°]
ϵ	Sivusuhte [-]
ε	Staattorin ulko- ja sisähalkaisijan suhde [-]
σ	Pintasuhde [-]
ξ	Korjauskerroin [-]

Γ	Sirkulaatio [m^2/s]
λ	Kärkinopeussuhde [-]
θ	Pyörähdyskulma [$^\circ$]
τ	Leikkausrasitus [N/m^2]
ψ	Staattorin siiven asetuskulma [$^\circ$]
ρ	Tiheys [kg/s]
ω	Kulmanopeus [rad/s]

Alaindeksit

ave	keskiarvo
D	vastusvoima
d	tuulen alapuoli
f	pintahankausvastus
i	sisä-
L	nostovoima
max	maksimiarvo
N	normaalivoima
o	ulko-
p	paine
s	staattori
T	roottori, tangentiaalivoima
u	tuulen yläpuoli
∞	vapaa virtaus

1 JOHDANTO

Viime vuosina kiinnostus uusiutuvaan energian tuotantoon ja sitä myötä myös tuulivoimalla tuotettuun sähköön on kasvanut. Tuulivoiman hyödyntämisen kehitys onkin ollut valtaisaa etenkin megawattikokoluokassa, mutta pienikokoisten tuulivoimaloiden kehitystyö on jäänyt vähäisemmälle huomiolle. Voimakkaan kehitystyön tuloksena saatu vaaka-akselisten tuuliturbiinien korkea hyötysuhde onkin tehnyt niistä suosituimman tuuliturbiinityypin erityisesti suuressa kokoluokassa. Tietyissä olosuhteissa, kuten turbulenttisissa ja vaihtelevissa tuuliolosuhteissa, pystyakselisilla tuuliturbiineilla on kuitenkin havaittu olevan etua vaaka-akselisiin tuuliturbiineihin nähden. Pystyakselisten tuuliturbiinien haittapuolina ovat kuitenkin esimerkiksi alhaisempi hyötysuhde vaaka-akselisiin tuuliturbiineihin verrattuna, ongelmat itsestään käynnistyvyyden kanssa, sekä epätasaisen vääntömomentin tuoton aiheuttamat voimakkaat värähtelyt ja rasitukset. Pystyakseliset tuuliturbiinit osoittavat kuitenkin erityistä potentiaalia hajautetussa pientuulivoiman tuotannossa esimerkiksi kaupunkiolosuhteissa.

Diplomityö on osa Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan osaston tutkimusprojektia, jonka tarkoituksena oli selvittää pienikokoisen pystyakselisen tuuliturbiinin suunnittelun peruseriaatteita tietyt projektikohtaiset erityisvaatimukset huomioiden. Diplomityön kirjallinen osa kattaa pystyakselisen tuuliturbiinin suunnittelun peruseriaatteita ja käsitteitä, sekä pienikokoisille roottoreille ominaisia aerodynaamisia haasteita ja kehitysehdotuksia näiden haasteiden voittamiseksi. Diplomityön tarkoituksena on lisätä tutkimusprojektin tilanteen yrityksen henkilöstön osaamista tuuliturbiinien aerodynamiikkaa koskevilla osa-alueilla ja mahdollistaa tuuliturbiinin itsenäisen kehitystyön jatkuminen. Projektiin kuuluvia diplomityön ulkopuolelle jääviä osa-alueita ovat suunnittelutyön pohjalta valmistetun tuuliturbiinin prototyypin testaus tuulitunneliolosuhteissa, näiden tulosten käsittely, sekä pääosin saman prototyypin perusteella tehdyt virtausmallinnukset. Työssä käsitellään pelkän staattorirakenteen virtausmallinnuksen tuloksia, ja loput mallinnuksen tulokset julkaistaan myöhemmin projektiin liittyvän loppuraportin yhteydessä. Suunniteltavan tuuliturbiinin alkuvaatimuksiksi esitettiin korkea aerodynaaminen hyötysuhde, vähäinen melun tuotto sekä tuuliturbiineille ominaisen välkehännän minimointi. Tuuliturbiinis suunnittelun osa-

alueista sekä generaattorisuunnittelu sekä mekaaninen mitoitus on jätetty käsittelyn ulkopuolelle.

Työn alussa käydään läpi tuulen energian hyödyntämisen peruseriaatteita sekä käsitteitä, jonka jälkeen työssä käydään läpi vastusvoimaperiaatteella toimivista roottoreista tehtyjä tutkimuksia ja niiden tuloksia. Pääpaino työssä on kuitenkin nostovoimaperiaatteella toimivan pysty akselisen roottorin toiminnassa, joiden osalta työssä käsitellään matemaattinen laskentamalli sekä pienikokoiseksi skaalaamisen johdosta ilmeneviä aerodynaamisia ongelmia, sekä joitain ratkaisuehdotuksia näiden ongelmien vaikutusten vähentämiseksi. Työssä suunnitellaan myös pysty akselisen tuuliturbiinin roottorin yhteyteen integroitava staattorirakenne ja arvioidaan sen vaikutuksia roottorin suorituskykyyn. Staattorirakennetta suunniteltaessa ja sen vaikutuksia arvioitaessa haasteena oli aiheesta olemassa olevan aiemman tieteellisen tutkimuksen vähäinen määrä sekä kyseenalainen tutkimuksen taso.

Diplomityön päätavoitteet ovat:

- Selvittää tuuliturbiinin suunnitteluun liittyvät aerodynaamiset perusteet, sekä pienikokoisten tuuliturbiinien suunnittelussa ilmenevät erityispiirteet.
- Suunnitella pysty akselisen tuuliturbiinin suorituskykyä parantava staattorirakenne, ja selvittää sen vaikutukset tuuliturbiinin toimintaan.
- Selvittää mitkä ovat merkittävimmät tekijät erityisesti pienikokoisen tuuliturbiinin aerodynaamista hyötysuhdetta määritettäessä sekä millä keinoilla sitä on mahdollista parantaa.
- Tehdä tarvittavan laaja pohjatyö aiheeseen liittyen, jotta tutkimuksen tilannut yritys voi mahdollisesti jatkaa tuuliturbiinin kehitystyötä itsenäisesti.

Projektin yhteydessä valmistettiin sekä vastusvoima- että nostovoima-prototyypit, joista vastusvoimarooottori saatiin toimimaan, mutta nostovoimarooottoria ei. Molemmissa versioissa sovellettiin samaa symmetristä staattorirakennetta. Staattorirakenteen avulla ei saatu parannettua roottorin suorituskykyä. Työssä ei käsitellä kyseisen testauksen mittaustuloksia tarkemmin.

2 TUULIVOIMATEORIA

Hyödynnettävä tuulen energia on peräisin Auringon lämmön aiheuttamien ilmakehän paineerojen tasaantumisen aiheuttavien ilmassojen liike-energiasta. Ilmavirtauksen kineettinen energia muutetaan tuuliturbiinin akselin mekaaniseksi pyörimisenergiaksi turbiinin roottorin avulla, josta se voidaan muuttaa sähköenergiaksi generaattorin avulla. Tuulen energian muuntoprosessin tehokkuus riippuu voimakkaasti ilmavirtauksen kanssa reagoivan tuuliturbiinin aerodynaamisesta tehokkuudesta. Tässä luvussa käydään läpi tuulienergian hyödyntämisen peruskäsitteitä sekä teoriaa.

2.1 Tuulesta hyödynnettävä energia

Ilmavirtauksen sisältämä kineettinen energia voidaan laskea yhtälöllä sen virtausnopeuden ja sisältämän massan avulla.

$$E = \frac{1}{2} m V_{\infty}^2 \quad (1)$$

missä	E	tuulen sisältämä kineettinen energia [J]
	m	tuulivirtauksen massa [kg]
	V_{∞}	vapaan virtauksen nopeus [m/s]

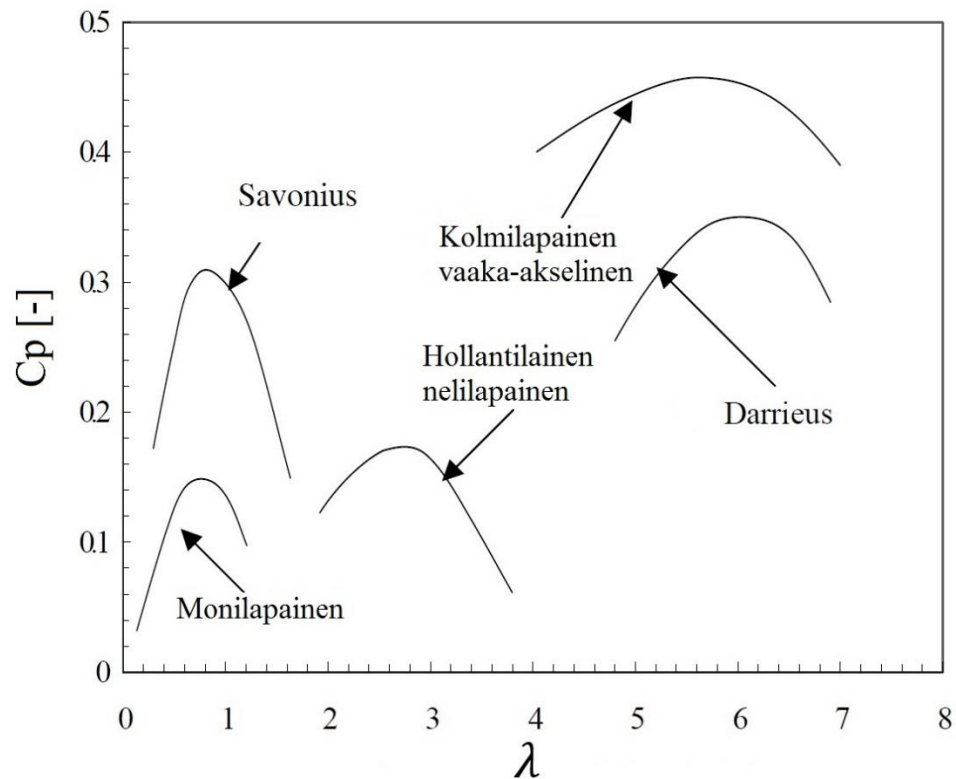
Tuuliturbiinin pyyhkäisyypinta-alan läpi kulkevan ilmavirtauksen sisältämän energian hyödynnettävä teoreettinen maksimi, jossa ilmavirran sisältämä energiamäärä saadaan hyödynnettyä kokonaan, saadaan laskettua yhtälön 2 avulla.

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{\infty}^2 = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad (2)$$

missä	P_{\max}	ilmavirtauksesta hyödynnettävissä oleva maksimiteho [W]
	\dot{m}	ilmavirtauksen massavirta [kg/s]
	ρ	ilman tiheys [kg/m ³]
	A	hyödynnettävän ilmavirtauksen poikkipinta-ala (pyyhkäisyypinta-ala) [m ²]

Ilmavirtauksesta hyödynnettävä teho on siis verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin sekä suoraan verrannollinen ilmassan tiheyteen sekä pinta-alaan.

Käytännössä ilmassan virtausnopeutta ei saada kuitenkaan täysin pysäytettyä, eli tuulen sisältämää energiaa ei saada täysin hyödynnettyä. Tuuliturbiinin tehokerroin C_p määritellään ilmavirtauksesta hyödynnettävän tehon ja virtauksen sisältämän maksimitehon suhteena. Nostevoimaan perustuvien tuuliturbiinien tehokertoimelle on määritelty teoreettinen maksimi, Betzin luku, joka on $16/27 = 0,593$. (Hansen 2008, 3-4) Vastusvoimaan perustuvien tuuliturbiinien tehokertoimen teoreettiseksi maksimiksi on esitetty lukua $8/27 = 0,296$ (Mathew 2006, 23). Kuvassa 1 on esitettyä yleisimpien tuuliturbiinityyppien tehokertoimia kärkinopeussuhteen funktiona.



Kuva 1: Joidenkin tuuliturbiinityyppien periaatteellisen suorituskyvyn ominaiskäyriä (Mathew 2006, 22).

2.2 Tuuliturbiinin teho ja momentti

Tuuliturbiinin aerodynaamisen suorituskyvyn ennustaminen on kriittistä etenkin suunnittelun optimointivaiheessa. Tuuliturbiinin suorituskyvyn analysoimiseksi on määritettävä erinäisiä parametreja, kuten tehokerroin C_p ja momenttikerroin C_M , ja sen aerodynaamiset kuormitukset sekä virtauskenttä tuuliturbiinin roottorin ympärillä on visualisoitava. Viime vuosikymmeninä siipiprofiilien ja tuuliturbiinien ympäröimän virtauskentän analyttiset, laskennalliset sekä kokeelliset tutkimusmenetelmät ovat ottaneet selkeitä kehitysaskelia. (Bhutta et al. 2012, 1934)

Ilmavirran kulkiessa tuuliturbiinin roottorin läpi, osa sen kineettisestä energiasta muunnetaan siipien avulla mekaaniseksi energiaksi ja roottorin läpäissyt osa kuljettaa loput kineettisestä energiasta mukanaan. Roottorin tehokerroin C_p määräytyykin mekaaniseksi energiaksi muunnetun osan ja ilmamassan sisältämän kokonaisenergian suhteena.

$$C_p = \frac{2 P_T}{\rho A_T V_\infty^3} \quad (3)$$

missä	C_p	tehokerroin
	P_T	roottorin tuottama teho [W]
	ρ	ilman tiheys [kg/m ³]
	A_T	roottorin pyyhkäisyypinta-ala [m ²]
	V_∞	virtausnopeus [m/s]

Roottorin tuottama teho riippuu monista tekijöistä, kuten siipiprofiilista ja siipien lukumäärästä. Huolellisen roottorisuunnittelun tavoitteena on yleensä saada aikaan mahdollisimman suuri tehokerroin laajalla tuulennopeuksien skaalalla. (Mathew 2006, 14)

Ilmavirtauksen roottorille aiheuttama työntövoima ja momentin teoreettinen maksimi voidaan määritellä yhtälöillä 4 ja 5.

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_\infty^2 \quad (4)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_\infty^2 R \quad (5)$$

missä	F	työntövoima [N]
	M_{\max}	maksimimomentti [Nm]
	R	roottorin pyörimisliikkeen säde [m]

Todellisuudessa roottori saa aikaiseksi vain osan tästä momentista. Roottorin tuottaman momentin ja teoreettisen maksimimomentin suhdetta kutsutaan momenttikertoimeksi C_M .

$$C_M = \frac{2M_T}{\rho_a A_T V^2 R} \quad (6)$$

missä	C_M	momenttikerroin [-]
	M_T	roottorin tuottama momentti [Nm]

Roottorin tuottama teho tietyllä tuulennopeudella on voimakkaasti riippuvainen roottorin siiven kehänopeuden u ja häiriöttömän virtauksen tuulennopeuden suhteesta, jota kutsutaan kärkinopeussuhteeksi (englanniksi Tip Speed Ratio, TSR).

$$\lambda = \frac{u}{V_\infty} = \frac{\omega R}{V_\infty} = \frac{2\pi NR}{V_\infty} \quad (7)$$

missä	λ	kärkinopeussuhde [-]
	u	kehänopeus [m/s]
	ω	kulmanopeus [rad/s]
	R	pyörimisliikkeen säde [m]
	N	pyörimisnopeus [1/s]
	V_∞	tuulennopeus [m/s]

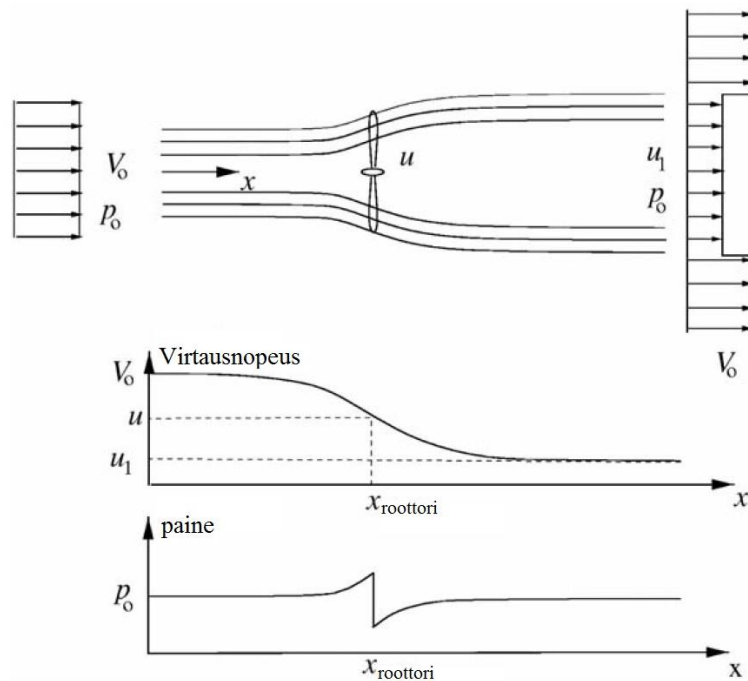
Roottorin tehokertoimen ja momenttikertoimen arvot vaihtelevat vallitsevan nopeussuhteen mukaisesti. Jokaiselle roottorille on oma optimaalinen nopeussuhteen suuruusluokka, jolla energianmuunnos on kaikkein tehokkainta, eli tehokerroin on mahdollisimman suuri.

Perinteisellä Savonius-roottorilla optimi kärkinopeussuhde on noin 1,0 ja Darrieus-roottorilla noin 4-6. (Frantsi 1983, 33; Mathew 2006, 15)

Tehokerroin voidaan määritellä myös yhdistämällä edellä mainitut yhtälöt 3, 6 ja 7.

$$C_p = \frac{2 P_T}{\rho_a A_T V_\infty^3} = \frac{2 M \omega}{\rho_a A_T V_\infty^3} = \frac{2 M}{\rho_a A_T V_\infty^2 R} \frac{\omega R}{V_\infty} = C_M \lambda \quad (8)$$

Momenttiteoriassa tarkastellaan ainoastaan tietyllä virtausnopeudella liikkuvaa ilmassaa ja työtä tekevä siipi jätetään kokonaan huomioimatta. Teoriassa tarkastellaan siis ainoastaan virtaavan ilmassan kineettisen energian häviämistä sen nopeuden muuttuessa. (Frantsi 1983, 34.) Kuvassa 2 on havainnollistettu virtauksen nopeuden- ja paineen muutosta tuuliturbiinin roottorin vaikutuksesta.



Kuva 2: Periaatekuva roottorin vaikutuksesta virtauskenttään sekä virtausnopeuden ja paineen aksiaaliset komponentit ylä- ja alavirtauksessa suhteessa roottoriin. Kuvassa V_0 on vapaan virtauksen nopeus, p_0 on vapaan virtauksen paine, u on virtausnopeus roottorin vaikutuksesta ja u_1 on virtausnopeus roottorin jälkeen. (Hansen 2008, 28)

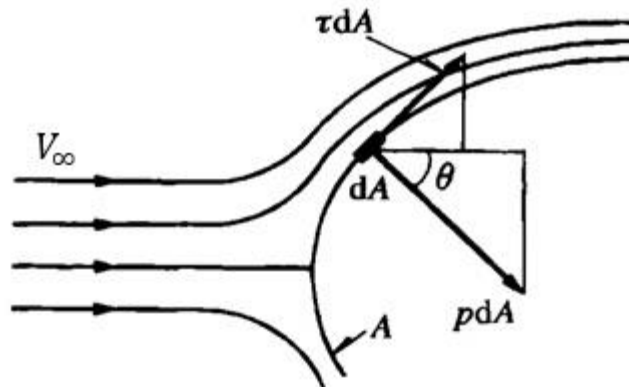
2.3 Roottorin siiven aerodynamiikka

Virtauksessa oleva kappale on muodostaan riippumatta aina ympäröivän fluidin aiheuttamien voimien kohteena. Jos tasainen levy asetetaan virtaukseen sen suuntaisesti, siihen vaikuttavat voimat ovat ainoastaan virtauksen suuntaisia ja näitä voimia kutsutaan virtausvastusvoimaksi D . Virtaukseen asetettuun aerodynaamisesti suunniteltuun siipeen vaikuttaa virtauksen suuntaisen voiman lisäksi nostovoima L kohtisuoraan virtausta vasten. (Nakayama & Boucher 1999, 149)

Tarkastellaan kuvan 3 mukaisesti kappaleen pintaan vaikuttavan fluidin painetta p ja leikkausrasitusta τ , olemattoman pienen pinta-alan dA alueella. Paineen p aiheuttama voima $p dA$ vaikuttaa kappaleeseen sen pinnan normaalin suuntaisesti, kun kitkavaikutus τdA on pinnan tangentin suuntainen. Painevoiman vaikutusta kutsutaan painevastukseksi tai muotovastukseksi D_p ja kitkavoimien vaikutusta pintahankausvastukseksi D_f . Näiden voimien kokonaisvaikutus saadaan integroimalla kyseiset voimat virtauksen suuntaisesti yhtälöiden 9 ja 10 mukaisesti tarkasteltavan kappaleen kokonaispinta-alan yli. Kappaleeseen vaikuttava kokonaisvirtausvastus saadaan summaamalla muotovastus ja pintahankausvastus yhteen. Taulukossa 1 on esitettyä erimuotoisten kappaleiden vastusvoiman jakaantuminen pintahankausvastus- ja muotovastus osuuksiin. Integroimalla voimien komponentit $p dA$ ja τdA virtauksen U normaalin suuntaan, saadaan laskennallinen nostovoima L . (Nakayama & Boucher 1999, 149)

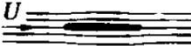



$$D_p = \int_A p dA \cos \theta \quad (9)$$

$$D_f = \int_A \tau dA \sin \theta \quad (10)$$



Kuva 3: Virtauksessa V_∞ sijaitsevaan kappaleeseen vaikuttavan virtausvastuksen jakaantuminen muotovastuskomponenttiin $p dA$ ja pintahankausvastuskomponenttiin τdA (Nakayama & Boucher 1999, 149).

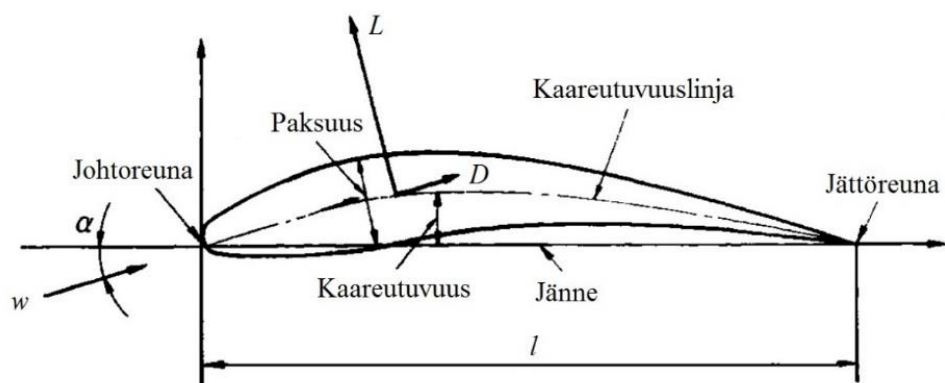
Taulukko 1: Erimuotoisten kappaleiden pintahankausvastuksen ja muotovastuksen osuudet kokonaisvastusvoimasta (Nakayama & Boucher 1999, 150).

Muoto	Muotovastus D_p (%)	Pintahankausvastus D_f (%)
	0	100
	≈ 10	≈ 90
	≈ 90	≈ 10
	100	0

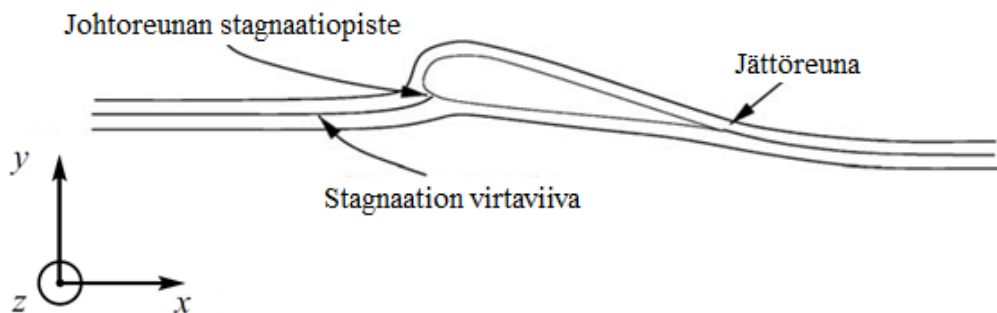
Virtausvastuksen D laskeminen yhtälöillä 9 ja 10 on haastavaa muuten kuin hyvin yksinkertaisille muodoille hyvin rajallisella virtausnopeuden alueella. Tästä syystä virtausvastus määritetään kokeellisesti eri muodoille, ja ilmoitetaan yleensä dimensiottomassa muodossa vastusvoimakertoimenä C_D . Liitteen I taulukossa on esitettyinä joidenkin eri muotojen vastusvoimakertoimen arvoja.

2.3.1 Nostovoimaroottorin siiven aerodynamiikka

Nostovoimaan perustuvan tuuliturbiinin siiven aerodynamiikkaa on yleisesti hyväksyttyä kuvata 2D mallilla (Hansen 2008, 7). Kuvassa 4 on esiteltyä nostovoimaa tuottavaa 2D siipiprofiilia koskevaa termistöä ja kuvassa 5 on havainnollistettu liikkeessä olevan siipiprofiilin 2D virtauskenttä.



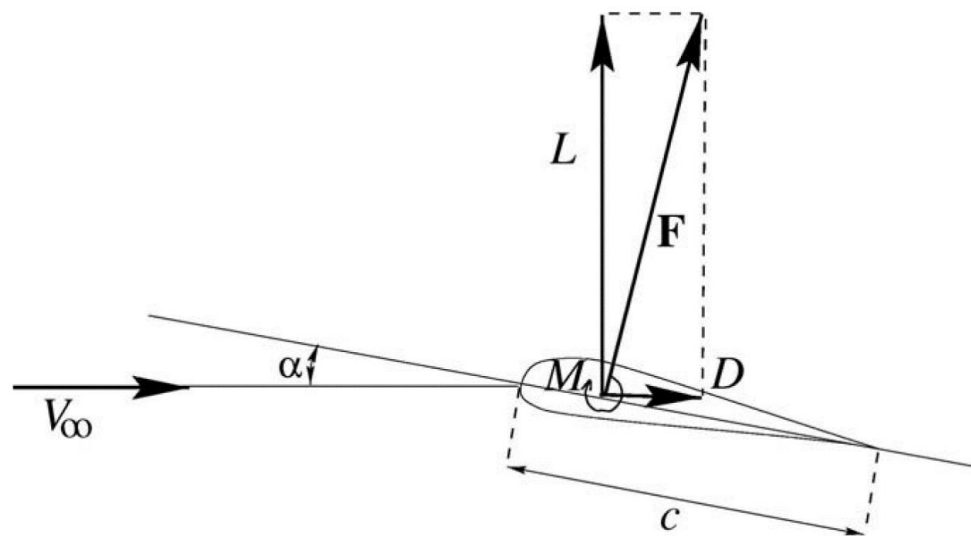
Kuva 4: Nostovoimaa tuottavaa 2D siipiprofiilia koskevat termit. α on kohtauskulma, w on suhteellinen nopeus, l on siiven jänteen pituus, L on nostovoima ja D on vastusvoima (Nakayama & Boucher 1999, 163).



Kuva 5: Periaatekuva 2D virtauskentästä siipiprofiilin ympärillä. Stagnaatiopisteellä tarkoitetaan virtauskentän pistettä, jossa paikallinen fluidin virtausnopeus on nolla ja rajakerroksen paksuus on hyvin pieni. (Hansen 2008, 7)

Ilmavirtauksen siipiprofiiliin aiheuttama resultanttivoima F voidaan kuvan 6 mukaisesti jakaa virtauksen suuntaiseen komponenttiin, virtausvastukseen D , sekä virtausta vastaan kohtisuoraan olevaan komponenttiin eli nostovoimaan L . Lisäksi Siipeen vaikuttaa

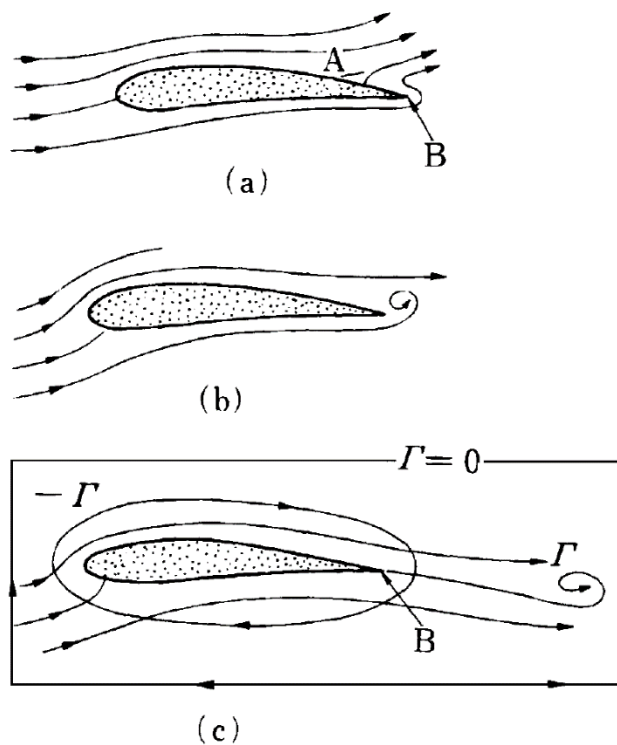
sirkulaation Γ aiheuttama momentti M joka pyrkii kiertämään siipeä sen sirkulaatiopisteen ympäri aiheuttaen pituuskallistusta. Sirkulaatiolla tarkoitetaan kaasu- tai nestepartikkelin liikettä tietyn akselin ympäri niin, että sen aksiaalinen nopeuskomponentti on nolla (Frantsi 1983, 40). Siipiprofiilin sirkulaatioakselin paikaksi valitaan yleensä $\frac{1}{4}$ jänteen pituudesta alkaen johtoreunasta. Voimien todellinen vaikutuspiste riippuu hetkellisestä kohtauskulman arvosta, siipiprofiilin paksuudesta sekä muodosta ja Reynoldsin luvun arvosta.



Kuva 6: Periaatekuva siipiprofiiliin vaikuttavista voimista. V_∞ on vapaan virtauksen nopeus, α on kohtauskulma, c on siipiprofiilin jänteen pituus ja F on nostovoiman L ja vastusvoiman D muodostama resultanttivoima. M on sirkulaation aiheuttama momentti. (Hansen 2008, 8)

Ilmavirran kohdatessa siiven etureunan siipi ohjaa virtaviivoja kulkemaan sen pintaa pitkin sen molemmilta puolilta. Siipiprofiilin muoto ja asetuskulma pakottavat toiselle puolelle suuremman virtausnopeuden. Nopeusjakaumien ero siiven eri pinnoilla aiheutuu sirkulaatiosta. Sirkulaation syntymekanismia siipiprofiilin ympärille on havainnollistettu kuvassa 7 ja se muodostuu terävän jättöreunan ansiosta. Kuvassa 7 (a) paikallaan oleva siipi lähtee liikkeelle ja potentiaalisesta virtauksen käyttäytymisen johdosta pisteeseen A muodostuu stagnaatiopiste jonka seurauksena virtaus yrittää kulkea jättöreunan B ympäri. Jättöreunan terävyyden johdosta virtaus ei kuitenkaan pääse kiertämään jättöreunaa, vaan virtaus irtoaa siiven pinnalta muodostaen kuvan 7 (b) mukaisen pyörteen, jota kutsutaan aloituspyörteeksi, sillä se muodostuu kohtaan josta siipi aloittaa liikkeensä. Siiven

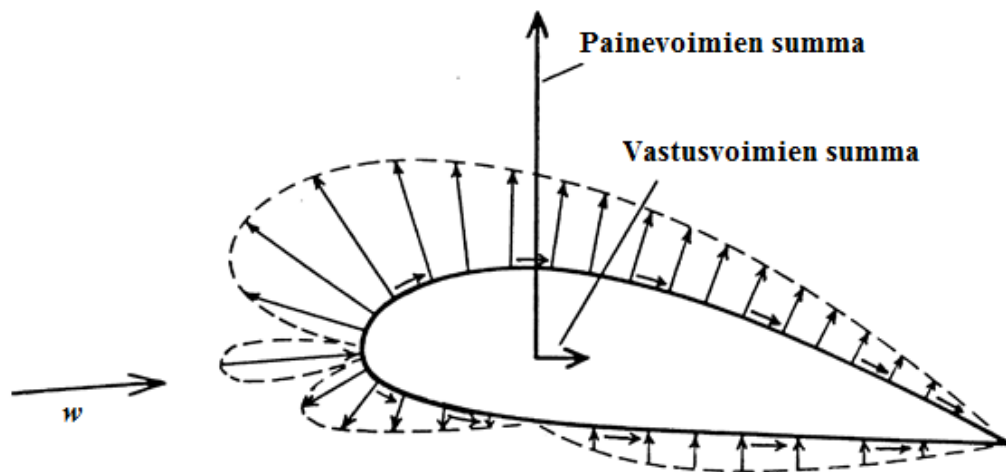
yläpuolisen pinnan virtaus kulkeutuu kohti jättöreunaa, josta muodostuu todellinen stagnaatiopiste ja virtaus kehittyy kuvan 7 (c) mukaiseksi. Aloituspyörteen muodostuessa, on muodostuttava myös toinen yhtä voimakas ja vastakkaissuuntainen pyörre, jotta valitun taserajan sisäpuolinen systeemi ei ole kokonaisuutena kiertoliikkeessä. Siipiprofiilin ympärille muodostuu siis sirkulaatio Γ , jonka siiven pinnalle aiheuttamia pyörteitä kutsutaan sidotuiksi pyörteiksi. Yllä kuvailtua tapahtumaketjua kutsutaan Kutta-Joukowski -ehdoksi. (Nakayama & Boucher 1999, 165–166)



Kuva 7: Sirkulaation Γ kehittyminen siipiprofiilin ympärille (Nakayama & Boucher 1999, 166).

Sidottujen pyörteiden vaikutuksesta siiven yläpinnan virtausnopeuden resultantti on alapinnan virtausnopeuden resultanttia suurempi. Virtausnopeuden resultantilla tarkoitetaan tässä tapauksessa vapaan virtauksen nopeuden ja sirkulaation aiheuttaman virtausnopeuden summaa, positiivisen suunnan ollessa vapaan virtauksen suuntaan. Virtausnopeuden kasvaessa siiven yläpinnalla virtauksen dynaaminen paine kasvaa, mikä pakottaa staattisen paineen alenemisen Bernoullin lain mukaisesti. Painegradientissa siiven ympärillä siiven yläpuolelle aiheutuu siis ympäristön painetta alhaisempi paine, ja siiven alapuolelle ympäristön painetta korkeampi paine. Tämä paine-ero aiheuttaa siipiprofiiliin vaikuttavan,

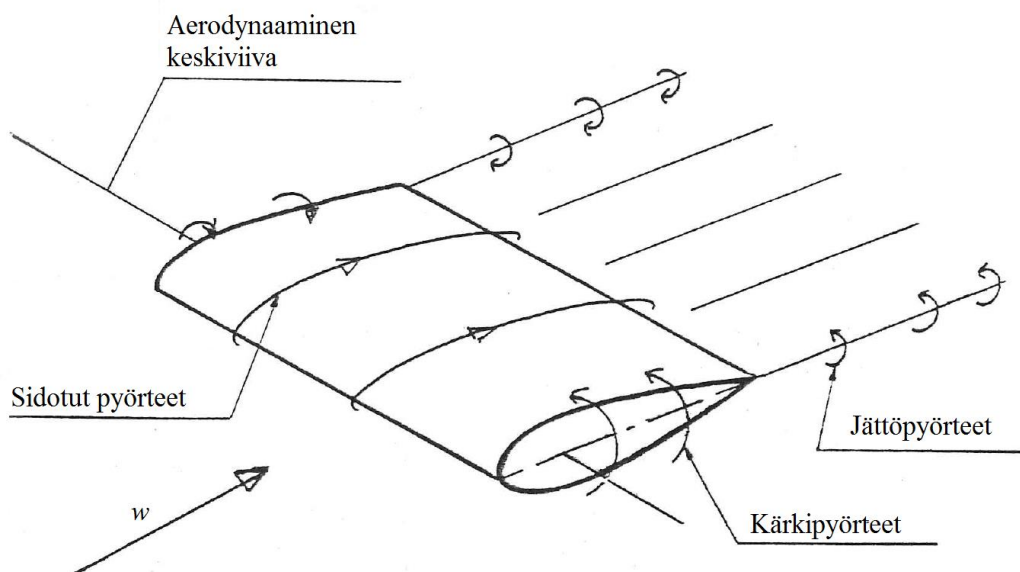
virtauksen suhteen poikittaisen nostovoiman L . Syntyvän nostovoiman suuruus muuttuu kohtauskulman funktiona ja kohtauskulman kasvaessa liian suureksi virtaus irtoaa siiven pinnasta. Virtauksen yhtäkkistä ja täysimittaista irtoamista siiven pinnalta kutsutaan sakkaukseksi (englanniksi static stall) ja kohtauskulman arvoa, jolla siipi sakkaa, kutsutaan kohtauskulman sakkaurajaksi. Siipiprofiilin alipaineista puolta kutsutaan yleisesti imupuoleksi ja korkeapaineista puolta painepuoleksi. Virtauksessa olevan siipiprofiilin ympärille muodostuvaa painekenttää ja sen aiheuttamien osavoimien jakaantumista 2D siipiprofiilin pinnalle on havainnollistettu kuvassa 8.



Kuva 8: Esimerkki 2D siipiprofiilin ympärille muodostuvasta painekentästä sekä kappaleeseen vaikuttavien osavoimien resultanteista sen kohdatessa suhteellisen nopeuden w (Det Norske Veritas 2002, 61).

Siipeen aiheutuvan vastusvoiman D synty on hieman monimutkaisempi ja se voidaan jakaa neljään eri osaan. Kun siipiprofiili on asetettu virtaukseen lähes sen suuntaisesti, eli kohtauskulma on pieni, rajakerros säilyy lähes ehjänä koko siiven jänteen matkalta, jolloin syntyvä vastusvoima aiheutuu lähinnä viskoosisen virtauksen siiven pintaan aiheuttamasta pintahankausvastuksesta. Muotovastusta aiheutuu siipiprofiiliin lähinnä rajakerroksen irrotessa profiilin pinnasta kohtauskulman kasvaessa liian suureksi. Pintahankausvastus sekä muotovastus ovat viskooseja voimia, eli niiden suuruus riippuu virtaavan ilmamassan ominaisuuksista. Siipiprofiilin pinnan karheudesta aiheutuva vastus syntyy laminaarisen rajakerroksen muuttuessa turbulenttiseksi. (Frantsi 1983, 40–41)

Neljäs vastusvoiman komponentti on nostovoiman indusoima vastus. Kun siipeä tarkastellaan kuvan 9 tavoin kolmidimensionaalisena kappaleena, jolla on äärellinen pituus, syntyy siiven päihin pyörteitä. Pyörteet aiheutuvat kun siiven eri puolille aikaansaatu paineero pyrkii tasoittumaan virtaamalla siiven kärkien ylitse kärkipyörteinä ja siiven ympäri sidottuina pyörteinä. Kärkipyörteet kääntävät ilmavirtausta siiven yläpinnalla sisäänpäin ja alapinnalla ulospäin. Tästä aiheutuu siiven jättöreunalle siiven eri puolilta tulevien virtauksien nopeuksien suuntaero, mistä aiheutuu niin sanottu erotuspinta virtauksien välille, joka kehittyy siiven jättöreunalla kahdeksi vastakkaissuuntaiseksi pyörteeksi, joiden pyörimisakselit ovat likimain virtauksen suuntaiset. Näitä pyörteitä kutsutaan vapaiksi- eli jättöpyörteiksi. Sidotut- ja jättöpyörteet kääntävät tulovirtausta alaspäin ja täten aiheuttavat indusoitunutta vastusta. (Frantsi 1983, 41)



Kuva 9: Esimerkki virtauksessa olevaan siipiprofiiliin syntyvistä pyörteistä 3D-tapauksessa (Frantsi 1983, 41).

Nostovoima L ja vastusvoima D esitetään yleensä dimensiotomissa muodossa nostovoimakertoimena C_L sekä vastusvoimakertoimena C_D . Jotta siipiprofiiliin vaikuttavat voimat voidaan esittää kokonaisuutena, on tarpeen tietää myös siipen vaikuttava momentti C_m . (Hansen 2008, 8-9)

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c} \quad (11)$$

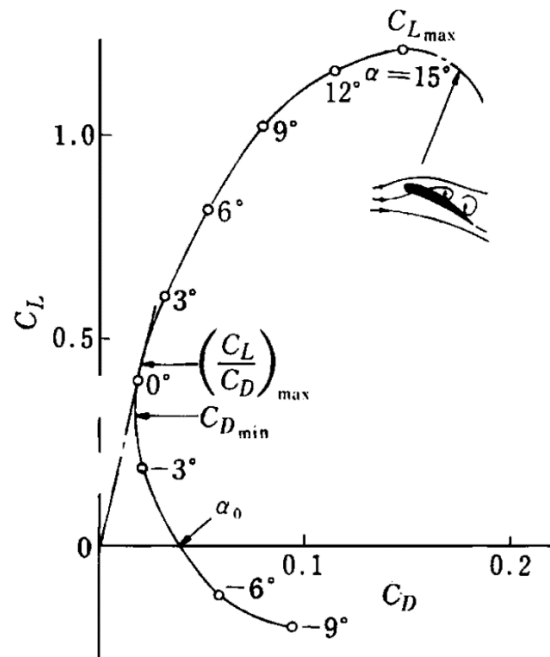
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c} \quad (12)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c^2} \quad (13)$$

missä	L	nostovoima [N]
	D	vastusvoima [N]
	M	momentti [Nm]
	ρ	virtaavan fluidin tiheys [kg/m ³]
	V_∞	vapaan virtauksen nopeus [m/s]
	c	siiven jänne [m]

Muuttumattomissa olosuhteissa, jossa virtaus on kiinnittynyt siiven pintaan, nostovoima käyttäytyy lähes lineaarisesti kohtauskulman funktiona, kun kohtauskulman arvot pysyvät sakkaurajojen sisäpuolella.

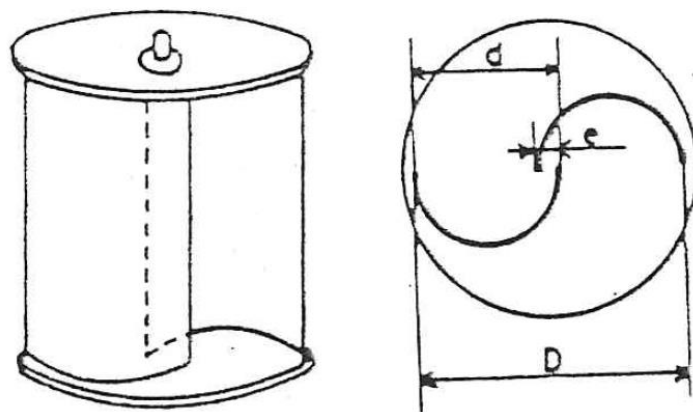
Eri siipiprofiilien suorituskyky ilmoitetaan yleensä Reynoldsin luvun sekä kohtauskulman funktiona nosto- ja vastusvoimakertoimien avulla, jotka on määritelty joko kokeellisesti tuulitunnelimittauksilla tai laskennallisesti. Laskentaohjelmina siipiprofiilien suorituskyvyn arvioinnissa käytetään yleisesti esimerkiksi XFOIL ja PROFOIL ohjelmia, jotka ovat avoimesti saatavilla. Dimensiottomien lukujen käyttö mahdollistaa yksittäisten siipiprofiilien suorituskyvyn keskinäisen vertailun. Kuvassa 10 on havainnollistettu periaatteellista siipiprofiilin nostovoimaa vastusvoiman funktiona.



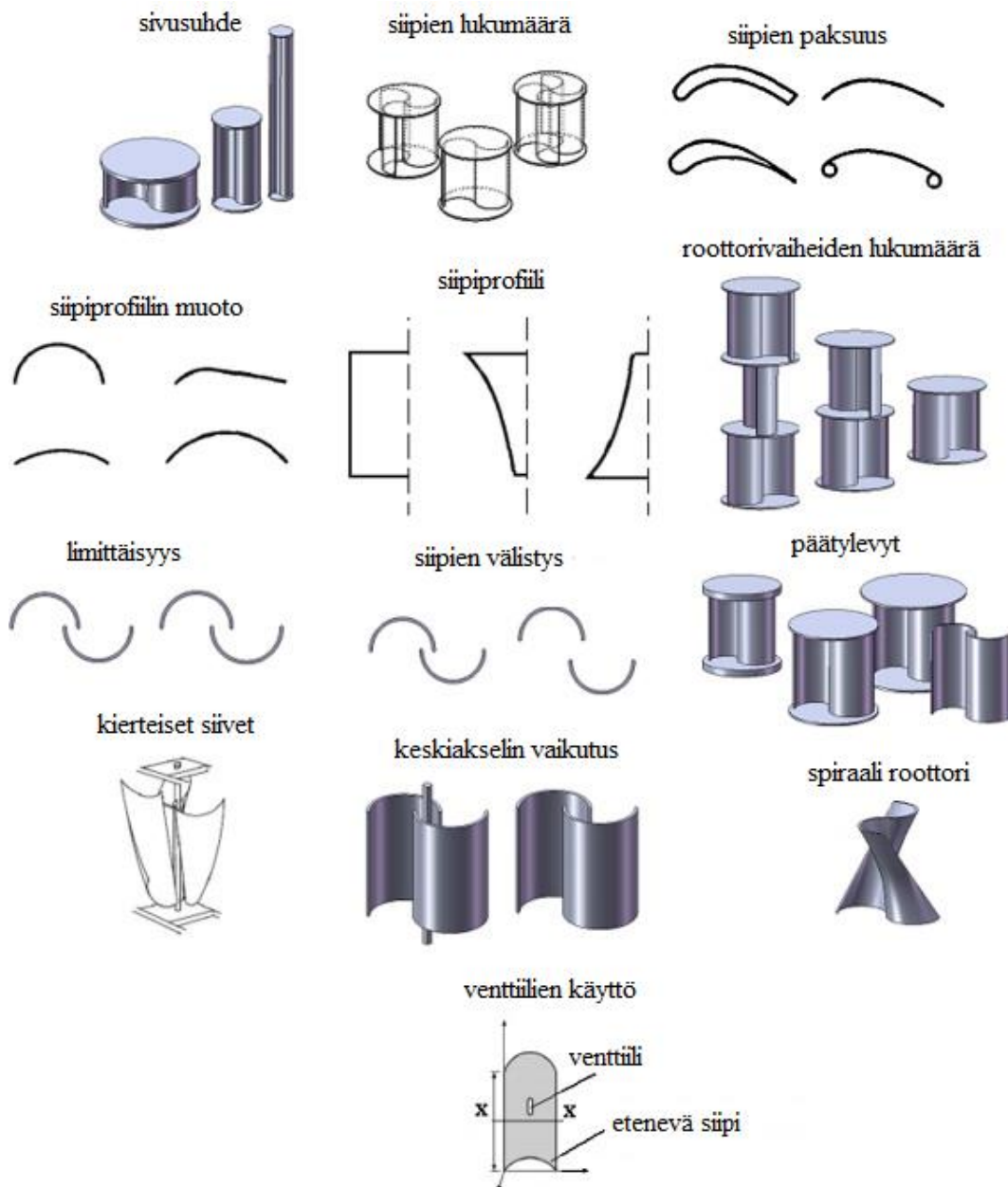
Kuva 10: Periaatekuva siipiprofiilin nostovoima-vastusvoimakertoimien käyrästä (Nakayama & Boucher 1999, 165).

3 VASTUSVOIMAAN PERUSTUVAT PYSTYAKSELISET TUULITURBIINIT

Ilmanvastuksella toimivalla tuuliturbiinilla tarkoitetaan laitetta, jossa ilman kineettinen energia muutetaan virtauksessa sijaitsevan kappaleen aiheuttaman ilmanvastuksen avulla pyörivän akselin vääntömomentiksi ja mekaaniseksi energiaksi. Yksi esimerkki vastusvoimaan perustuvasta tuuliturbiinista on vuonna 1922 suomalaisen Sigrud Savoniuksen patentoima Savonius-roottori. Periaatteellinen Savonius-roottorin rakenne on hyvin yksinkertainen ja sen valmistaminen on mahdollista halkaisemalla mikä tahansa sylinterimäinen kappale pystysuunnassa ja loitontamalla osia toisistaan leikkauspinnan suuntaisesti. Kuvassa 11 on esitettynä yksinkertaisen Savonius-roottorin periaatekuva. Muut vastusvoimaroottorit voidaan suurilta osin luokitella perinteisen Savonius-roottorin modifikaatioiksi. Kuvassa 12 on esiteltynä erilaisia tutkittuja modifikaatioita perinteiseen Savonius-roottoriin, ja osaa näistä modifikaatioista sekä niiden vaikutuksista käsitellään tarkemmin luvussa 3.1–3.6. Työssä käsitellään vastusvoimaan perustuvien tuuliturbiinien osalta pääosin perinteistä Savonius-roottorirakennetta, sekä siihen tehtyjen modifikaatioiden vaikutusta sen suorituskykyyn ja toimintaan. Roottorin toimintaa ja siihen tutkittuja parannuksia käsitellään pääosin sanallisesti ja niiden matemaattinen tarkastelu jää vaillinaiseksi.



Kuva 11: Periaatekuva perinteisestä Savonius-roottorista. D on roottorin kokonaishalkaisija, d on yhden siiven halkaisija ja e on siipien limittäisyys (Frantsi 1983, 3).



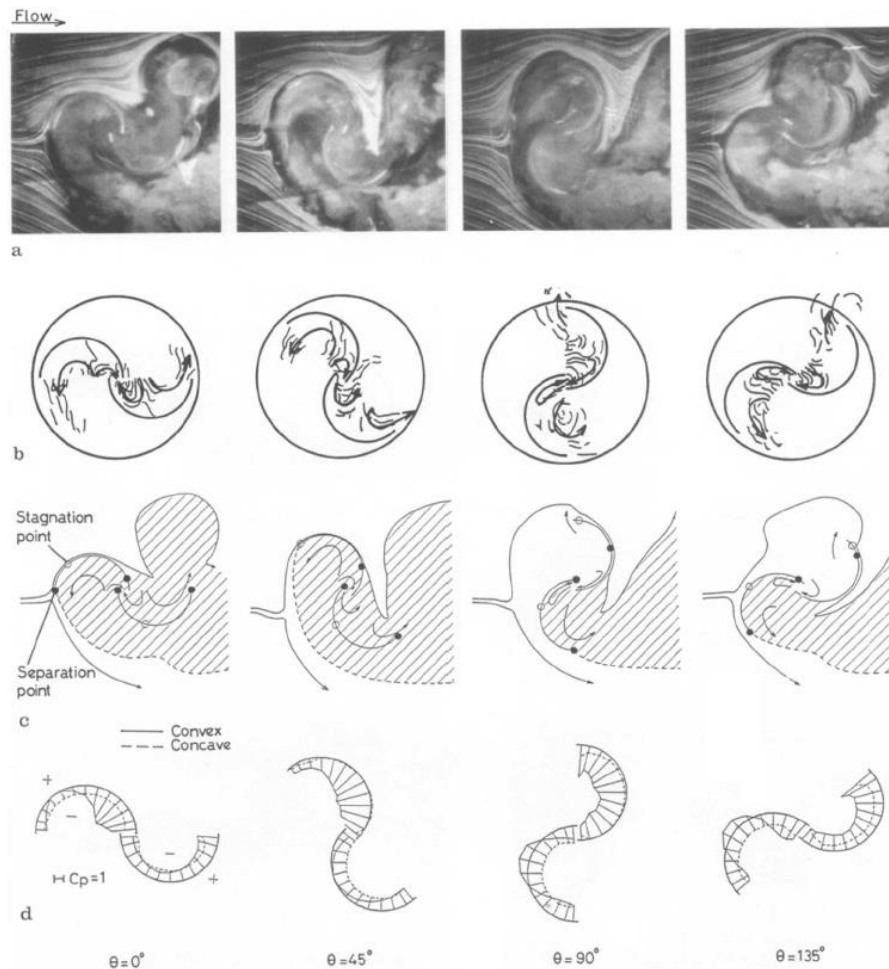
Kuva 12: Perinteiseen Savonius-roottoriin tutkittuja modifikaatioita (Akwa et al. 2012, 3059).

Vaaka-akselisen tuuliturbiinin siipen vaikuttaa sama paineenmuutos koko pyyhkäisy-pinta-alan alueelta. Jokainen vaaka-akselisen tuuliturbiinin siipi antaa siis yhtäläisen panostuksen akselin kokonaisvääntömomentin tuottamiseen. (Marmutova 2016, 6). Pystyakselisissa roottoreissa yksittäisten siipien hetkellinen panostus kokonaismomentin tuottamiseen vaihtelee syklittäisesti roottorin pyörähdysfunktiona, eikä vääntömomentin tuottaminen ole ajan suhteen tasaista edes tasaisella tuulennopeudella. Sama ilmiö koskee myös

Savonius-roottoria ja sen modifikaatioita. Savonius-roottorin palaavalla siivellä kupera puoli on tuulensuuntaa vasten ja vastusvoimakertoimen muotovaikutus on siiven koveraa puolta pienempi. Tämä vastusvoimakertoimien ero saa aikaan pyörimisliikkeen aiheuttavan vääntömomentin. Etenevän siiven vaikutus kokonaisvääntömomenttiin on siis positiivinen, kun taas palaavalla siivellä on negatiivinen momenttivaikutus.

Savonius roottorin tapauksessa ei siis ole paikkansapitävää tarkastella painetasoja ainoastaan koko roottorin pyyhkäisyypinta-alan alueelta, vaan on tarkasteltava erikseen yksittäisten pyörimisliikkeessä olevien siipien kuperien ja koverien puolten välisiä paine-eroja. Roottorin tuottama kokonaisteho voidaan laskea etenevän ja palaavan siiven tuottamien hetkellisten momenttien summan avulla. Koska osa ilmapirtauksen kineettisestä energiasta kuluu palaavan siiven vastakkaissuuntaisen vääntömomentin kumoamiseen, Savonius-roottorien tehokertoimet ovat selvästi nostovoimaan perustuvien roottoreiden tehokertoimia alhaisempia. Yleisimpiin roottorimalleihin on tutkittu useita eri parannusehdotuksia tehokertoimen nostamiseksi. (Marmutova 2016, 6–7) Liitteen II taulukossa on listattuna eri tutkimuksia koskien Savonius-roottorin suorituskykyä. Savonius-roottorilla on kuitenkin joitain etuja muihin roottori-tyyppeihin nähden. Savonius-roottorin ominaisuuksiin voidaan lukea suhteellisen korkea käynnistymisen vääntömomentti, sekä laaja toimintasäde eri tuuliolosuhteissa, kuten turbulentsissa ja puuskittaisessa tuulessa. Savonius-roottorilla on myös yksinkertainen ja kompakti rakenne sekä alhaiset valmistuskustannukset.

Tarkan virtauskentän määrittäminen pyörimisliikkeessä olevan Savonius-roottorin siipien välittömässä läheisyydessä on haastavaa. Kuvassa 13 on esitettyä virtauksen visualisointi sekä periaatekuvat pyörimisliikkeessä olevan kaksisiipisen Savonius-roottorin virtauskentästä roottorin eri asennoissa.



Kuva 13: Virtaus pyörimisliikkeessä olevan Savonius-roottorin sisällä ja ympärillä $\lambda = 0,9$ a) virtauskentän visualisointi, b) periaatekuva virtauksesta roottorin sisällä, c) periaatekuva virtausmallista, d) periaatekuva roottorin pinnan painejakaumasta. (Mohammed 2011, 30)

Savonius-roottorin laskennallisen tehon määrittämiseksi on oleellista selvittää painegradientti jokaisen yksittäisen siiven ympäriltä. Paraschivoiun kirjassa (2002, 17–20) käydään läpi matemaattinen laskentamalli Savonius-roottorin tehokertoimen määrittämiseksi. Laskentamallissa tarkastellaan roottorin siipien toimintaa jakamalla niiden toimintasykli eteneviin ja palaaviin puolikiirroksiin. Etenevällä puolikiirroksella siipi antaa positiivisen vaikutuksen vääntömomenttiin pyörimissuuntaan nähden ja palaavalla puolikiirroksella siivellä on vääntömomenttivaikutus pyörimissuuntaa vastaan. Mallissa määritellään paine-ero sekä etenevän että palaavan siiven yli, ja näiden paine-erojen avulla saadaan määriteltyä roottorin aikaansaama kokonaisvääntömomentti. Tarvittavien paine-erojen laskentaan ei kuitenkaan ole saatavilla matemaattista mallia, joten ne määritettiin

kokeellisesti. Paine-ero siiven kuperan ja koveran puolen välillä mitattiin seitsemästä eri pisteestä siiven pinnalta ja tulokset esitettiin kuvaajan muodossa, jossa kokonaispainejakauma esitettiin pyörähdyskulman funktiona. Saadut laskentatulokset tehokertoimesta kärkinopeussuhteen funktiona korreloivat hyvin kokeellistulosten kanssa. Kyseisellä laskentamallilla Savonius-roottorin maksimitehokertoimeksi saatiin 0,17.

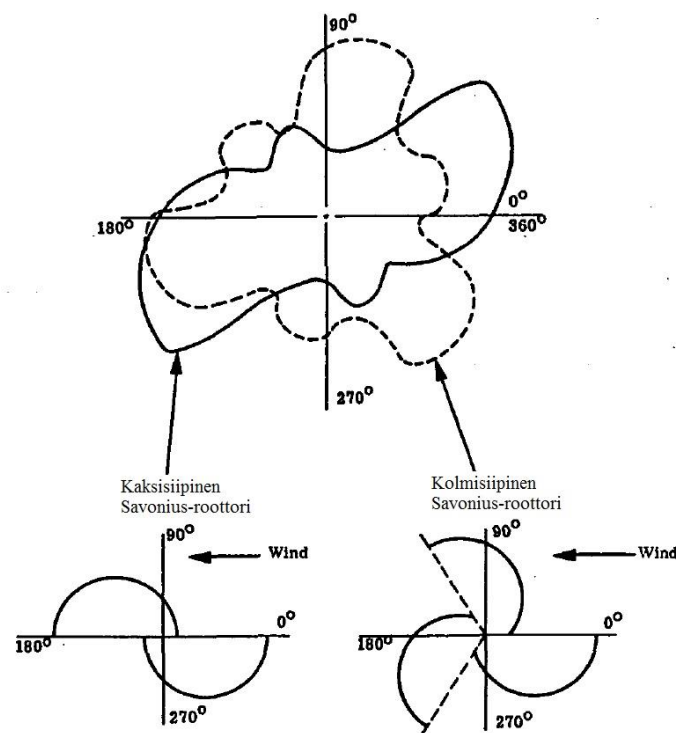
Savonius roottoriin ja sen modifikaatioihin on tutkittu useita muutoksia ja niiden vaikutuksia. Tutkittujen parametrien ja modifikaatioiden joukossa ovat muun muassa roottorin päätylevy, limittäisyys, roottorivaiheiden lukumäärä, siipiprofiilin muoto sekä Reynoldsin luku.

3.1 Roottorin vaiheiden- sekä siipien lukumäärä

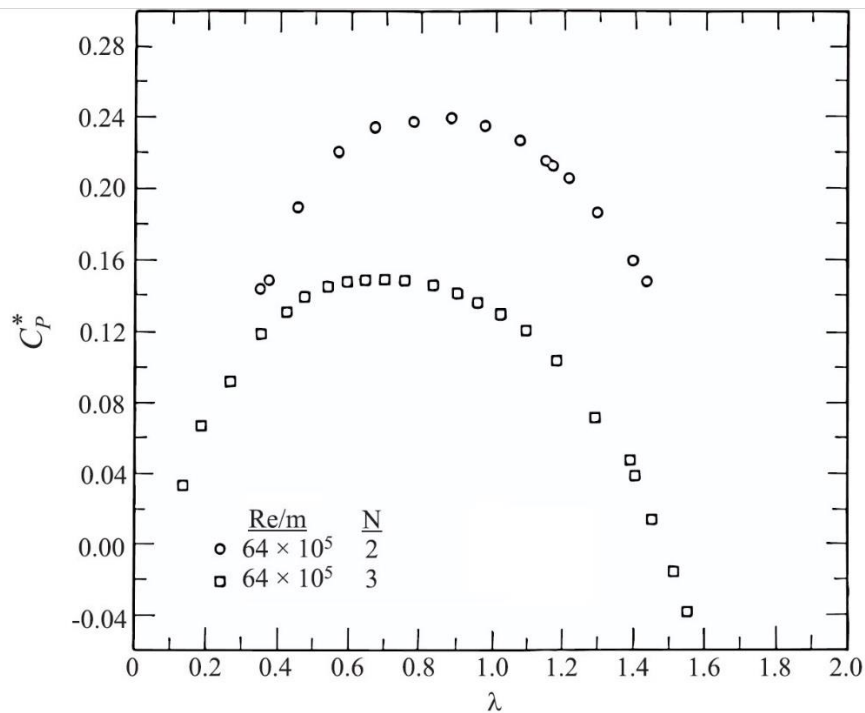
Roottorivaiheiden lukumäärän lisäämisen tarkoituksena on lisätä roottorin käynnistyksen vääntömomenttia. Käynnistyksen vääntömomentilla tarkoitetaan minimivääntömomenttia, joka tarvitaan täydessä pysäytyksessä olevan roottorin saattamiseksi pyörimisliikkeeseen. Tietyillä roottorin asennoilla tuulen suuntaan nähden kaksisiipisen ja yksivaiheisen roottorin käynnistyksen vääntömomentti ei välttämättä ole tarpeeksi suuri saattaakseen generaattorin kuormituksessa olevan roottorin pyörimisliikkeeseen. Usealla roottorivaiheella varustetussa konfiguraatiossa aina jokin roottorin vaiheista on aina suotuisassa kulmassa tuulen suuntaan nähden. Vaiheiden lisääminen vähentäisi lisäksi pystyakselisille roottoreille tyypillistä roottorin tuottaman vääntömomentin arvon heilahtelua. Monivaiheisen roottorin tuottama huippuvääntömomentti on kuitenkin alhaisempi, sillä ainoastaan yksi vaiheista kerrallaan on tuulen suuntaan nähden asennossa, josta on maksimaalinen vääntömomentin tuotto. Tasainen vääntömomentin tuotto on kuitenkin tavoiteltava ominaisuus, sillä se vähentää roottorin värähtelyä. Monivaiheisesta konfiguraatiosta voi olla seurauksena myös liiallinen inertian kasvu roottorin kokonaismassan lisääntyessä, mikä johtaa roottorin suorituskyvyn heikkenemiseen. (Marmutova 2016, 41)

Vastaavia vaikutuksia vääntömomentin tuottamisen tasaamisella saadaan lisäämällä roottorin siipien lukumäärää, ja yksi yleisemmistä modifikaatioista Savonius-roottoriin onkin kolmannen siiven lisääminen (Marmutova 2016, 41.) Kuvassa 14 on havainnollistettu siipien lukumäärän vaikutusta Savonius-roottorin staattisen vääntömomentin tuottamiseen.

Savonius-roottorin siipien lukumäärän kasvattaminen kuitenkin pienentää saavutettavissa olevien kokonaistehokertoimen ja momenttikertoimen keskiarvoa. Tämä aiheutuu koska virtauksessa etenevä siipi suuntaa osan ilmavirtauksesta seuraavan siiven ohi sekä estää virtauksen pääsyn edelliselle siivelle, jolloin yksittäisen siiven pyörähdyksen alue, jolla siipi tuottaa vääntömomenttia, pienenee ja sen tuottaman kokonaisvääntömomentin määrä vähenee. Tämä toistuva tapahtumaketju vähentää ilmavirtauksesta roottorin akselille siipien välityksellä siirtyvän kineettisen energian määrää. Kaksisiipisellä Savonius-roottorilla on siis korkein keskimääräinen tehokerroin verrattuna malleihin joissa on enemmän siipiä. Kuvassa 15 on esitetty vertailuna kaksi- ja kolmisiipisen roottorin keskimääräiset tehokertoimet nopeussuhteen funktiona. (Akwa et al. 2012, 3058)



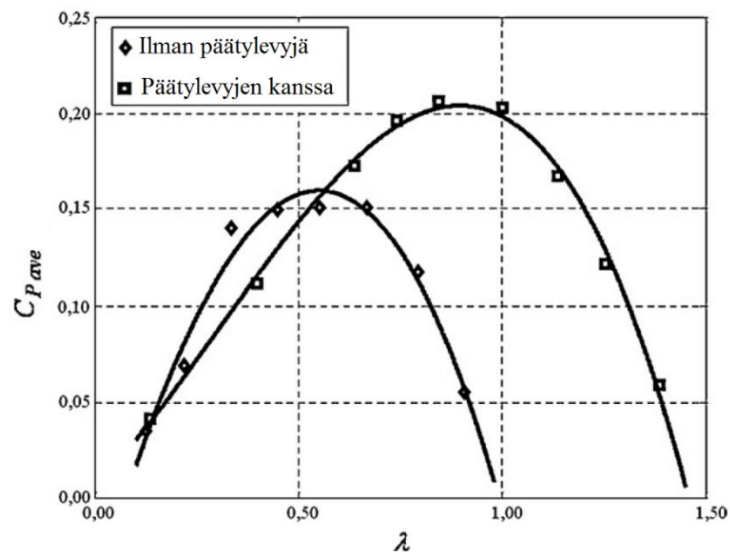
Kuva 14: Siipien lukumäärän vaikutus Savonius-roottorin tuottamaan momenttisykliin sen pyörähdyksen eri asennoissa (Akwa et al. 2012, 3060).



Kuva 15: Tehokertoimien vertailu kaksi- ja kolmisiipisen Savonius-roottorin välillä. N on siipien lukumäärä. (Paraschivoiu 2002, 24)

3.2 Sivusuhteen sekä päätylevyjen vaikutus

Roottorin ylä- ja alapuolelle asennetut päätylevyt parantavat perinteisen Savonius-roottorin suorituskykyä. Päätylevyjen optimaaliseksi kooksi on havaittu kokeellisesti olevan 1,1 kertaa roottorin halkaisijan koko (Saha et al. 2008, 1364; Akwa et al. 2012, 3057). Päätylevyt estävät roottorin siipien kärkipyörteet, jotka pienentäisivät pyörimisliikkeessä olevan siiven kuperan ja koveran puolen välistä paine-eroa. Liian suurikokoiset päätylevyt lisäävät kuitenkin roottorin inertiaa. (Akwa et al. 2012, 3057) Kuvassa 16 on esimerkki päätylevyjen vaikutuksesta Savonius-roottorin tehokertoimeen.



Kuva 16: Päätylevyjien vaikutus Savonius-roottorin tehokertoimeen (Akwa et al. 2012, 3059).

Sivusuhteella tarkoitetaan roottorin korkeuden ja halkaisijan välistä suhdetta, ja Savonius-roottorille sivusuhte määritellään yhtälön 14 mukaisesti. Useimpien tutkimusten mukaan sivusuhteen arvot luokkaa 2,0 ovat optimaalisia. (Akwa et al. 2012, 3058)

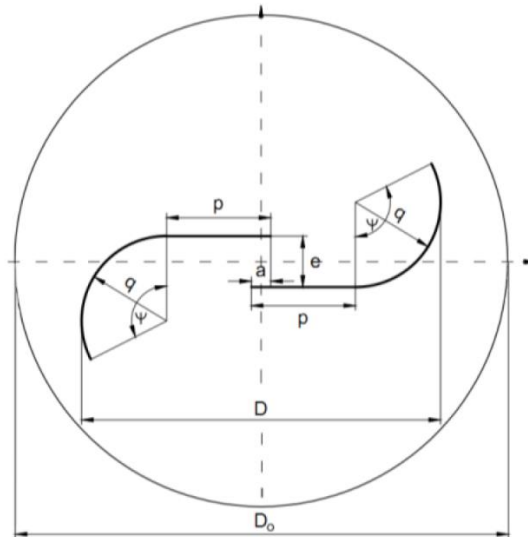
$$\epsilon = \frac{H_r}{D_r} \quad (14)$$

missä	ϵ	sivusuhte [-]
	H_r	roottorin korkeus [m]
	D_r	roottorin halkaisija [m]

Arviointia Savonius-roottorin maksimi korkeudesta tai leveydestä ei kuitenkaan ole tehty. Kyseinen arviointi sisällyttäisi mekaanisten rasitusten laskennan roottorin korkeuden funktiona. Tämän lisäksi tuulen virtausnopeus sekä Reynoldsin luku muuttuvat korkeuden kasvaessa maanpinnasta, joten jotta roottorikonaisuus toimisi vastaavalla kärkinopeussuhteella, tulisi roottorin halkaisijan vaihdella roottorin korkeuden mukaan paikallisten tuulen virtausnopeuksien suhteiden funktiona. (Marmutova 2016, 40)

3.3 Siipiprofiilin muoto

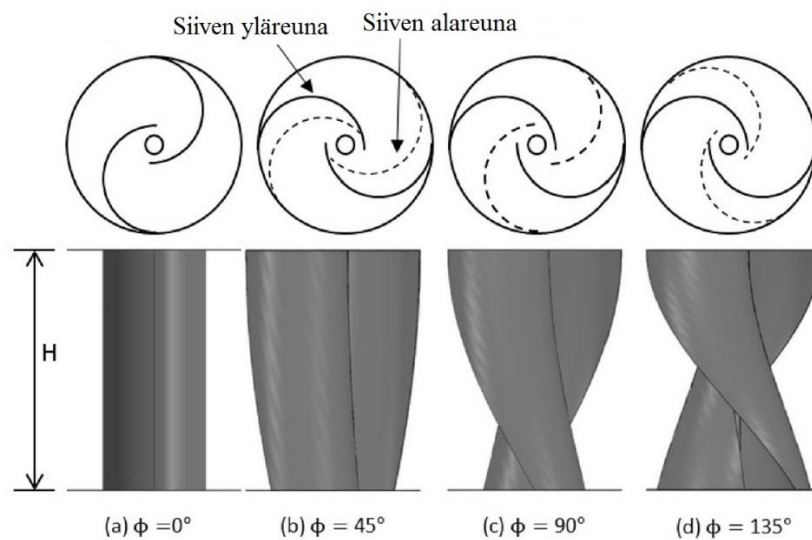
Virtaavan ilmassan kineettisen energian hyödyntämistä voidaan parantaa optimoidulla siipiprofiilin muodolla. Tutkituimpien Savonius-roottorin siipien modifikaatioiden joukossa ovat Bach-tyyppin, Koukku-tyyppin ja J-tyyppin profiilit. Kuvassa 17 on esimerkki Bach-tyyppin roottorista. Edellä mainitut modifikaatiot luokitellaankin usein kuuluvan samaan joukkoon, sillä kaikissa kolmessa ratkaisussa on tarkoituksena ohjata virtausta siiven sille osalle joka on kauimpana roottorin keskipisteestä, ja näin parantaa roottorin suorituskykyä. (Marmutova 2016, 45)



Kuva 17: Esimerkki Bach-tyyppin roottorista. Kuvassa D on roottorin halkaisija, D_o on roottorin päätylevyjen halkaisija, e on roottorin siipien välistys, a roottorin siipien limittäisyys, Ψ on roottorin siiven kaarevuuskulma ja parametrisuhteen $\frac{p}{q}$ avulla ilmoitetaan koukkumaisten roottorin siipien muotokerroin. (Kacprzak & Sobczak, 2014)

Toinen yleinen modifikaatio siipiprofiilin muotoon on kierteinen siipiprofiili. Kierteistä Savonius-roottorin siipiprofiilia on havainnollistettu kuvan 18 avulla. Roottorin siipiprofiilin kierteisyyden vaikutukseksi on havaittu, että sen aloitusväntömomentin suuruus on vähemmän riippuvainen roottorin asetuskulmasta, kuin suorilla roottoreilla. Roottori, jonka kierteisyys on 90° , on kykenevä käynnistämään pyörimisliikkeen millä tahansa roottorin asetuskulman arvolla. (Marmutova 2016, 45.) Kun roottorin kierteisyys on yli 90° , sen momenttikerroin stabiloituu ja vakiintuu (Lee et al. 2015, 243). Kierteisellä roottorilla on

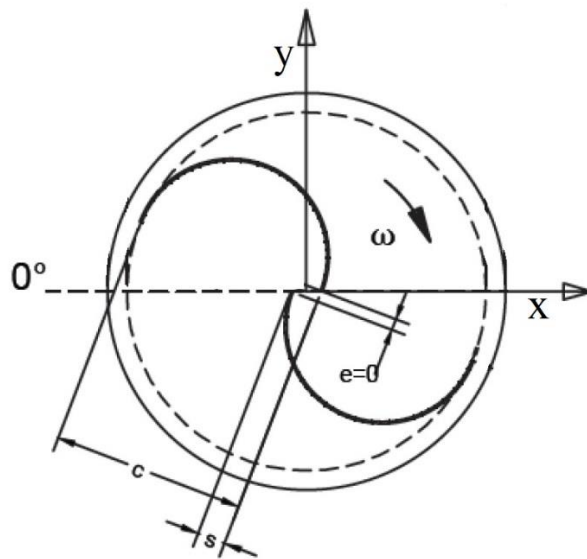
korkeampi tehokerroin limittäisyyden ollessa nolla sekä ilman keskiakselia. Roottorikokonaisuuden, jonka kierteisyys on 180° , voidaan katsoa koostuvan kahdesta päällekkäisestä 90° kierteisyyden omaavasta osaroottorista. Yleisesti roottorin kierteisyyden on havaittu parantavan roottorin suorituskykyä, mutta suuren kierteisyyden arvon omaavilla roottoreilla niiden osaroottoreiden sivusuhteet ovat alhaisia, jolloin roottorikokonaisuuden suorituskyky heikkenee. (Marmutova 2016, 45)



Kuva 18: Savonius-roottorin siipien kierteisyyden ϕ eri asteiden havainnollistaminen (Lee et al. 2015, 232).

3.4 Siipien välistys ja limittäisyys

Savonius-roottorin siipien välistä etäisyyttä voidaan muuntaa sekä x että y suunnassa kuvan 19 mukaisesti. Savonius-roottorin siipien välistykseen liittyvissä tutkimuksissa on todettu, että paras suorituskyky saavutetaan välistyksen arvon ollessa nolla. Pääsyyinä tähän on välistyksen aiheuttaman ilmavuodon kulkeutuminen kohti palaavaa siipeä, mikä estää ilmavirran keskittämisen etenevän siiven kuperalle puolelle. (Marmutova 2016, 45)

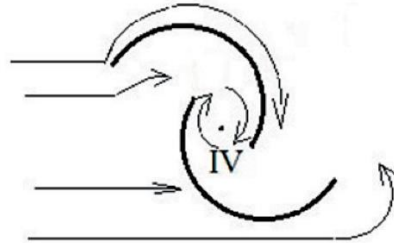


Kuva 19: Periaatekuva Savonius-roottoria koskevien parametrien limittäisyys sekä välistys määrittämiseksi. Kuvassa c on yhden siiven halkaisija, s on siipien limittäisyys ja e on siipien välistys. (Alaimo et al. 2013, 6337)

Yksi eniten tutkituista Savonius-roottorin parametreista on limittäisyys. Limittäisyys ilmoitetaan yleensä limittäisyysuhteena, joka määritellään kuvan 19 mukaisesti etäisyyden s suhteena roottorin halkaisijaan. Limittäisyys on yksi tärkeimmistä parametreista, kun määritellään roottorin siipien ympärillä kulkevien virtausten yhteisvaikutusta. Roottorin käynnistysvääntömomentin on havaittu kasvavan limittäisyysuhteen arvoilla välillä 0:sta 0,2:een, ja optimoiduksi limittäisyysuhteen arvoksi on arvioitu tutkimusten perusteella arvoa 0,15. Eri tutkimusten testiolosuhteiden vaihdella on kuitenkin haastavaa muodostaa yleisesti pätevää päätelmää tutkimustuloksista. Eri tutkimuksissa suurimmat eroavaisuudet olivat Reynoldsin luvun arvoissa sekä tuulutunnelin tukkeutumiseffektissä. (Marmutova 2016, 46)

Limittäisyysuhteen suurentamisen perusteena on ajatus siitä, että ilmavirtaus ohjautuu limittäisyyden johdosta palaavan siiven koveralle puolelle, jolloin palaavan siiven koveran puolen paine kasvaa, mikä pienentää siitä aiheutuvia pyörimissuuntaa vastustavan vääntömomentin vaikutusta. Liian suuresta limittäisyydestä aiheutuu kuitenkin kuvan 20 mukainen käännteinen virtaus roottorin keskelle. Edellä mainittu käännteinen virtaus ilmenee limittäisyysuhteen arvoilla 0,3:sta 0,5:een. Suuret limittäisyysuhteen arvot pienentävät

myös roottorin kokonaishalkaisijaa, mikä pienentää roottorin tuottaman momentin arvoa. (Marmutova 2016, 46)



Kuva 20: Suurella limittäisyysuhteella varustetun Savonius-roottorin keskiosaan kehittyvän kiertovirtauksen havainnollistaminen. (Marmutova 2016, 46)

3.5 Keskiakselin sekä muiden rakenneosien vaikutus

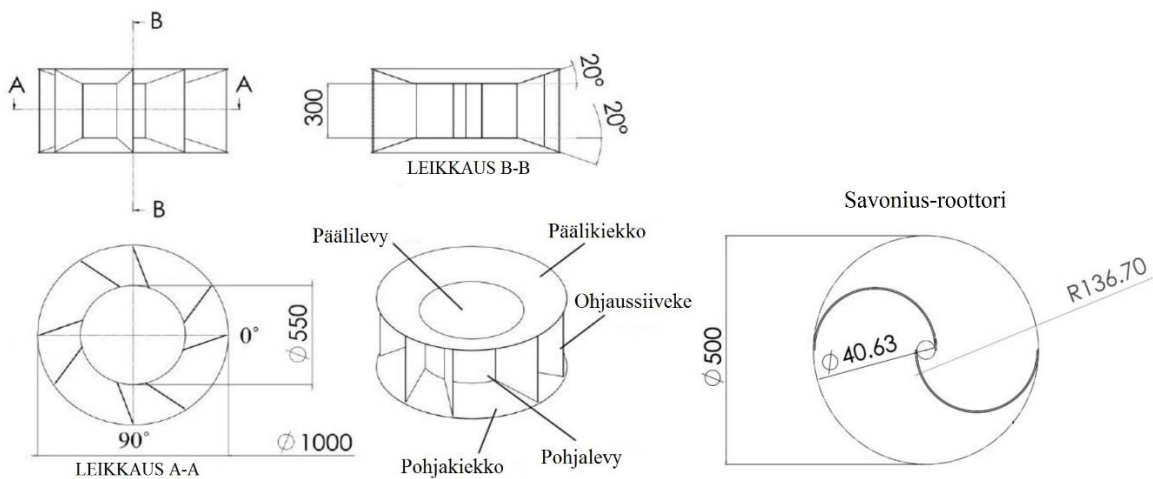
Useiden aiempien tutkimusten mukaan Savonius-roottorin keskiakseli vaikuttaa siipien välisen aukon kautta kulkevaan virtaukseen roottorin suorituskykyä heikentävällä tavalla. Keskiakselin avulla voidaan kuitenkin vahvistaa roottorin rakennetta, mutta tässä tapauksessa olisi suositeltavaan kasvattaa siipien välistä rakoa keskiakselin aiheuttaman tukkeutumisen kompensoimiseksi. (Akwa et al. 2012, 3061)

Savonius roottorin suorituskykyä on mahdollista parantaa kuvassa 12 havainnollistettujen siipiin asennettujen takaiskuventtiilien avulla, jotka sallivat virtauksen pääsyn siiven lävitse ainoastaan kuperalta puolelta koveralle puolelle ja pienentää niiden avulla palaavan siiven muotovastusta. Takaiskuventtiilien vaikutusta Savonius-roottorin suorituskykyyn koskevassa tutkimuksessa roottorin keskimääräisen tehokertoimen arvo nousi takaiskuventtiilien avulla 0,26:sta 0,31:een. (Akwa et al. 2012, 3061)

3.6 Staattorirakenteen vaikutus Savonius-roottorin toimintaan

Chong et al. 2012 tutkivat suunnittelemansa staattorirakenteen (englanniksi ODGV eli Omni-Direction-Guide-Vane) vaikutusta perinteisen kaksisiipisen Savonius-roottorin suorituskykyyn. Tutkimuksessa suoritettiin tuulitunnelitestaukset Savonius-roottorille ilman staattorirakennetta sekä staattorirakenteen kanssa. Kuvassa 21 on esitettyä tutkittujen staattorirakenteen ja Savonius-roottorin geometriat. Tuulitunnelitestit suoritettiin useilla eri

tuulennopeuksilla 3–7,5 m/s. Taulukossa 2 on esitettyä staattorirakenteen vaikutus Savonius-roottorin tehokertoimeen, ja tutkimuksessa havaittiin staattorirakenteen parantavan roottorin suorituskykyä erityisesti alhaisilla tuulennopeuksilla sekä roottorin käynnistymisessä. Roottorin tehokertoimen havaittiin laskevan tuulennopeuden kasvaessa. Vertailussa ei kuitenkaan ole huomioitu staattorirakenteen tuuliturbiinin kokonaishalkaisijaa kasvattavaa vaikutusta, vaan tehokerroin on molemmissa tapauksissa laskettu pelkän roottorin halkaisijan perusteella. Näin ollen tutkimuksen perusteella ei voida päätellä onko staattorirakenteella positiivista vaikutusta perinteisen Savonius-roottorin toimintaan, jos vertailukohteenä on roottori, jonka halkaisija vastaa staattorin ulkohalkaisijaa. Tutkimuksessa ei myöskään käy ilmi onko mittaustuloksia käsiteltäessä huomioitu tuulitunnelin seinämien vaikutukset tai tuulitunnelin tukkeutumisaikutusta, jolloin tulokset voivat olla todellisia optimistisempia ja staattorillisen tapauksen tukkeutumisaikutus olisi mahdollisesti tuulitunnelin testiosan poikkileikkauksen pinta-alasta riippuen myös selvästi paljasta roottoria voimakkaampi, mikä osaltaan voi vääristää tutkimuksessa ilmoitettuja tuloksia. Tuulitunnelin tukkeutumisen vaikutuksien arvioimista on käsitelty liitteessä III.



Kuva 21: Chong et al. 2012 julkaisussa tutkitun staattorirakenteen (ODGV) ja sen sisälle sijoitetun Savonius-roottorin geometriat. Kaikki kuvassa ilmoitetut mitat on annettu millimetreinä.

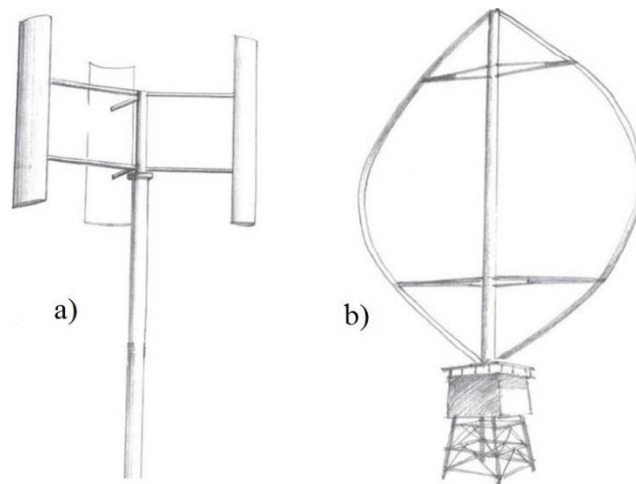
Taulukko 2: Chong et al. 2012 julkaisussa tutkitun staattorirakenteen vaikutus Savonius-roottorin maksimi tehokertoimeen ja sitä vastaava kärkinopeussuhde eri tuulenopeuksilla.

Tuulenopeus [m/s]	Staattori ja Savonius		Paljas Savonius	
	$C_{p,max}$	λ	$C_{p,max}$	λ
3	0.26	0.95	0.165	1
4.5	0.19	0.8	0.14	0.8
6	0.165	0.85	0.13	0.8
7.5	0.15	0.8	0.125	0.8

4 NOSTOVOIMAAN PERUSTUVAN PIENIKOKOISEN PYSTYAKSELISEN TUULITURBIININ SUUNNITTELU

Pystyakselinen suorasiipinen tuuliturbiini on nostovoimaan perustuva laite, jossa kaksi tai useampia siipeä pyörivät nostovoiman ansiosta keskiakselin ympäri, ja ensimmäiset mallit kyseisestä laitteesta patentoitiin jo vuonna 1931. Darrieus-tyyppisillä roottoreilla on saavutettu pystyakselisten tuuliturbiinien keskuudessa korkeimmat hyötysuhteet. (Bhutta et al. 2012, 1928.) Kuvassa 22 on havainnollistettu esimerkit sekä suorasiipisestä Darrieus-roottorista, että klassisesta ”vatkain”-tyyppisestä Darrieus-roottorista. Vaikka tämän kaltaisilla tuuliturbiineilla onkin melko yksinkertainen rakenne, sen roottorin aerodynamiikka on erittäin monimutkainen. Suorasiipisen Darrieus-roottorin suorituskykyyn vaikuttaa useat eri aerodynaamiset tekijät, jotka riippuvat sen erilaisista rakenneosista sekä toimintaympäristöstä.

Suurikokoisten suorasiipisten Darrieus-roottoreiden kehitystyö on jäänyt lähinnä tutkimusasteelle. Pienikokoisten tuuliturbiinien markkinoilla suorasiipinen Darrieus-roottori vaikuttaisi kuitenkin olevan kustannustehokkaampi vaihtoehto klassiseen malliin verrattuna. H-roottorit kehitettiin UK:ssa 70 ja 80 lukujen aikana suoritetun kehitystyön perusteella. Tutkimuksissa on havaittu että tietyillä pyörähdyskulman alueilla toisen siiven aiheuttaman vastusvoima sekä sakkaus rajoittaisivat vastakkaisen siiven kehänopeutta, jolloin roottori rajoittaa itsestään pyörimisnopeuttaan kaikilla tuulenopeuksilla. (Islam et al. 2006, 1094)



Kuva 22: a) Esimerkki suorasiipisestä H-tyypin Darrieus-roottorista. b) Esimerkki klassisesta Darrieus-roottorista. (Morgulis & Seifert 2016, 1586).

On esitetty että Darrieus-tyypin roottorin käynnistyminen on tapahtunut kun sen kärkinopeussuhteen arvo nousee yli yhden ($\lambda > 1$) (Hill et al. 2009, 22). Darrieus-roottorin toimintaperiaate perustuu siis siihen, että sen siipien pyörimisnopeus on aina tuulennopeuden monikerta. Pyörimisliike tietyllä nopeudella aiheuttaa aina näennäisen virtauksen siipiprofiilin kohtausreunalle koko pyörähdyksen ajan, joka on pyörivän roottorin kehänopeuden sekä tuulen virtausnopeuden resultanttivirtausnopeus. Tätä näennäistä virtausnopeutta kutsutaan suhteelliseksi nopeudeksi. Suhteellisen nopeuden aikaansaaman nostovoiman tangentiaalinen komponentti saa aikaan turbiinin pyörimisliikkeen.

Darrieus-liikkeessä, eli roottorin keskiakselin suhteen pyörimisliikkeessä, olevan siiven kohtauskulman arvo vaihtelee sen liikeradan aikana jaksottaisesti pyörähdyskulman funktiona. Liian suuri kohtauskulman arvo saa aikaan virtauksen irtoamisen siiven pinnasta, mikä saa siiven sakkaustilaan jolloin sen nostovoimavakio C_L laskee ja vastusvoimavakio C_D nousee radikaalisti. Rajakerros kiinnittyy takaisin siiven pintaan pyörähdyksen alueilla, joilla kohtauskulma on alle kyseisen siipiprofiilin sakkausrajan. Siipiprofiilien sakkausraja on sen muodosta riippuen yleensä 10–15 asteen väliltä.

Alkuperäiset Darrieus-roottorin mallit vaativat aina käynnistysmekanismin, sillä riittävän suuren suhteellisen nopeuden aikaansaaminen nostovoiman tuottamiseen vaatii jo valmiiksi Darrieus-liikkeessä olevan siipiprofiilin. Darrieus-roottorin itsestään käynnistyvyyttä on

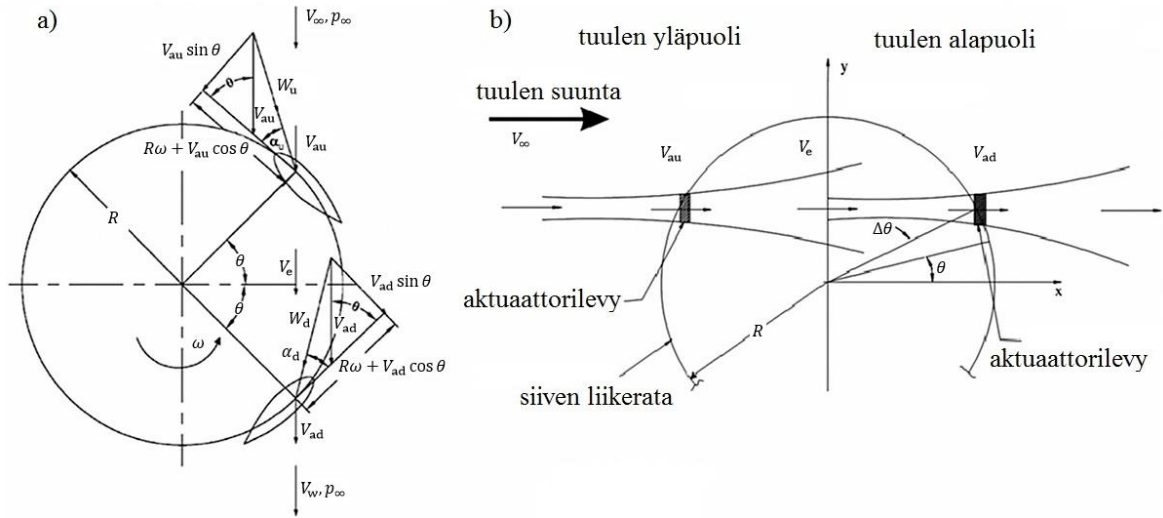
kuitenkin tutkittu ja siihen voidaan vaikuttaa esimerkiksi siipikulman aktiivisäädöllä, siipiprofiilin valinnalla, lisäämällä roottorivaiheiden lukumäärää tai nostamalla pintasuhteen arvoa. (Paraschivoiu et al. 2009, 2; Batista et al. 2015, 509)

4.1 Aerodynaaminen laskentamalli suorasiipiselle Darrieus-roottorille

Darrieus-roottorin matemaattiseen mallintamiseen käytetään yleisesti kaksinkertaistamonivirtaviivateoriaa (englanniksi Double-Multiple Streamtube Model eli DMST). Kyseisessä teoriassa roottori jaetaan kahteen erilliseen tarkasteltavaan osaan: tuulen yläpuoliseen puolisykliin sekä tuulen alapuoliseen puolisykliin. Molemmat puolisyklit jaetaan virtauskanaviin, joiden koko on $\Delta\theta$, eli tietty roottorin siiven pyörähdyskulman θ muutos, kuvan 23 b) mukaisesti. Kuvassa 23 a) tuulen yläpuoliseen osaan vaikuttavan tuulennopeus on V_∞ , siiven lapaan indusoituva virtausnopeuden osuus on V_{au} , ja vanaveden virtausnopeus on V_e . Tuulen alapuoliseen osaan vaikuttava virtausnopeus on yläosan vanaveden virtausnopeus V_e , josta siiven lapaan indusoitunut osuus on V_{ad} ja siiven vanaveden virtausnopeus on nyt koko roottorin vanaveden virtausnopeus V_w . Indusoituvien virtausnopeuksien arvot määritetään kaksoisiterointiprosessin avulla ja iterointiprosessi aloitetaan roottorin tuulen yläpuolisesta puolisyklistä. Kun roottoria käsitellään kuvan 23 b) mukaisena kaksinkertaisena aktuaattorilevy-systeeminä, nopeuksien välinen riippuvuus voidaan määritellä yhtälön 15 mukaisesti. (Morgulis & Seifert 2016, 1587)

$$V_e = 2V_{au} - V_\infty \quad (15)$$

Iterointiprosessi indusoituvien virtausnopeuksien määrittämiseksi aloitetaan olettamalla niille ensimmäinen alkuarvo, jonka avulla lasketaan roottorin siipiin vaikuttavat voimat, joiden avulla saadaan määriteltyä uusi alkuarvaus indusoituville virtausnopeuksille. Tämä iterointiprosessi toistetaan kunnes tulokset konvergoituvat. (Morgulis & Seifert 2016, 1587)



Kuva 23: a) Monivirtaviivateoria Darrieus-roottorille. R on roottorin säde, ω on pyörimisnopeus ja θ on pyörähdyskulma b) Kaksi momenttiteorian mukaista aktuaattorilevyä jokaisessa virtauskanavassa. (Morgulis & Seifert 2016, 1588)

Kaikille virtauskanaville on määriteltävä Darrieus-liikkeessä olevaan siipiprofiiliin vaikuttava suhteellinen nopeus W_i sekä kohtauskulma α_i . Tuulen yläpuoliselle osalle ne on määritelty yhtälöiden 16 ja 17 avulla, sekä tuulen alapuoliselle osalle yhtälöiden 18 ja 19 avulla.

$$W_u = \sqrt{V_{au}^2 \left(\frac{\omega R}{V_\infty} - \sin \theta \right)^2 + \cos^2 \theta} \quad (16)$$

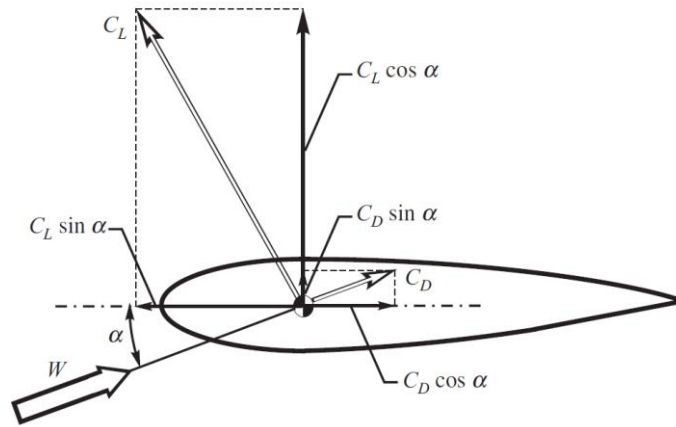
$$\alpha_u = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\left(\frac{\omega R}{V_\infty} \right) + \cos \theta} \right) \quad (17)$$

$$W_d = \sqrt{V_{ad}^2 \left(\frac{\omega R}{V_e} - \sin \theta \right)^2 + \cos^2 \theta} \quad (18)$$

$$\alpha_d = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\left(\frac{\omega R}{V_e}\right) + \cos \theta} \right) \quad (19)$$

missä	W	suhteellinen nopeus [m/s]
	α	kohtauskulma [$^\circ$, rad]
	θ	pyörähdyskulma [$^\circ$, rad]
	ω	roottorin kulmanopeus [rad/s]
	R	roottorin säde [m]
	V	virtausnopeus [m/s]

Suhteellisen nopeuden ja kohtauskulman arvojen avulla voidaan määrittää Darrieusliikkeessä olevaan siipiprofiiliin vaikuttavat nostovoimakerroin C_L ja vastusvoimakerroin C_D joko kokeellisesti määritellystä siipiprofiilikohtaisesta datasta, tai käyttämällä laskentaohjelmaa kuten XFOIL. Siipiprofiilille ominaisten vastusvoima- ja nostovoimakertoimen avulla voidaan jakaa siihen vaikuttavat voimat yhtälöiden 20 ja 21 avulla tangentialiseen C_T ja normaalivoimakomponenttiin C_N . Kuvassa 24 on havainnollistettu edellä mainittua siipiprofiiliin vaikuttavien voimien jakaantumista.



Kuva 24: Havainnekuva Darrieus-liikkeessä olevaan 2D siipiprofiiliin vaikuttavien voimien jakaantumisesta tangentiaaliseen- (C_T) ja normaalivoimakomponenttiin (C_N) nostovoimakertoimen C_L , vastusvoimakertoimen C_D sekä kohtauskulman α avulla (Paraschivoiu 2002, 154).

$$C_N = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (20)$$

$$C_T = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (21)$$

Siipielementtiteorian ja liikemäärän säilymislain avulla voidaan määrittellä yhtälön 22 mukainen funktio f_{up} , joka kuvaa tuulen yläpuolisen puolisyklin ominaisuuksia, jolloin indusoitunut virtausnopeus voidaan ilmaista yhtälön 23 avulla. (Morgulis & Seifert 2016, 1588–1589)

$$f_{up} = \frac{Nc}{8\pi R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{W_u^2}{V_{au}^2} |\sec \theta| (C_N \cos \theta - C_T \sin \theta) d\theta \quad (22)$$

$$\frac{V_{au}}{V_{\infty}} = \frac{\pi}{\pi + f_{up}} \quad (23)$$

missä N roottorin siipien lukumäärä
 c roottorin siipien jänteen pituus [m]

Kuvailtua iterointiprosessia jatketaan kunnes virtausnopeuden V_{au} arvo konvergoituu. Sama iterointiprosessi toistetaan tuulen alapuoliselle puolisyklille, mutta virtausnopeuden V_{∞}

tilalla laskennassa käytetään yhtälön 15 avulla ratkaistua nopeutta V_e . Kun tangentiaaliset voimat on määritelty koko roottorin pyörähdykselle, voidaan laskea tangentiaalisen voiman keskiarvo yhtälön 24 avulla. Kun yksittäisen siiven aikaansaaman tangentiaalisen voiman keskiarvo on määritetty, voidaan laskea roottorin tuottama kokonaisvääntömomentti yhtälön 25 avulla ja roottorin tuottama aerodynaaminen teho yhtälön 26 avulla.

$$F_{T,ave} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\theta) d\theta \quad (24)$$

$$Q = NF_{T,ave}R \quad (25)$$

$$P = Q\omega \quad (26)$$

missä	$F_{T,ave}$	tangentiaalisen voiman keskiarvo [N]
	Q	roottorin tuottama kokonaisvääntömomentti [Nm]
	P	roottorin tuottama teho [W]

Edellä kuvattu laskentamalli ennustaa Darrieus-roottorin suorituskykyä varsin tarkasti, ja sen laskentatuloksien on todettu korreloivan hyvin kokeellisten tuloksien kanssa. Laskentamallin ongelmina on kuitenkin erityisesti suuren pintasuhteen omaavien sekä alhaisella kärkinopeussuhteella toimivien Darrieus-roottoreiden suorituskyvyn tarkka ennustaminen. (Islam et al. 2006, 1103.) Matalilla kärkinopeussuhteilla toimivilla korkean pintasuhteen suorasiipisten Darrieus-roottoreiden siipien pinnan läheisyydessä olevan virtauksen on havaittu olevan erittäin monimutkainen. Siiven pinnalle muodostuu paikallisista käänteisistä virtauksista aiheutuvia voimakkaita pyörteitä, joiden olemassaoloa ei voida ennustaa kaksinkertaisella-monivirtaviivateoriolla. (McLaren et al. 2012b, 360)

4.2 Roottorin pienen halkaisijan vaikutus

Koska tarkoituksena on suunnitella mahdollisemmin kompakti tuuliturbiini-systeemi, on syytä tarkastella pienen halkaisijan vaikutusta roottorin toimintaan. Halkaisijan koon vaikutusta tarkastellaan roottorin pintasuhteen σ sekä siipikohtaisen Reynoldsin luvun avulla. Kuvassa 25 on esitettyä tuuliturbiinin roottorin halkaisijan D koon sekä roottorin

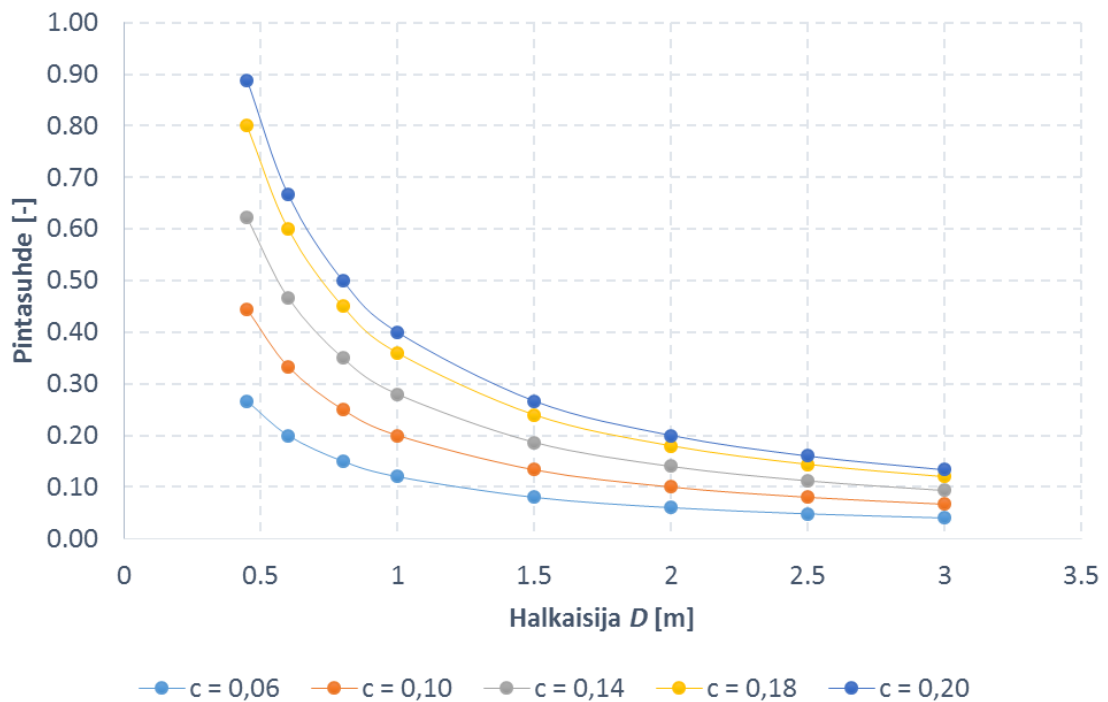
siiven jänteen c pituuden vaikutus tuuliturbiinin pintasuhteeseen kaksisiipiselle H-Darrieus roottorille.

Pintasuhde määritellään tuuliturbiineille yleisesti yhtälön 27 mukaisesti, joka supistuu suorasiipiselle Darrieus-roottorille yhtälön 28 mukaiseksi. Pintasuhteen merkitystä suorasiipien Darrieus-roottorin suorituskyvylle on käsitelty tarkemmin luvussa 4.3.

$$\sigma = \frac{Ncl}{A} \quad (27)$$

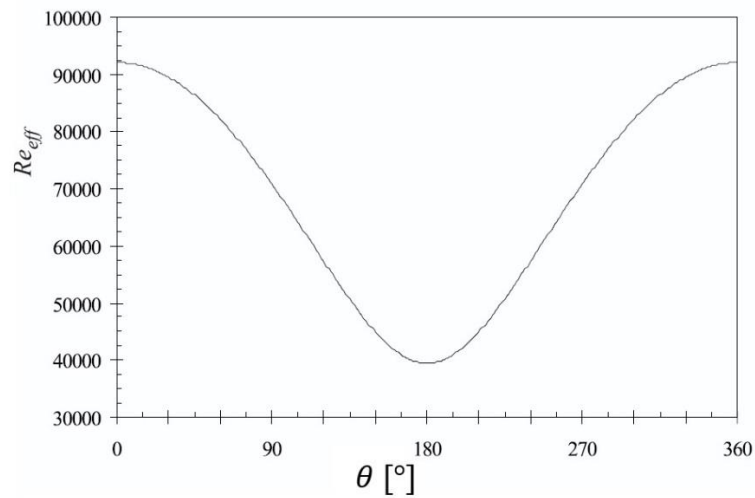
$$\sigma = \frac{Nc}{D} \quad (28)$$

σ	pintasuhde [-]
N	roottorin siipien lukumäärä [-]
c	roottorin siiven jänteen pituus [m]
l	roottorin siiven pituus [m]
A	roottorin pyyhkäisyypinta-ala
D	roottorin halkaisija [m]

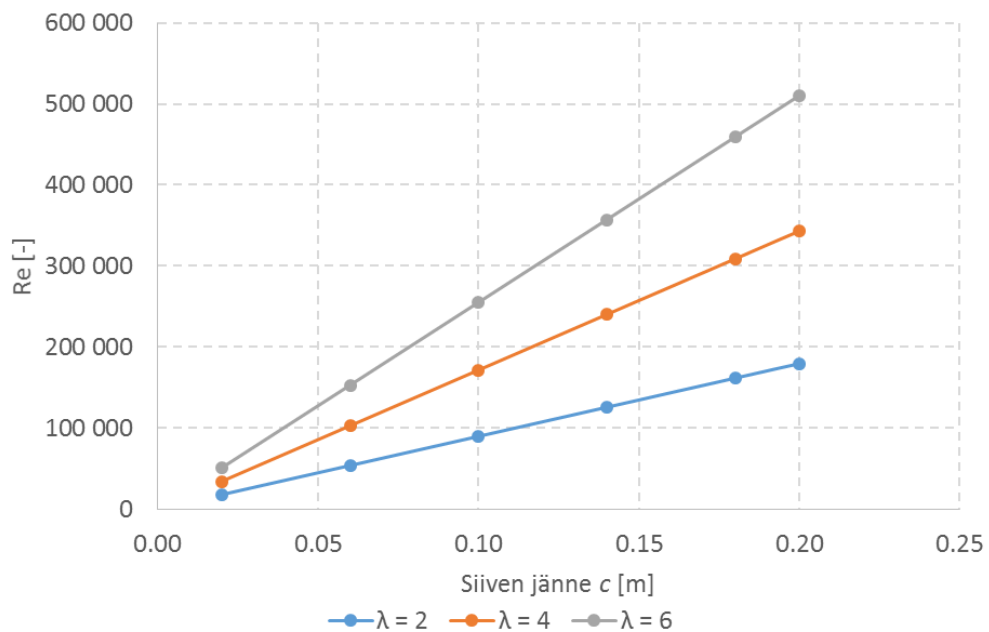


Kuva 25: Tuuliturbiinin roottorin halkaisijan D ja siiven jänteen c pituuden vaikutukset roottorin pintasuhteeseen σ kaksisiipisellä H-Darrieus roottorilla. Siiven jänteen pituus on ilmoitettu metreinä.

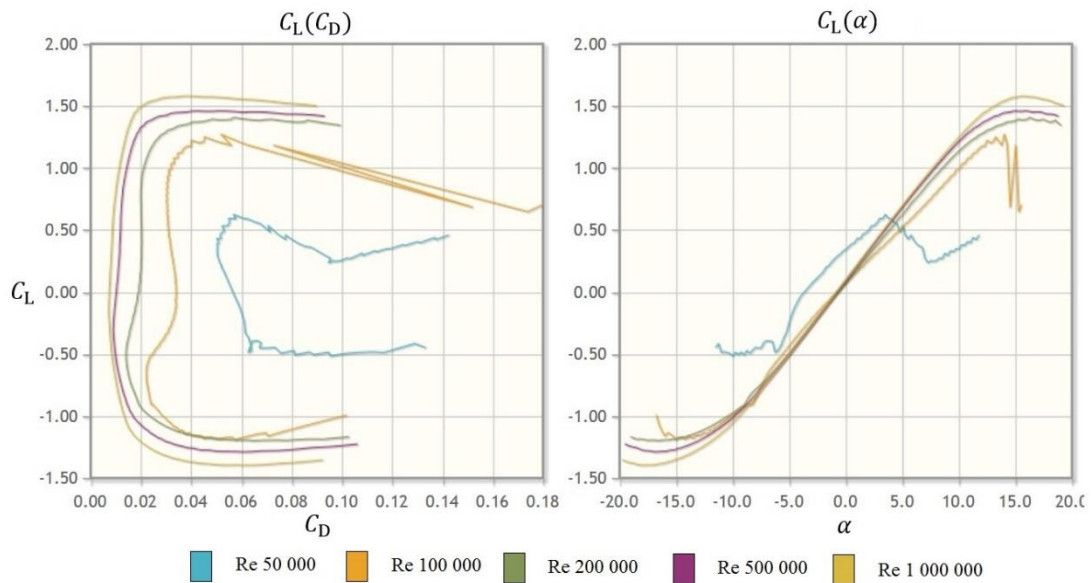
Roottorin siiven jänteen pituus määrittää siipikohtaisen Reynoldsin luvun suuruusluokan eri tuulennopeuksilla. Kuvassa 26 on esitettyä Darrieus-liikkeessä olevan siipiprofiilin Reynoldsin luvun vaihtelu yhden pyörähdyksen aikana kärkinopeussuhteen arvon ollessa 2,5. Kuvassa 27 on esitettyä roottorin yhden pyörähdyksen siipikohtaisen Reynoldsin luvun keskiarvojen vaihtelua eri nopeussuhteilla siiven jänteen pituuden muuttuessa. Siipiprofiilin suorituskyky on suoraan riippuvainen Reynoldsin luvusta, ja yleisesti voidaan todeta suorituskyvyn olevan huomattavasti parempi suurilla Re arvoilla. Kuvassa 28 on esitettyä DU W 200 siipiprofiilin nostovoimaa kohtauskulman sekä vastusvoiman funktiona eri Reynoldsin luvun arvoilla.



Kuva 26: Esimerkki siipikohtaisen efektiivisen Reynoldsin luvun vaihtelusta pyörähdyskulman funktiona yhden pyörähdysen aikana. roottorin pintasuhte on 0,25 ja kärkinopeussuhteen ollessa 2,5. (Paraschivoiu 2002, 129)



Kuva 27: Siiven jänteen pituuden vaikutus siipikohtaiseen Reynoldsin lukuun eri nopeussuhteen λ arvoilla. Ilmoitetut Reynoldsin luvun arvot on laskettu roottorin siiven yhden pyörähdysen keskiarvoina vapaan virtauksen nopeuden ollessa 6 m/s.



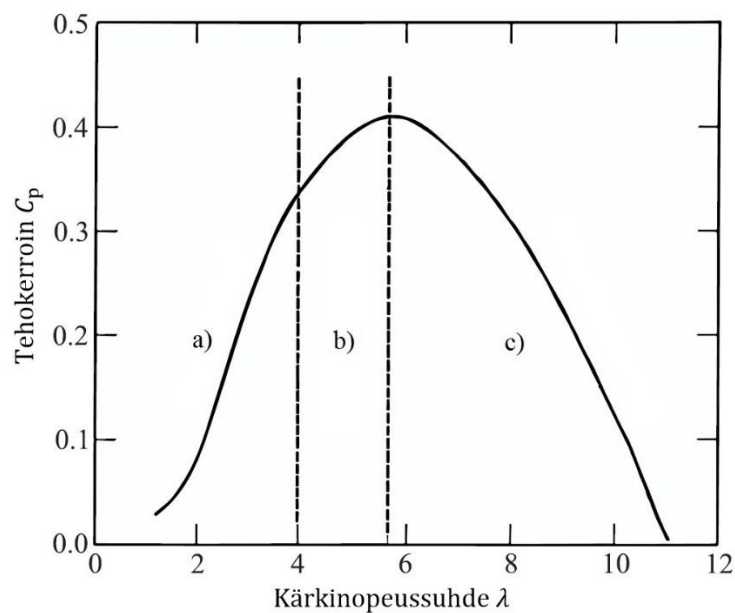
Kuva 28: DU W 200 siipiprofiilin laskennallinen nostovoimakerroin ($N_{crit} = 9$) kohtauskulman sekä vastusvoimakertoimen funktiona eri Reynoldsin luvun arvoilla. (Airfoiltools)

Kuvien 27 ja 28 käyriä vertailemalla voidaan todeta, että erityisesti alhaisen nopeussuhteen ($\lambda = 2-3$) arvoilla toimivan roottorin jänteen pituus täytyy olla yli 15 cm, jotta Reynoldsin luvun arvoksi saadaan riittävän suuria arvoja myös kohtuullisilla tuulenopeuksilla. Käytännössä pienikokoiselle tuuliturbiini-ratkaisulle tämä tarkoittaa sitä, että vaikka roottorin siiven jänteen pituus valitaan siten, että pintasuhteen arvo säilyy kohtuullisella tasolla (alle 0,4), niin siipikohtaisen Reynoldsin luvun arvot jäävät silti hyvin alhaisiksi erityisesti pienillä tuulenopeuksilla, jolloin roottori toimii joko hyvin heikosti tai ei lainkaan.

Kuvia 25, 27 ja 28 vertailemalla voidaan todeta, että mikäli halutaan sekä Reynoldsin luvun että pintasuhteen arvojen säilyvän kohtuullisissa rajoissa, täytyy roottorin halkaisijan olla kooltaan vähintään yksi metri. Tästä pienemmillä ratkaisuilla joko roottorin pintasuhteen arvo kasvaa liian suureksi, jotta olisi mahdollista saavuttaa korkea aerodynaaminen hyötysuhde, tai roottorin siipikohtaiset Reynoldsin luvut jäävät liian alhaisiksi riittävän suuren nostovoiman aikaansaamiseksi. Alhaisen Reynoldsin luvun vaikutuksia siipiprofiilien suorituskykyyn on käsitelty tarkemmin luvussa 4.4.

4.3 Pintasuhteen sekä kärkinopeussuhteen vaikutus

Tyypillinen Darrieus-roottorin suorituskyvyn käyrä voidaan jakaa kolmeen osaan primääristen (dynaamisten) ja sekundääristen vaikutusten tärkeyden mukaan. Primäärisiin vaikutuksiin voidaan luokitella roottorin pintasuhte sekä dynaaminen sakkkaus. Sekundäärisiin vaikutuksiin luokitellaan esimerkiksi keskiakselin ja muiden tukirakenteiden vaikutukset. Näiden kahden kategorian välillä on siirtymä-alue, jossa kaikkien vaikutusten merkitys on samaa luokkaa, joskin pienemmällä skaalalla. (Paraschivoiu 2002, 177) Kuvassa 29 on havainnollistettu tyypillisen Darrieus-roottorin tehokertoimen käyrän jakaantuminen kolmeen osaan. Kuvasta voidaan päätellä alhaisella kärkinopeussuhteella toimivan roottorin dominoivana aerodynaamisena vaikutuksena olevan dynaaminen sakkkaus, kun isoilla kärkinopeussuhteen arvoilla toimivilla roottoreilla sekundääriset vaikutukset dominoivat vaikutusta suorituskykyyn.

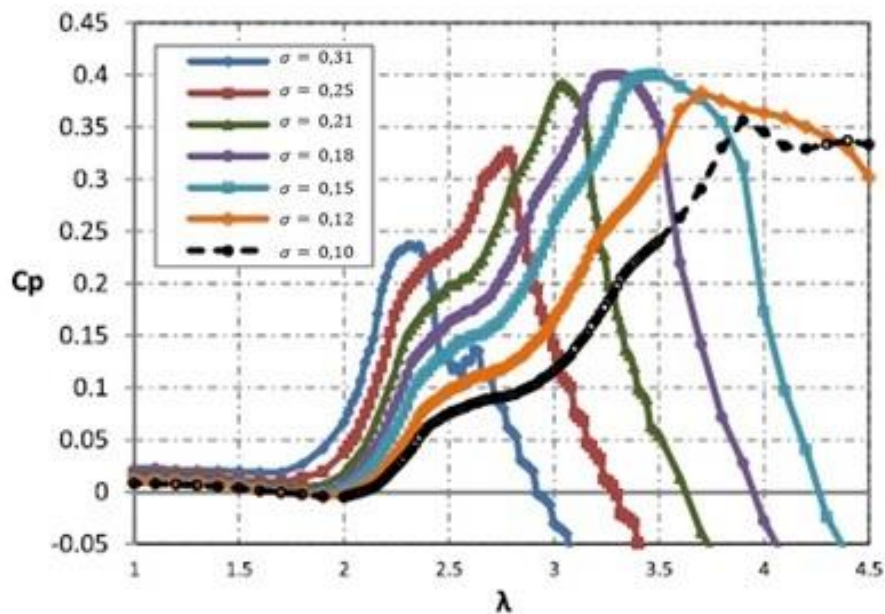


Kuva 29: Tyypillinen Darrieus-roottorin tehokertoimen käyrä jaettuna kolmeen osaan aerodynaamisten vaikutusten tärkeyden mukaan: a) primääriset vaikutukset (dynaaminen sakkkaus) b) siirtymävyöhyke c) sekundääriset vaikutukset (Paraschivoiu 2002, 177).

Suorasiipisen Darrieus-roottorin suorituskykyyn vaikuttaa voimakkaasti roottorin siipien välinen interferenssi, joka aiheutuu yksittäisten siipien aiheuttamista vanavesistä. Siipien välisen interferenssin voimakkuus on roottorin pintasuhteen funktio, siten että siipien välisen

interferenssin määrä kasvaa pintasuhteen arvon kasvaessa. Vanavesien vaikutusten johdosta efektiivisien kohtauskulmien arvot kasvavat, mikä johtaa aikaisempaan siipien sakkaukseen, ja heikentää voimakkaasti siipien aerodynaamista suorituskykyä. (Mohamed 2012, 529)

Pintasuhteen kasvaessa roottorin tehokertoimen käyrä siirtyy siis vasemmalle kuvan 30 mukaisesti. Pintasuhteen kasvaessa roottorin tehokertoimen huippu pienenee ja se saavutetaan alhaisemmalla kärkinopeussuhteen arvolla. Korkean pintasuhteen arvo pakottaa siis roottorin toimimaan alhaisemmalla kärkinopeussuhteella ja alentaa roottorin suorituskykyä. Aiheesta on saatavilla myös useita tuulitunneli sekä vesikanavatestauksia, joissa suuren pintasuhteen omaavilla ja alhaisella kärkinopeussuhteen arvoilla toimivilla roottoreilla on todettu olevan alhaisempi tehokerroin ($C_p = [0,25 - 0,30]$) alhaisen pintasuhteen roottoreihin verrattuna (Gosselin et al. 2013, 2).



Kuva 30: Esimerkki turbiinin tehokertoimesta nopeussuhteen funktiona eri pintasuhteen arvoilla. Pintasuhteen muutos on toteutettu muuttamalla roottorin halkaisijaa ja pitämällä siiven jänteen pituus ($c = 0,165$ m) vakiona. Kolmisiipinen H-Darrieus, GOE222 siipiprofiili, vapaan virtauksen nopeus 8 m/s. (Morgulis & Seifert 2016, 1596.)

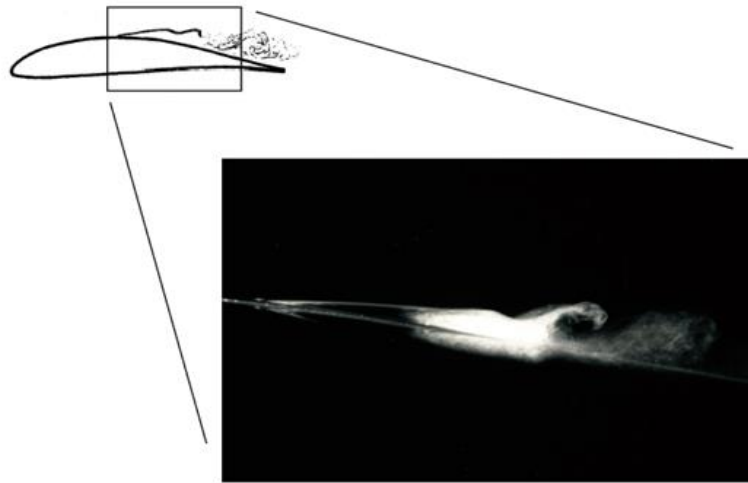
Roottorin pintasuhteen täytyy olla riittävän pieni, jotta se saavuttaa suorituskyvyn huippunsa kärkinopeussuhteen arvoilla 4–5, jolla Darrieus-roottorit vaikuttavat toimivan korkeimmalla mahdollisella tehokertoimella. Optimaaliseksi roottorin pintasuhteeksi on arvioitu arvoa 0,1. (Gosselin et al. 2013, 1–5)

Alhaisilla kärkinopeussuhteilla ($0,4 < \lambda < 2,3$) toimiminen tarkoittaa siipikohtaisen kohtauskulman ($\pm 40^\circ$) ja Reynoldsin luvun arvojen suuria vaihteluita roottorin pyörähdyksen aikana. Ongelmana tuuliturbiinisuunnittelussa on, ettei roottorilla ole todellisissa toiminta-olosuhteissa mitään yksittäistä toimintapistettä, vaan tuuliturbiinin täytyy suoriutua hyvin monipuolisissa toiminta-olosuhteissa. Roottorin suorituskyvyn kannalta suunnittelija joutuu valitsemaan myös hyvän käynnistymisen aikaisten olosuhteiden suorituskyvyn sekä nimellisen toimintapisteen olosuhteiden suorituskyvyn välillä. Käynnistymisen aikaisen suorituskyvyn maksimoinnissa keskitytään nostovoiman tuottamiseen suurilla kohtauskulman arvoilla. (Bos 2012, 91.) Voimakkaasti vaihtelevat siipikohtaiset suhteellisen nopeuden sekä kohtauskulman arvot saavat aikaan virtauksen irtoamisen dynaamisessa sakkauksessa. Suurella kärkinopeussuhteen arvoilla ($\lambda < 5$) toimivan roottorin siipikohtaisten kohtauskulmien arvojen vaihteluväli on väliltä $\pm 12^\circ$, jolloin dynaamisen sakkauksen vaikutuksilta vältytään. Dynaaminen sakkkaus on voimakas, epälineaarinen ja jatkumaton virtauksen irtoamiseen ja uudelleenkiinnittymiseen liitetty aerodynaaminen ilmiö, jonka vaikutusta on erittäin hankala ennustaa matemaattisilla malleilla, joten tutkijat ovat riippuvaisia empiirisistä malleista dynaamisen sakkauksen vaikutusten ennustamisessa. (McLaren et al. 2012a, 14; Bos 2012, 91)

4.4 Alhaisen Reynoldsin luvun vaikutus siipiprofiilin suorituskyvyn

Alhainen Reynoldsin luku ($< 200\,000$) tarkoittaa siipiprofiilin kannalta yleisellä tasolla suorituskyvyn heikkenemistä, johon pääsyyllinen on laminaarisen virtauksen irtoaminen (englanniksi Laminar Separation Bubble) siiven pinnasta. Kuvassa 31 on havainnollistettu laminaarisen virtauksen irtoamista savuvisualisoinnin avulla. Laminaarisen virtauksen irtoaminen eroaa sakkauksesta sillä, että virtauksen irtoaminen alkaa siiven johtoreunan ja jättöreunan väliseltä alueelta, kun sakkauksessa virtauksen irtoaminen tapahtuu heti johtoreunan välittömässä läheisyydessä. Laminaariselle virtauksen irtoamiselle on ominaista laajan siirtymävyöhykkeen ilmeneminen. Siirtymävyöhyke syntyy, koska virtaus ei kykene

muuntumaan laminaarisesta turbulenttiseksi siipiprofiilin pintaan kiinnittyneessä rajakerroksessa, vaan virtaus irtoaa siiven pinnasta ennen muutosta. Muutos tapahtuu virtauksen vapaassa leikkauskerroksessa, ja turbulenttiseksi muuntunut virtaus kiinnittyy takaisin siipiprofiilin pintaan. Laminaarisen virtauksen irtoamisen sekä turbulenttisen virtauksen uudelleen kiinnittymisen väliin jäävän vyöhykkeen aiheuttama muotovastus on suurilta osin vastuussa matalan Reynoldsin luvun alueella esiintyvistä suhteellisen korkeista vastusvoimakertoimen arvoista. (Selig et al. 2003, 3.)

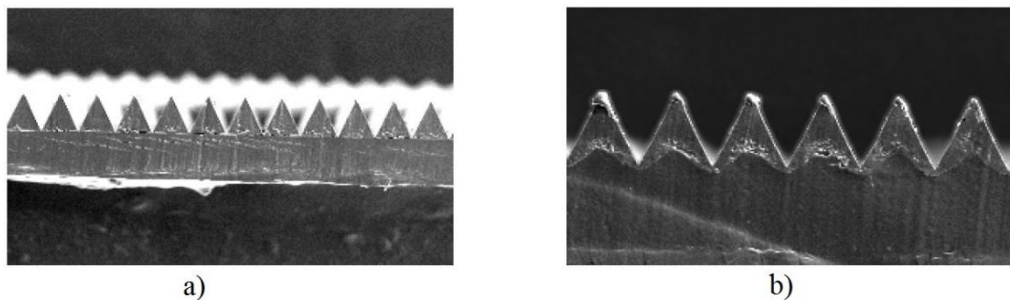


Kuva 31: Laminaarisen virtauksen irtoamisen visualisointi E387 siipiprofiilin pinnalla savuvirtauksen avulla Reynoldsin luvun ollessa 100 000. (Selig et al. 2003, 3.)

Selig et al. (2003, 4) toteaa, että matalilla Reynoldsin luvuilla toimivilla siipiprofiileilla on pääteltävissä selkeä optimi koko laminaarisen virtauksen irtoamisen vyöhykkeelle, jolloin siitä aiheutuva vastusvoiman lisäys saadaan minimoitua. Siirtymävyöhykkeen koko siis määrittelee paljolti siipiprofiilin suorituskyvyn. Laminaarisen virtauksen irtoamiskohta määrittelee laminaarisen virtauksen irtoamisen vyöhykkeen koon, joten kontrolloimalla laminaarisen virtauksen irtoamisen paikkaa siiven pinnalla, voidaan vaikuttaa siipiprofiilin suorituskykyyn. (Selig et al. 2003, 4) Laminaarisen virtauksen irtoaminen voidaan estää muuttamalla rajakerros turbulenttiseksi ennen laminaarisen virtauksen irtoamisen aluetta, ja siirtymän keinotekoisella laukaisulla onkin havaittu merkittävä positiivinen vaikutus siipiprofiilien suorituskykyyn alhaisen Reynoldsin luvun alueilla. (Claessens 2006, 50)

4.4.1 Alhaisella Reynoldsin luvun alueella toimivan siipiprofiilin suorituskyvyn parantaminen

Yleisimpiä tapoja laminaarisen virtauksen irtoamisen estämiseksi ovat siipiprofiilin siirtymäkohdankohdan kaarevuuden muokkaaminen siirtymärampiksi tai turbulaattorien käyttäminen (Gopalarathnam et al. 2003, 769). Kolmas keino siipiprofiilien vastusvoiman vähentämiseksi on siipiprofiilin pinnalle kiinnitettävien uurre-kalvojen käyttäminen (Sareen et al. 2011, 1). Kuvassa 32 on havainnollistettu kahta erikokoista elektronimikroskoopin avulla kuvattua uurre-kalvoa. Optimikokoisilla uurteilla on saatu aikaan 4–5 % ilmanvastuksen väheneminen, mutta huonosti suunnitellut uurteet taas nostavat joissain tapauksissa ilmanvastusta 10–12 %. Uurteiden optimikoko on siipiprofiilikohtainen, ja voi riippua myös täysin uurteiden geometriasta. On kuitenkin mahdollista suunnitella uurteet tietylle siipiprofiilille siten, että niiden käyttöönotto lisää profiilin suorituskykyä melko laajalla Reynoldsin luvun sekä kohtauskulman alueilla. Hyvin suunnitellun siipiprofiilin suorituskykyä on siis mahdollista parantaa huolella valittujen uurteiden geometrian ja koon ansiosta, mikäli sen toimintaolosuhteet ovat hyvin tiedossa. Uurteita on siis mahdollista käyttää tehostamaan siipiprofiilien suorituskykyä myös esimerkiksi tuuliturbiinien suunnittelun yhteydessä. (Sareen et al. 2011, 8–9)

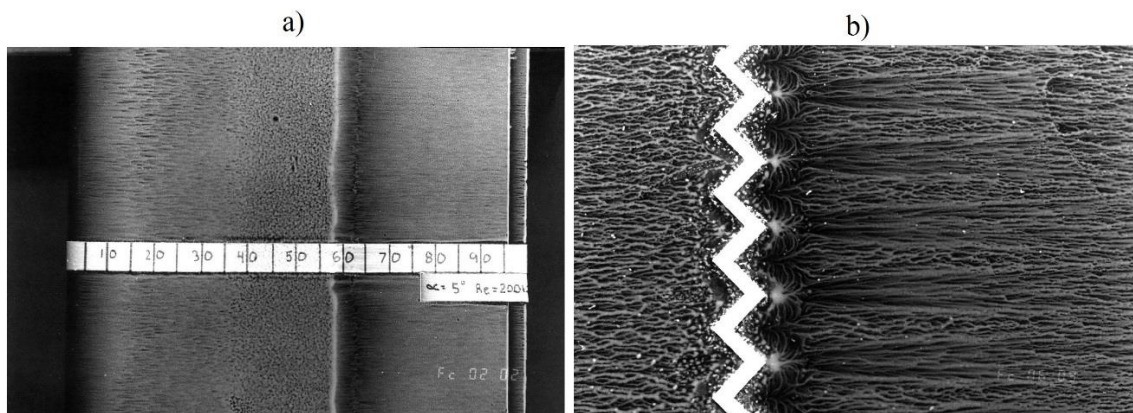


Kuva 32: Kaksi esimerkkiä erikokoisista uurre-kalvoista elektronimikroskoopin avulla kuvattuna, geometrioiden harjojen korkeus: a) $44 \mu\text{m}$ ja b) $62 \mu\text{m}$ (Sareen et al. 2011, 3).

Gopalarathnam et al. (2003, 774–775) tekemän kattavan tutkimuksen mukaan turbulaattorille optimoitu siipiprofiili saa aikaan pienemmän ilmanvastuksen korkean nostovoimakertoimen ja matalan Reynoldsin luvun tapauksissa, kun vertailukohtana on ilman turbulaattoria toimivaksi optimoitu siipiprofiili. Tutkimuksessa oli havaittavissa kuitenkin samassa vertailussa suorituskyvyn heikkeneminen alhaisen nostovoimakertoimen

ja korkean Reynoldsin luvun tapauksissa. Tutkimuksessa käytettyjen siipiprofiilien tapauksissa ei ollut mahdollista suunnitella turbulaattorilla varustettua siipiprofiilia, jolla olisi selvä etu suorituskyvyssä verrattuna siipiprofiiliin, joka on suunniteltu toimimaan hyvin ilman turbulaattoria. Lisäksi tutkimustulokset tukevat käsitystä siitä, että siipiprofiilille ei voida määrittää tiettyä kohtaa turbulaattorille, joka olisi optimi laajalla kohtauskulman alueella. Lähtökohtaisesti voidaan todeta, että turbulaattorista on etua tapauksissa, joissa dominoivana vastusvoimaa tuottavana tekijänä on laminaarisesta virtauksen irtoamisesta aiheutuva muotovastus. Nämä olosuhteet ovat yleisesti voimassa alle 100 000 Reynoldsin luvun alueella. Kyseisissä tapauksissa on mahdollista lieventää laminaarisen virtauksen irtoamisen haitallisia vaikutuksia suunnittelemalla siipiprofiilin käyttöolosuhteisiin sopiva turbulaattori.

Kuvassa 33 b) on havainnollistettu öljyvirtausvisualisoinnin avulla turbulaattorin vaikutusta siipiprofiilin pinnan rajakerrokseen. Kuvassa 33 a) on havainnollistettu laminaarisen virtauksen irtoaminen siiven pinnalta, ja kun merkitään etäisyyttä johtoreunasta x ja siiven jännettä c , niin virtaus voidaan jakaa seuraaviin alueisiin: laminaarinen virtaus $x/c = 37$ % asti, jonka jälkeen virtaus irtoaa siiven pinnalta ja pinnalla olevassa öljyssä ei näy häiriöitä $x/c = 57$ % asti. Välillä $x/c = 57$ % ja $x/c = 62$ % sijaitsee käänteisen virtauksen alue, joka kerryttää öljyä kohtaan $x/c = 57$ %. Kohdassa $x/c = 62$ % virtaus kiinnittyy takaisin siiven pintaan ja on muuntunut turbulenttiseksi. Kuvassa 33 b) on havainnollistettu mutkittelevan turbulaattorin vaikutusta siipiprofiilin rajakerrosvirtaukseen, kun turbulaattori on asetettu kohtaan $x/c = 30$ %. Turbulaattorin jälkeen virtaus muuntuu heti turbulenttiseksi eikä laajaa siirtymävyöhykettä pääse syntymään ja virtaus pysyy kiinnittyneenä siiven pintaan. (Lyon et al. 1997, 17 & 342.) Liitteen V taulukossa on esitetty erilaisia turbulaattorigeometrioita.



Kuva 33: Turbulaattorin vaikutuksen havainnollistaminen siipiprofiilin pinnan rajakerrosvirtaukseen öljyvirtausvisualisoinnin avulla Reynoldsin luvun ollessa 200 000 a) Siipiprofiilin E387 siiven yläpinnan virtauksen jakaantuminen eri alueisiin ilman turbulaattoria. b) Turbulaattorin vaikutus siipiprofiilin E374 rajakerrosvirtaukseen. Turbulaattorin sijainti $x/c = 30\%$. (Lyon et al. 1997, 17 & 342)

Siipiprofiilin siirtymärampilla tarkoitetaan epäsuotuisan painegradientin aluetta siiven pinnalla, jota hyödynnetään horjuttamaan laminaarista rajakerrosta ja käynnistämään sen siirtyminen turbulenttiseksi, jolloin voidaan välttää isokokoisien siirtymävyöhykkeen syntyminen. Siirtymärampia suunniteltaessa täytyy tehdä kompromissi nostovoimakertoimen vaihteluvälin, jolla vastusvoiman vähennys saavutetaan, suuruuden sekä vastusvoiman pienentämisen tehokkuuden välillä. (Gopalarathnam et al. 2003, 768)

4.5 Siipiprofiilin valinta pienikokoiselle Darrieus-roottorille

Oikea siipiprofiiligeometrian valinta vaikuttaa merkittävästi Darrieus-mallisen tuuliturbiinin aerodynaamiseen hyötysuhteeseen. Jotta tuuliturbiinin suorituskykyä olisi mahdollista arvioida luotettavasti, tarvitaan siipiprofiilin aerodynaamisista ominaisuuksista kattavat ja tarkat datat koskien siipiprofiilin nostovoima- (C_L), vastusvoima- (C_D), sekä momenttikertoimia (C_m). Nämä tiedot tarvitaan hyvin laajoilla kohtauskulman α ($-180 < \alpha < 180^\circ$) sekä Reynoldsin luvun (50 000 – 3 milj.) skaalalla kyseisen tuuliturbiinin koosta riippuen. Suurin osa kirjallisuudesta siipiprofiilien aikaansaamien voimien jakaantumisesta on saatavilla sovelluksille joihin tarvittavien siipiprofiilien oletetaan toimivan erittäin

harvoin sakkauksen jälkeisessä tilassa, jolloin saatavilla oleva data rajoittuu usein vain hieman kohtauskulman sakkausrajan. (Saeed et al. 2011, 358)

Pienikokoisen Darrieus-roottorin siivet toimivat matalan Reynoldsin luvun alueella alhaisilla tuulenopeuksilla. Aiemmin siipiprofiileihin liittyvää dataa on ekstrapoloitu suoraan suurempien Reynoldsin luvun arvon datasta. Nykyään on kuitenkin todettu että alhaiselle Reynoldsin luvun arvoilla ($50\,000 < Re < 500\,000$) siipiprofiilien suorituskyky kärsii laminaarisen virtauksen irtoamisen seurauksena, eli suoralla ekstrapoloinnilla ei saada määritettyä luotettavia arvoja.

Darrieus-roottorisovelluksissa on usein käytetty ohuita siipiprofiileita niiden liito-ominaisuuden takia. Liito-ominaisuudella tarkoitetaan hyvää nostovoiman ja vastusvoiman suhdetta. Yhtenä merkittävimpänä haittapuolena ohuiden siipiprofiilien käyttämisessä pystyakselisissa tuuliturbiineissa on niiden rakenteellisen jäykkyyden heikentyminen paksumpiin siipiprofiileihin verrattuna. Pystyakselisessa tuuliturbiinissa käytettävän siipiprofiilin optimoimiseen on kuitenkin esitetty 2D aerodynamiikkaan perustuvaa objektiivista funktiota, jossa suunnitteluperiaatteina on käytetty erityisesti sirkulaation voimakkuuden vaihtelun aiheuttamien jättöpyörteiden synnyttämän vanaveden voimakkuuden riippuvuutta sekä pintasuhteesta että aikaansaadusta nostovoimasta. Kyseistä menetelmää käyttämällä voidaan perustella että paksumpia siipiprofiileja käyttämällä on saavutettavissa korkea aerodynaaminen hyötysuhde, koska profiilin aikaansaama nostovoima on suhteellinen siipiprofiilin paksuuteen verrattuna. (Ragni et al. 2015, 1630)

Edellä käsitellyt aerodynaamiset haasteet tekevät pienikokoisen suorasiipisen Darrieus-roottorin perusteellisen analysoinnin erittäin haasteelliseksi, mutta niiden perusteella voidaan kuitenkin päätellä joitain haluttuja aerodynaamisia ominaisuuksia tarvittavalle siipiprofiilille. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi suurempi kohtauskulman sakkausrajan arvo alhaisen Reynoldsin luvun alueella, korkean C_L/C_D -suhteen ilmeneminen suuremmalla kohtauskulman arvojen välillä, alhainen vastusvoimakertoimen arvo kun nostovoimakertoimen arvo on nolla, suurempi nostovoimakertoimen maksimiarvo, viivästynyt syvän sakkauksen ominaisuus, alhainen herkkyys pinnankarheudelle, jättöreunan alhainen äänentuotto sekä suuri negatiivisen pituuskallistusmomentin arvo. Edellä listatut aerodynaamiset ominaisuudet on mahdollista saavuttaa seuraavien

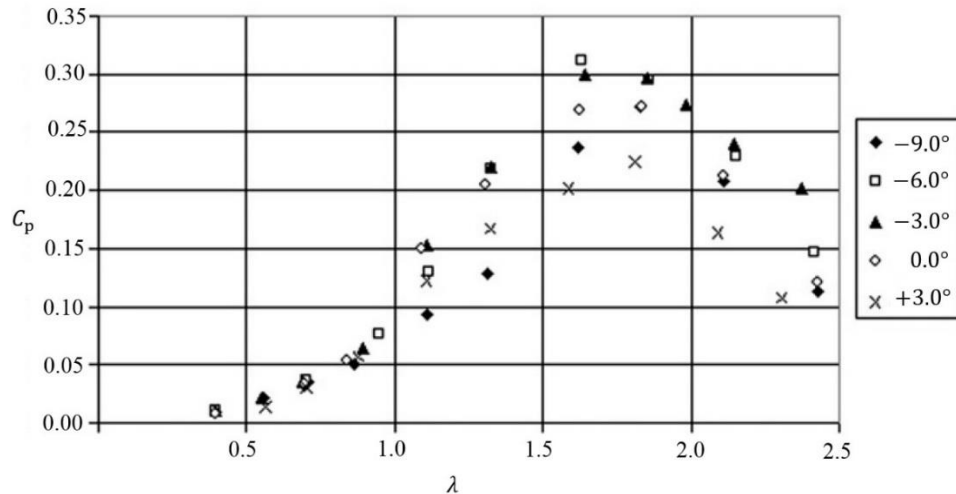
siipiprofiilin ominaisuuksien avulla: maltillinen keskilinjan kaareutuvuus (englanniksi camber), suurempi paksuus, suuri johtoreunan pyöristys sekä maltillinen jättöreunan paksuus. (Islam et al. 2009, 3-4.) Liitteen IV taulukossa 1 on listattuna joitain Islam et al. (2009, 6) tutkimia siipiprofiileja, ja saman liitteen kuvassa 1 on esitettyä kyseisten siipiprofiilien tangentiaalivoimakertoimen arvoja kohtauskulman funktiona eri Reynoldsin luvun arvoilla.

4.6 Siiven asetuskulman vaikutus

Siiven asetuskulmalla γ (englanniksi pitch angle) tarkoitetaan suorasiipiselle Darrieus-roottorille siiven johtoreunan kääntämistä joko poispäin roottorin keskipisteestä, tai roottorin keskipisteeseen päin. Siiven asetuskulman etumerkki on määritelty negatiiviseksi silloin, kun siipiprofiilin johtoreunaa käännetään poispäin roottorin keskipisteestä. Siipikulman optimiasento on roottorikohtainen ja riippuu huomattavasti esimerkiksi pintasuhteen arvosta.

Erittäin pienen pintasuhteen ($\sigma \approx 0,1$) roottoreilla negatiivisella siipikulmalla on havaittu suorituskyvyn alenemista, mutta esimerkiksi pintasuhteen $\sigma = 0,22$ roottorin suorituskyvyn on havaittu paranevan kun $\gamma = -2^\circ$. Erot ovat selitettävissä virtausnopeuden eriasteisella hidastumisella sen kulkiessa roottorin tuulen yläpuolisen ja -alapuolisen osan läpi. Siipikohtainen kohtauskulma ei riipu ainoastaan hetkellisestä pyörähdyskulmasta, vaan myös siiven hetkellisen kehänopeuden suhteesta sen kohtaamaan paikalliseen indusoituvaan virtausnopeuteen. Tuulen alapuolisella osalla virtausnopeus on jo hidastunut, sillä siitä on siirretty energiaa roottorin pyörimisliikkeeseen jo tuulen yläpuolisella osalla. Alhaisemmasta paikallisesta virtausnopeudesta aiheutuu siis pienemmät kohtauskulman arvot roottorin tuulen alapuoliselle osalle kuin roottorin tuulen yläpuoliselle osalle. Negatiivinen siipikulma pienentää siis roottorin tuulen yläpuolisella osalla mahdollisesti liian suurien kohtauskulman arvojen, ja nostaa mahdollisesti kohtauskulman liian alhaisia arvoja tuulen alapuolisella osalla. Neutraaleilla, positiivisilla sekä liiallisilla negatiivisen siiven asetuskulman arvolla seuraa tuulen alapuolisen ja yläpuolisen osan optimaalisten kohtauskulmien yhteensopimattomuus, jolloin saavutettava tehokertoimen huippu pienenee. (Armsrong et al. 2012, 17.) Kuvassa 34 on havainnollistettuna kiinteän siiven asetuskulman

vaikutus korkean pintasuhteen suorasiipiseen Darrieus-roottorin tehokertoimen arvoihin kärkinopeussuhteen funktiona.



Kuva 34: Roottorin siiven asetuskulman vaikutus suorasiipisen Darrieus-roottorin suorituskykyyn. Tuulennopeus 10 m/s, roottorin pintasuhte $\sigma = 0,41$. (Armsrong et al. 2012, 17)

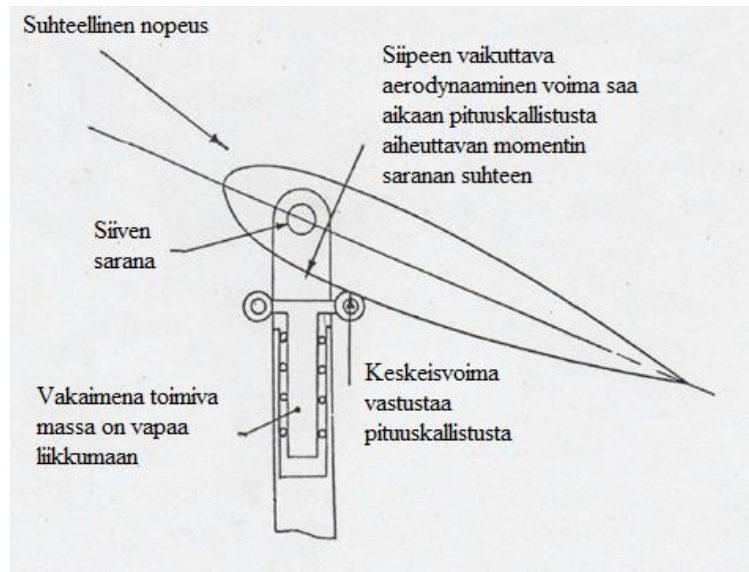
Pääasiallisina ongelmina suorasiipisille Darrieus-roottoreille, joiden siiville on määritetty kiinteä siiven asetuskulma, on alhainen vääntömomentti käynnistymisen aikana ja toimiessa alhaisilla tuulennopeuksilla, sekä taipumus liian suuriin pyörimisnopeuksiin kovalla tuulella. Isoissa sähköverkkoon kytketyissä systeemeissä, joissa käynnistäminen sekä maksimipyörimisnopeuden säätö on helposti toteutettavissa verkosta otettavan sähkötehon avulla, kyseiset ongelmat ovat helposti selvitettävissä. Pienissä itsenäisissä järjestelmissä kyseiset ongelmat ovat kuitenkin vakavampia haittapuolia. Kiinteällä siiven asetuskulmalla varustetut roottorit eivät siis ole itsestään käynnistyviä, vaikkakin niiden käynnistymisen aikaisten olosuhteiden vääntömomenttia voidaankin suurentaa esimerkiksi kasvattamalla pintasuhdetta tai käyttämällä paksumpia ja keskilinjan kaarevuudella varustettuja siipiprofiileita, mutta kyseiset toimenpiteet heikentävät kuitenkin roottorin suorituskykyä. Suorasiipisen Darrieus-roottorin suorituskyvyn parantamiseksi on esitetty vaihtelevan siiven asetuskulman arvon toteuttamista. (Kirke & Lazauskas 1991, 187 & 190)

4.6.1 Siiven asetuskulman säätö

Säädettävällä siiven asetuskulmalla on teoriassa erittäin positiivinen vaikutus roottorin suorituskykyyn, erityisesti käynnistymisen aikana sekä alhaisilla kärkinopeussuhteilla. Optimaalinen suorituskyky saataisiin aikaan säätämällä siiven asetuskulman avulla siipikohtaisen kohtauskulman arvo pysymään hieman sakkausrajan alapuolella koko siiven pyörähdysajan, jolloin sen nostovoimakertoimen arvo on maksimissa. Käytännössä tämä on kuitenkin erittäin hankala toteuttaa, etenkin vaihtelevissa tuuliolosuhteissa, sillä optimaalinen siiven asetuskulma on sekä pyörähdyskulman että kärkinopeussuhteen funktio, jolloin ei ole mahdollista saavuttaa sekä suurta vääntömomentin tuottoa käynnistyksessä että suurta tehohuippua minkään etukäteen määritellyn siipikulman jaksottaisen vaihtelun järjestelmän avulla. (Kirke & Lazauskas 1991, 190 & 192)

Paraschivoiu et al. (2009, 6) tekemässä tutkimuksessa onnistuttiin simuloidulla siiven asetuskulman säädöllä parantamaan suorasiipisen Darrieus-roottorin suorituskykyä sen suunnitellussa toimintapisteessä, mutta tämän pisteen ulkopuolella optimoitu asetuskulman säätö oli haitallinen roottorin suorituskyvylle. Erityisesti alhaisille tuulenopeuksille optimoidulla siiven asetuskulman säädöllä ennustetaan kuitenkin olevan mahdollisesti jopa 30 % kasvu tuuliturbiinin tuottamaan vuotuisen kokonaisenergian määrään.

Kirke & Lazauskas (1991, 197) ehdottavat siiven asetuskulman säädölle itse-säätyvää järjestelmää, jossa siipikulmaa ei säädetä minkään etukäteen määritellyn kaavan mukaisesti, vaan siiven asetuskulma säätyy siihen vaikuttavien aerodynaamisten sekä inertiaivoimien ansiosta. Kuvassa 35 on havainnollistettu kyseisen järjestelyn luonnostelmaa.



Kuva 35: Luonnostelma itse-säätyvästä siiven asetuskulman järjestelystä (Kirke & Lazauskas 1991, 193).

5 STAATTORIRAKENTEEN VAIKUTUS ROOTTORIN TOIMINTAAN

Diplomityöhön liittyvässä tuuliturbiinin suunnittelussa haluttiin suunnitella turbiinirakenteen ympärille kiinteä staattoriratkaisu, jonka tarkoituksena on ohjata virtausta roottorille suotuisalla tavalla, ja näin ollen parantaa roottorin suorituskykyä. Alun perin staattorirakenteen tarkoituksena oli myös virtauksen kiihdyttäminen sen suutinvaikutuksen ansioista, mutta jo suunnittelun alkuvaiheessa todettiin että maltillisilla suutinrakenteilla ei ole vapaassa virtauksessa virtausta kiihdyttävää vaikutusta, kuten esimerkiksi putkivirtauksissa, joissa virtaus käyttäytyy Bernoullin lain mukaisesti.

Edellisissä aiheeseen liittyvissä tutkimuksissa staattorirakenteen avulla on saatu parannettua roottorin pyörimisnopeutta vakiovirtausnopeudella. Osassa staattorirakennetta koskevissa tutkimuksissa on kuitenkin määritelty joitain yleisiä käsitteitä (esimerkiksi pintasuhde) yleisen käytännön vastaisesti. Nämä julkaisut on jätetty tässä työssä huomioimatta. Aiheesta tehtyjä tutkimuksia on melko vähän ja niistä on kerätty kooste taulukkoon 3. Tutkimuksissa on yleensä käytetty vertailukohtana samaa roottoria ilman staattorirakennetta, mikä korostaa staattorirakenteen positiivisia vaikutuksia roottorin suorituskykyyn. Mielekkäämpää olisi käyttää vertailukohtana roottoria jonka halkaisija vastaa kooltaan roottori-staattori - yhdistelmän kokonaishalkaisijaa. Staattorirakenteen vaikutusta on tutkittu sekä vastusvoimaroottoreiden että nostovoimaroottoreiden suorituskykyyn. Taulukossa 3 mainitussa Nobile et al. (2014) julkaisussa ei ole kommentoitu millään tavalla Betzin lakia rikkovaa tehokertoimen arvoa 0,8, ja kyseisen julkaisun tulokset perustuvat ainoastaan virtausmallinnuksiin.

Taulukko 3: Staattorirakenteen vaikutuksesta tehtyihin tutkimuksiin liittyviä julkaisuja.

Tekijät	Tutkimusmenetelmä	Roottorityyppi	Kokonaishalk. [m]	siipien lkm	Siipi-profiili	$C_{p,max}$
Shahizare et al. 2016	virtausmallinnus, tuulitunneli	H-Darrieus	1	5	FX 63-137	0.0075
Chong et al. 2013	virtausmallinnus, tuulitunneli	H-Darrieus	1	5	NACA 0015	[-]
Chong et al. 2012	virtausmallinnus, tuulitunneli	Sistan	1	3	suora levy	0.19

Tekijät	Tutkimusmenetelmä	Roottorityyppi	Kokonaishalk. [m]	siipien lkm	Siipi-profiili	$C_{p,max}$
Pope et al.	virtausmallinnus, tuulitunneli	Zephyr	0.762	5	muokattu Savonius	0.12
Chong et al. 2012	tuulitunneli	Savonius	1	2	Savonius	0.26
Nobile et al. 2014	virtausmallinnus	H-Darrieus	4.2	3	NACA 0018	0.80

5.1 Staattorin geometrian määrittäminen

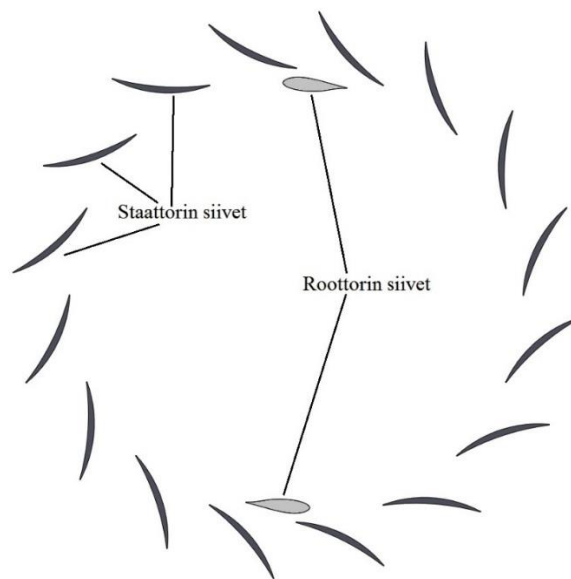
Roottorin ympärillä oleva staattorirakenne suurentaa tuuliturbiinin kokonaishalkaisijaa. Jos kokonaishalkaisija halutaan pitää vakiona, niin rakenteen sisällä olevan roottorin halkaisija pienenee, ja koon muutos riippuu staattorirakenteen sisä- ja ulkohalkaisijoiden suhteesta $\varepsilon = D_{s,i}/D_{s,o}$. Pienempi roottorin halkaisija tarkoittaa vakiopyörimisnopeudella toimivan roottorin aikaansaaman vääntömomentin sekä tehon alenemista. Suunnitellun tuuliturbiinin kokonaishalkaisija haluttiin pitää mahdollisimman pienenä, joten staattorin halkaisijoiden suhde on hyvä pitää varsin maltillisena. Staattorirakenne aiheuttaa roottorin kannalta virtaushäviön, sillä osa virtauksesta kiertää koko staattori-roottori – yhdistelmän. Virtaushäviö pienentää suoraan roottorille saapuvan ilmavirran ilmavirrasta hyödynnettävän kineettisen energian määrää. Staattorirakenteen aiheuttamia virtaushäviöitä ja niiden suuruutta on arvioitu virtausmallinnuksen avulla luvussa 7.

Suunnitteluprosessin alussa halutun staattorin geometrian suunnittelulle annettiin seuraavat ehdot ja tavoitteet:

1. Staattorirakenne ei heikennä pysty akselisten tuuliturbiinien ominaisuutta toimia samalla tavalla kaikilla tuulensuunnilla, eli minkäänlainen kääntymismekanismi ei ole tarpeellinen.
2. Staattorirakenteen avulla estetään virtauksen kulkeutuminen roottorin siivelle sillä osalla roottorin siiven pyörähdystä, jossa virtauksesta on haittaa pysty akselisen roottorin suorituskyvylle.
3. Virtaus ohjautuu nostovoimaroottorin siiville roottorin suorituskyvyn kannalta suotuisassa kulmassa, jolloin kohtauskulman vaihtelut tasaantuvat erityisesti alhaisilla kärkinopeussuhteen arvoilla.

Staattorin rakennetta käsitellään suunnittelun alussa 2D tapauksena ja staattorin korkeudeksi oletetaan sisäpuolelle asetettavan roottorin korkeus, eli staattorin rakenne muistuttaa onttoa sylinteriä roottorin ympärillä.

Rakenteen suunnittelun päätavoitteena on siis, että staattorin avulla estetään täysin virtauksen pääsy roottorin toiminnan kannalta epäsuotuisalle alueelle. Tämä suunnitteluperiaate on sama sekä vastusvoima- että nostovoimaroottorille. Toissijaisena tavoitteena on ohjata nostovoimaroottorin siipien suorituskyvyn kannalta suotuisalla tavalla. Nostovoima-periaatteella toimivalla laitteella staattorin siiven kulma sen jättöreunalla (eli staattorin sisäpuolella) vaikuttaa voimakkaasti roottorin siipikohtaisen kohtauskulman vaihteluun. Staattorin vaikutusta kohtauskulmaan on käsitelty tarkemmin luvussa 5.2. Esimerkki suunnitellun tuuliturbiinin rakenteen poikkileikkauksesta on esitetty kuvassa 36.

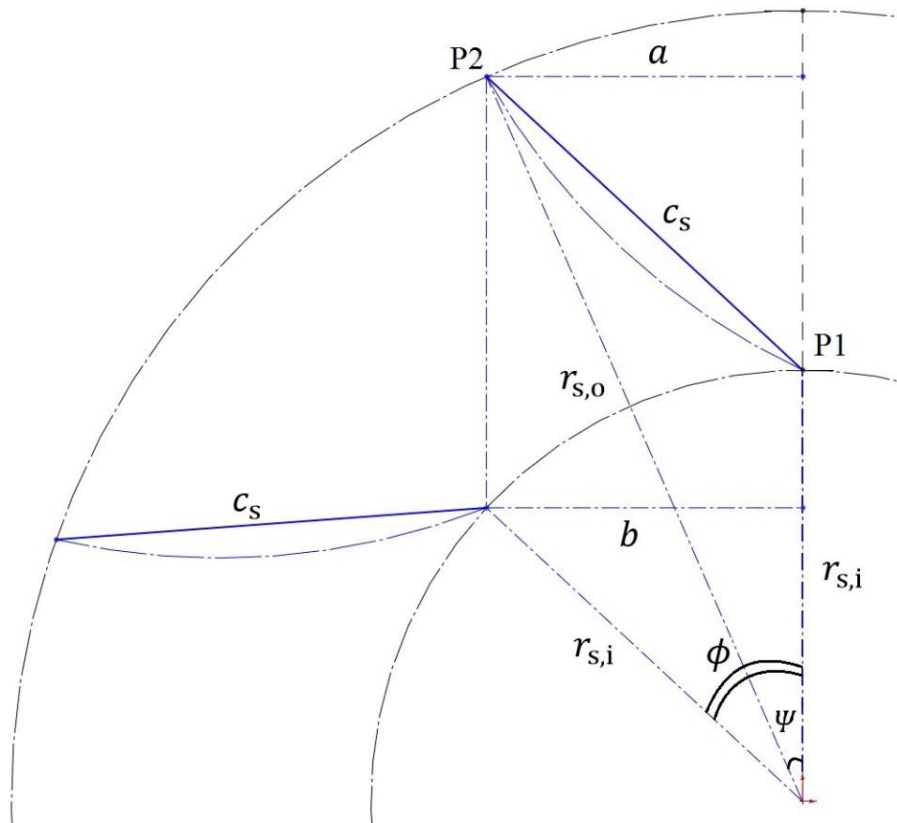


Kuva 36: Esimerkki suunnitellun nostovoima-tuuliturbiinin poikkileikkauksesta ylhäältä päin kuvattuna.

Jotta aiemmin mainittu staattorigeometrian suunnittelun ehto 1 täyttyy, staattorirakenteen täytyy olla täysin symmetrinen keskiakselinsa suhteen. Jotta ehto 2 täyttyy, kuvan 37 mukaisten mittojen a ja b täytyy olla yhtä suuret, jolloin toinen puoli roottorista peittyy virtauksen kannalta symmetrisessä staattorigeometriassa täysin. Staattorisiipien välinen kulma ϕ määräytyy siipien lukumäärän N_s mukaan. Mitan b arvo voidaan ratkaista kulman

ϕ ja staattorin sisäsäteen avulla ja mitta a voidaan ratkaista staattorisiipien asetuskulman Ψ ja staattorin ulkosäteen avulla.

$$\phi = \frac{360^\circ}{N_s} \quad (29)$$



Kuva 37: Staattorin yksittäisen siiven asetuskulman Ψ määrittämiseksi vaadittavat parametrit. ϕ on staattorin siipien välinen kulma, c_s on staattorisiiven jänne, $r_{s,i}$ on staattorin sisäsäde, $r_{s,o}$ on staattorin ulkosäde ja a sekä b ovat halutun geometrian määrittämiseen tarvittavat mitat.

$$\sin \phi = \frac{b}{r_{s,i}} \quad (30)$$

$$\sin \Psi = \frac{a}{r_{s,o}} \quad (31)$$

Yhdistämällä yhtälöt 29, 30 ja 31 ehdon $a = b$ mukaisesti, saadaan yhtälöt 32 ja 33.

$$\sin \Psi = \frac{r_{s,i}}{r_{s,o}} \sin \phi = \frac{D_{s,i}}{D_{s,o}} \sin \phi = \varepsilon \sin \phi \quad (32)$$

$$\sin \Psi = \varepsilon \sin \left(\frac{360^\circ}{N_s} \right) \quad (33)$$

Yksittäisen staattorin siiven asetuskulma Ψ riippuu siis yhtälön 33 mukaisesti ainoastaan sylinterimäisen staattorirakenteen sisä- ja ulkohalkaisijan suhteesta ε , sekä staattorin siipien lukumäärästä N_s , kun halutaan rakenteen täyttävän aiemmin mainitut suunnittelun ehdot 1 ja 2.

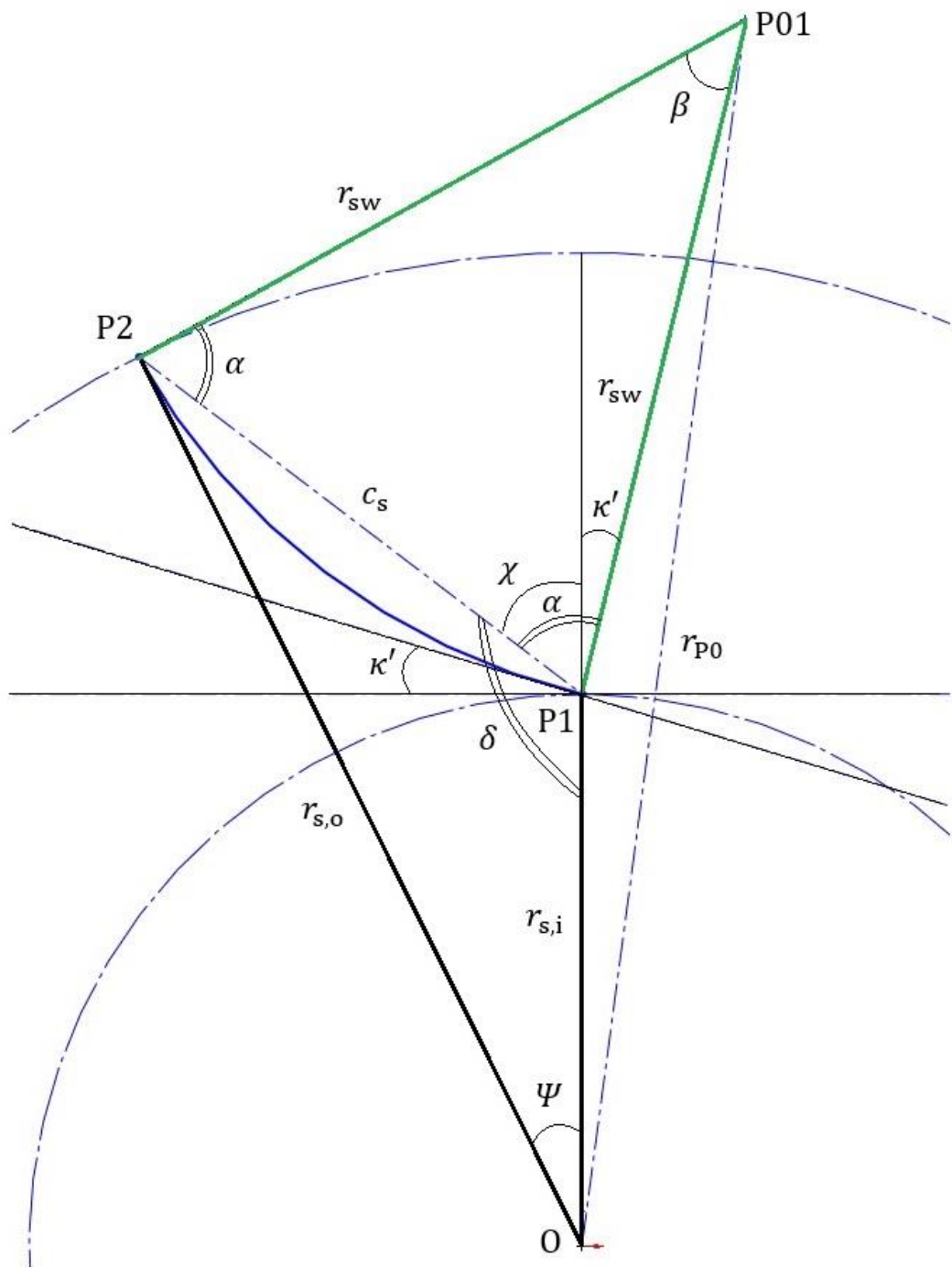
Staattorisiiven jänteen pituus c_s voidaan laskea kuvan 37 mukaisten pisteiden P1 ja P2 välisenä etäisyytenä yhtälön 34 mukaisesti, kun oletetaan että kuvassa roottorin keskipiste sijaitsee karteesisen koordinaatiston keskipisteessä, positiivinen x-suunta oikealle ja positiivinen y-suunta ylös. Koska haluttu staattoriratkaisu on symmetrinen sen keskipisteen suhteen, voidaan staattorisiiven jänteen pituus ratkaista minkä tahansa yksittäisen siiven koordinaattipisteiden avulla. Näin on ratkaistu kaikki tarvittavat parametrit staattorirakenteelle, joka täyttää ehdot 1 ja 2.

$$P1(x_1, y_1) = [0, r_{s,i}]$$

$$P2(x_2, y_2) = [-r_{s,o} \sin \Psi, r_{s,o} \cos \Psi]$$

$$c_s = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (34)$$

Kulmaan, jolla virtaus ohjautuu roottorin siiville, voidaan vaikuttaa muuttamalla staattorisiiven kaarevuussädettä r_{sw} . Merkitään kulmaa, jossa virtauksen halutaan ohjautuvan staattorin siiville κ' . Kun haluttu staattorinsiiven jättöreunan ohjauskulma on määritetty, voidaan tarvittava staattorisiiven kaarevuussäde ratkaista yhtälöiden 35–37 avulla kuvan 38 mukaisesti määritettyjen parametrien avulla.



Kuva 38: Staattorisiiven kaarevuussäteen määrittämiseen tarvittavat parametrit.

Ensin ratkaistaan kulma δ kolmiosta O , $P1$, $P2$ kosinilauseen avulla.

$$\cos \delta = \frac{c_s^2 + r_{s,i}^2 - r_{s,o}^2}{2c_s r_{s,i}} \quad (35)$$

Kulma χ on tällöin $180^\circ - \delta$ ja kulma $\alpha = \chi + \kappa'$. Kulma β saadaan kolmiosta P1, P2, P01 yhtälön 36 mukaisesti ja staattorin siiven kaarevuussäde r_{sw} saadaan laskettua samasta kolmiosta sinilauseen avulla.

$$\beta = 180^\circ - 2\alpha \quad (36)$$

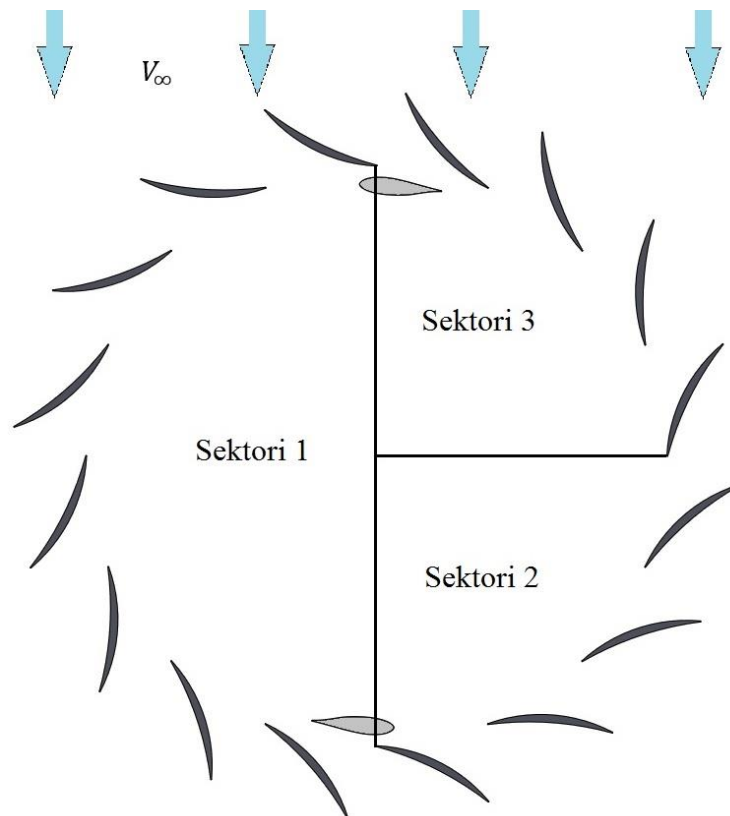
$$r_{sw} = c_s \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (37)$$

Suunnitteluprosessin edetessä havaittiin kuitenkin virtausmallinnuksen yhteydessä, että ainoastaan yksi staattorin siivistä toimi täysin halutulla tavalla ja ohjasi virtausta roottorille määritellyssä kulmassa κ' , muut staattorin siivet joko sakkasivat tai virtaus ohjautui siiven kuperalta puolelta. Virtausmallinnuksen tuloksia on käsitelty tarkemmin luvussa 7. Edellä kuvaillulla tavalla määritelty staattorirakenne toteuttaa kuitenkin aina ehdot 1 ja 2.

Siipien lukumäärää vähentämällä niiden kaarevuussäteen pituus kasvaa, eli mitä suurempi siipien lukumäärä N_s , sitä suurempia siivet ovat, jos staattorin sisä- ja ulkohalkaisijoiden suhde pidetään vakiona. Staattorirakenteesta päätettäessä ja suunnittelua tehtäessä huomattiin staattorirakenteen lähtökohtainen ongelma: mitä paremmin virtausta halutaan ohjata, sitä enemmän se toimii virtausesteenä roottorin edessä, joten vaikka virtaus ohjautuu roottorille sille suotuisassa kulmassa, staattorin aiheuttamista virtaushäviöistä aiheutuen roottorille asti pääsevän ilmavirran määrä pienenee, eli staattorirakenne aiheuttaa massavirtahäviön suhteessa roottoriin ilman staattorirakennetta. Lisäksi tiheä staattorirakenne aiheuttaa voimakkaasti tukkeutumista myös tuulen alapuolisella osalla, sillä symmetrisyydestä aiheutuen staattorin tuulen alapuolisen osan siivet ovat aina epäsuotuisassa kulmassa virtausta vasten. Tiheä staattorirakenne suojaa kuitenkin harvaa rakennetta paremmin roottoria ulkopuolisilta esineiltä sekä estää voimakkaasti roottorin siipien pyörimisestä aiheutuvaa välkehdintää.

5.2 Staattorirakenteen vaikutus kohtauskulmaan

Tuuliturbiinin poikkileikkauksen virtausalue voidaan jakaa kuvan 39 mukaisesti kolmeen sektoriin. Sektorissa 1 roottorin siiven kohtauskulman α määrittää siiven asetuskulma γ . Sektoreilla 2 ja 3 kohtauskulma määräytyy pyörimisnopeuden sekä siiven suhteellisen nopeuden w välisenä kulmana. Kohtauskulma sektorilla 2 on määritelty yhtälön 39 mukaisesti ja sektorilla 3 yhtälön 40 mukaisesti. Edellä mainittujen yhtälöiden yhdistelmälle muodostettiin kuudennen asteen polynomisovite, jonka voidaan arvioida kuvaavan kohtauskulman vaihtelua realistisemmin. Määritellyn kohtauskulman α polynomisovitteen käyrää on havainnollistettu kuvassa 40.



Kuva 39: Roottorin pyörähdyskulman jakaantuminen kolmeen sektoriin laskennallisen kohtauskulman määrittämiseksi staattorirakenteen vaikutuksesta.

$$\alpha_1 = \gamma \quad (38)$$

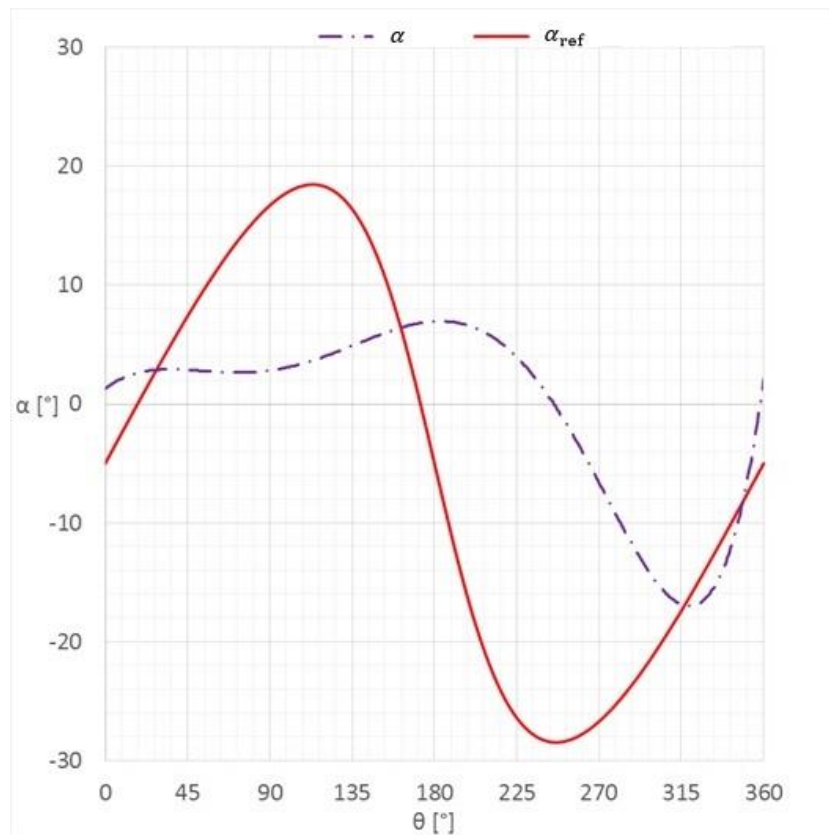
$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left[\frac{V_d \sin \theta}{V_d \cos \theta + u} \right] + \gamma \quad (39)$$

$$\alpha_3 = \tan^{-1} \left[\frac{V_s \sin \xi}{V_s \cos \xi + u} \right] + \gamma \quad (40)$$

missä	θ	siiven pyörähdyskulma [°]
	V_d	virtausnopeus tuulen alapuolisella osalla [m/s]
	V_s	virtausnopeus staattorilta roottorille [m/s]
	ξ	staattorilta saapuvan virtauksen ja kehänopeuden välinen kulma
	γ	siiven asetuskulma [°]

Darrieus-liikkeessä olevan siipiprofiilin kohtauskulmaa voidaan arvioida yhtälön sen kärkinopeussuhteen ja pyörähdyskulman avulla, mikäli virtauksen hidastumista roottorin sisällä ei oteta huomioon. Todellisessa tapauksessa tuulen alapuolisella pyörähdyksen osalla kohtauskulma olisi vähemmän jyrkkä hidastuneen virtausnopeuden johdosta. (Paraschivoiu 2002, 128)

$$\alpha_{\text{ref}} = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right] + \gamma \quad (41)$$



Kuva 40: Arvio staattorirakenteen vaikutuksesta siipikohtaiseen kohtauskulmaan kun $\lambda = 2.51$ ja $\gamma = -5^\circ$

Staattorin vaikutuksesta suorasiipisen Darrieus-roottorin siipikohtaiset kohtauskulman vaihtelut pienenevät erityisesti pienillä kärkinopeussuhteiden arvoilla. Pienemmällä kohtauskulman vaihtelulla pysytään paremmin staattisen sakkaurajan sakkaurajojen sisäpuolella, jolloin siipiprofiilin avulla tuotetaan nostovoimaa laajemmalla pyörähdyskulman θ alueella. Todellinen kohtauskulman arvo on staattorirakenteen takia erittäin hankala määrittää.

6 TESTATTAVA PROTOTYYPPI

Projektin alkuperäisenä tavoitteena oli suunnitella mahdollisimman pienikokoinen, mutta silti hyvällä hyötysuhteella toimiva tuuliturbiini, ja kokotavoitteeksi asetettiin kokonaishalkaisijaltaan 0,6 m oleva roottori. Diplomityön alkuvaiheessa valittiin tutkittavaksi roottorityypiksi suorasiipinen Darrieus-roottori. Valintaperusteena oli kirjallisuusselvityksen pohjalta tehty päätelmä tämän tyyppisen roottorin korkeammasta

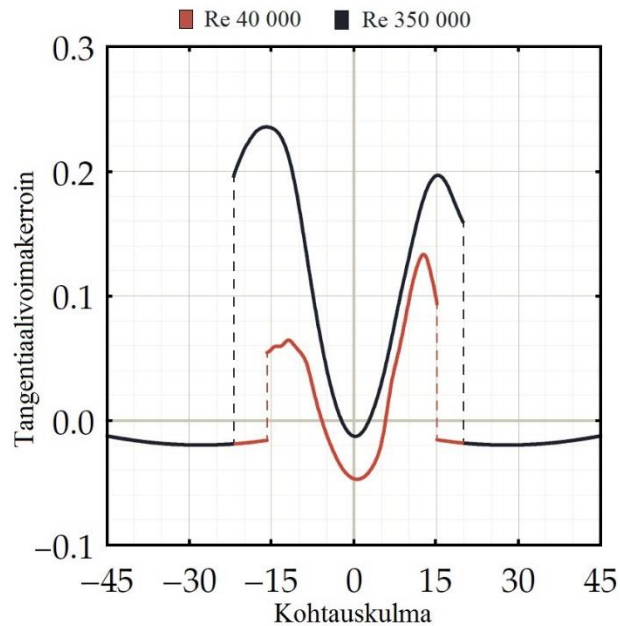
potentiaalisesta tehokertoimesta muihin pystyakselisiin tuuliturbiineihin verrattuna. Kokotavoitteesta oli kuitenkin luovuttava, sillä pienikokoinen pystyakselinen nostovoimaan perustuva roottori ei toimi alhaisilla tuulennopeuksilla, joten kokoa päätettiin kasvattaa 1,5 metriin. Roottorin pintasuhteella on voimakas vaikutus roottorin suorituskykyyn, joten sitä ympäröivä staattorirakenne parempi suunnitella siten, että sisällä olevan roottorin halkaisija on mahdollisimman suuri. Tämä toteutuu kun staattorirakenteen sisä- ja ulkohalkaisijan suhde asetetaan mahdollisimman lähelle arvoa 1, mutta tämä tarkoittaa kuitenkin melko suurta staattorin siipien lukumäärää, jotta virtausta saadaan ohjattua suotuisassa kulmassa roottorin siiville.

Roottorin potentiaalinen suorituskyky haluttiin pitää mahdollisimman korkealla, mikä käytännössä tarkoittaa alhaista pintasuhteen arvoa, mikä rajoittaa siipien lukumäärää sekä jänteen kokoa. Pintasuhteen sekä siipien jänteen pituuden kanssa jouduttiin kuitenkin näin pienellä roottorilla tekemään kompromissiratkaisu, sillä liian pienellä siiven jännteellä siipikohtaiset Reynoldsin luvut jäävät hyvin alhaisiksi jo kohtalaisilla tuulennopeuksilla, eli roottori ei käytännössä toimisi muuten kuin kovilla tuulennopeuksilla. Taulukkoon 4 on kerätty suunnitellun tuuliturbiinin parametrit. Virtausmallinnusta sekä tuulitunnelitestauksia varten tuuliturbiinikokonaisuus skaalattiin suhteella 0,5 pienempikokoiseksi, jotta rakennettavaa prototyyppiä on helpompi käsitellä sekä kuljettaa ja se mahtuu paremmin tuulitunneliin.

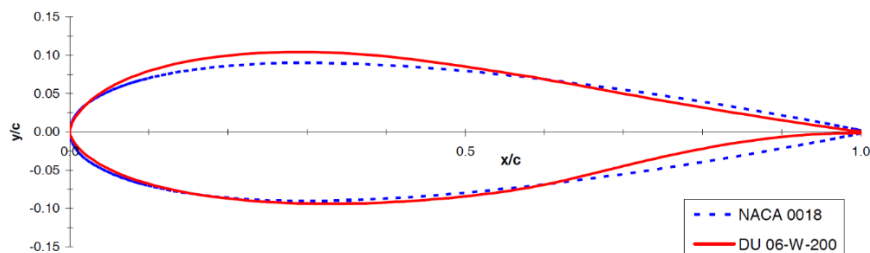
Taulukko 4: Suunnitellun tuuliturbiinikokonaisuuden valitut parametrit.

Staattori		Roottori	
Sisähalkaisija $D_{s,i}$ [m]	1.2	Halkaisija D_r [m]	1.1575
Ulkohalkaisija $D_{s,o}$ [m]	1.5	Siipiprofiili	DU W 200
Suhde ε [-]	0.8	Siiven jänteen pituus c [m]	0.17
Korkeus H [m]	0.6	Siipien lukumäärä N [kpl]	2
Siipien lukumäärä N_s [kpl]	16	Pintasuhde σ [-]	0.305
		Arvioitu λ_{opt} [-]	2.5
		Siiven asetuskulma γ [°]	-5

Roottorin siipiprofiiliksi valittiin kirjallisuusselvityksen perusteella DU W 200, joka on Delftin yliopistossa suunniteltu pysty akselisissa tuuliturbiineissa käytettäväksi tarkoitettu siipiprofiili, joka toteuttaa hyvin luvussa 4.5 esiteltyjä valintaperusteita. Valintapäätöstä tuki lisäksi saatavilla olevat kattavat kokeelliset ja laskennalliset datat myös matalan Reynoldsin luvun alueelta. Kuvassa 41 on havainnollistettu siipiprofiilin tuottama tangentiaalivoima kohtauskulman funktiona eri Reynoldsin luvuilla, ja kuvassa 42 on havainnollistettu siipiprofiilin muotoa, vertailukohtana on pysty akselisissa tuuliturbiineissa yleisesti käytetty NACA 0018 siipiprofiili. Siiven asetuskulmaksi valittiin kirjallisuus selvityksen, sekä arvioitujen staattorivaikutusten perusteella arvoksi $\gamma = -5^\circ$.

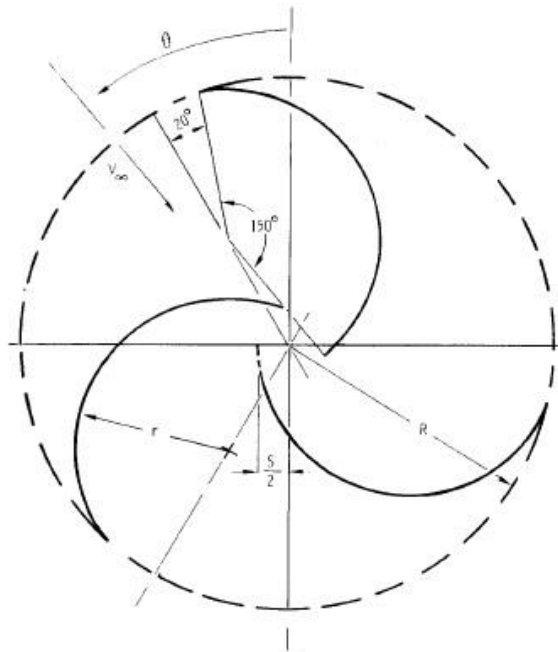


Kuva 41: DU W 200 siipiprofiilin ennustettu tangentiaalivoimakertoin kohtauskulman funktiona eri Reynoldsin luvun arvoilla. (Bos 2012, 3)

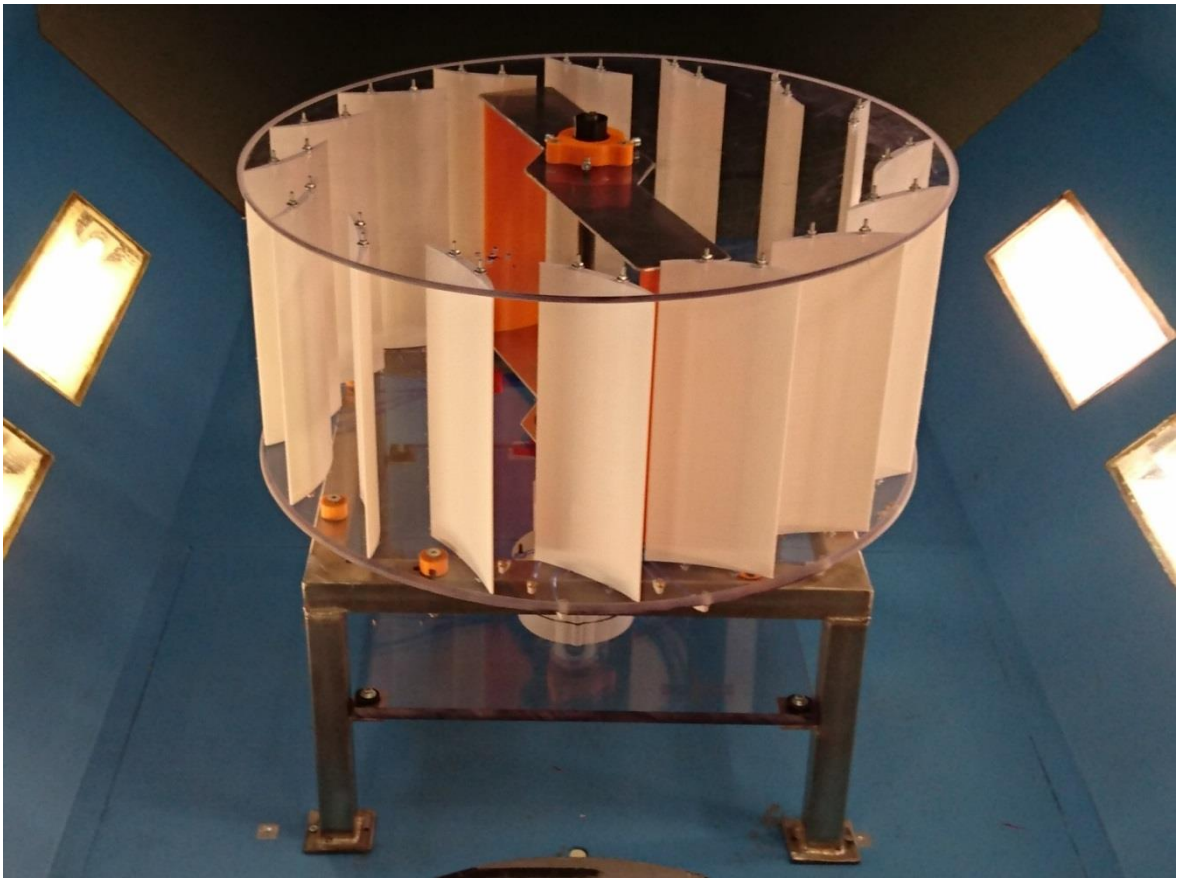


Kuva 42: Valittu siipiprofiili DU 06-W-200. Vertailukohtana symmetrinen NACA 0018 siipiprofiili, jota on käytetty usein pienikokoisissa pysty akselisissa tuuliturbiineissa. (Claessens 2006, 65).

Projektin yhteydessä valmistettiin sekä vastusvoima- että nostovoima-prototyypit, joista vastusvoimaroottori saatiin toimimaan, mutta nostovoimaroottoria ei. Molempien prototyyppien yhteydessä käytettiin samaa symmetristä staattorirakennetta. Staattorirakenteen avulla ei saatu parannettua roottorin suorituskykyä. Kuvassa 43 on esiteltyä periaatekuva, jonka pohjalta testattu kolmisiipinen Savonius-roottori valmistettiin. Kuvassa 44 on esiteltyä valmis prototyyppi, jossa nostovoimaroottori on integroituna suunnitellun staattorirakenteen sisälle.



Kuva 43: Periaatekuva kolmisiipisestä Savonius-roottori konfiguraatiosta, jonka pohjalta vastusvoimaroottorin prototyyppi valmistettiin. (Blackwell et al. 1977, 21)



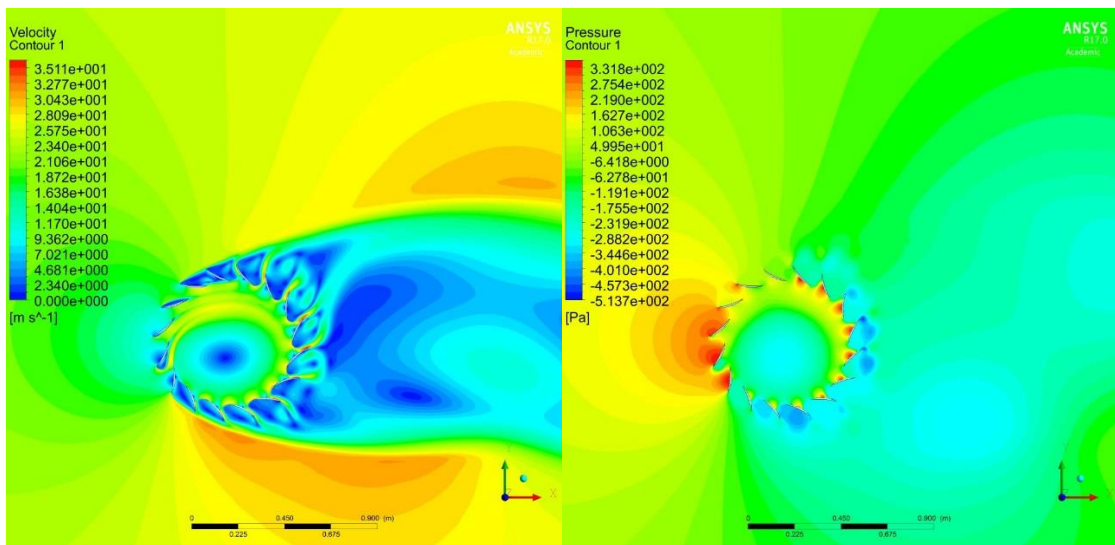
Kuva 44: Projektin yhteydessä valmistettu prototyyppi, nostovoimaroottori integroituna staattorirakenteen sisälle, koko on skaalattu taulukossa 4 listatuista mitoista skaalauskerroimella 0,5. Samaa staattorirakennetta sovellettiin myös kolmisiipiselle Savonius-roottorille. Prototyyppien valmistuksesta vastasi Pasatel Oy.

7 STAATTORIRAKENTEEN VIRTAUSMALLINNUS

Suunnitellusta tuuliturbiinirakenteesta oli osana suunnitteluprojektia tarkoitus tehdä kattavat virtausmallinnukset, mutta kaikkia virtausmallinnuksen tuloksia ei ehditty saamaan valmiiksi diplomityön kirjallisen osan valmistelun aikana. Pelkästä staattorirakenteesta tehdyt virtausmallinnukset ja sen tulokset saatiin kuitenkin sisällytettyä diplomityöhön, ja niiden perusteella voidaan arvioida staattorirakenteen aiheuttamia virtaushäviöitä.

Mallinnus suoritettiin vapaan virtauksen nopeudella 24 m/s, sillä rakennettava testilaitte on skaalattu versio suunnitellusta versioista, ja sen kaikki mitat ovat 0,5 kertaiset suunniteltuun verrattuna. Skaalaus tehtiin jotta testilaitetta on helpompi kuljettaa ja se mahtuu paremmin tuulitunneliin. Suunnitellun tuuliturbiinin design-pisteen tuulennopeudeksi oli määritelty tuulennopeus 12 m/s, eli tuulitunnelissa ja virtausmallinnuksessa tätä vastaa virtausnopeus 24 m/s, jolloin siipikohtaiset Reynoldsin luvut ovat täysin vastaavat.

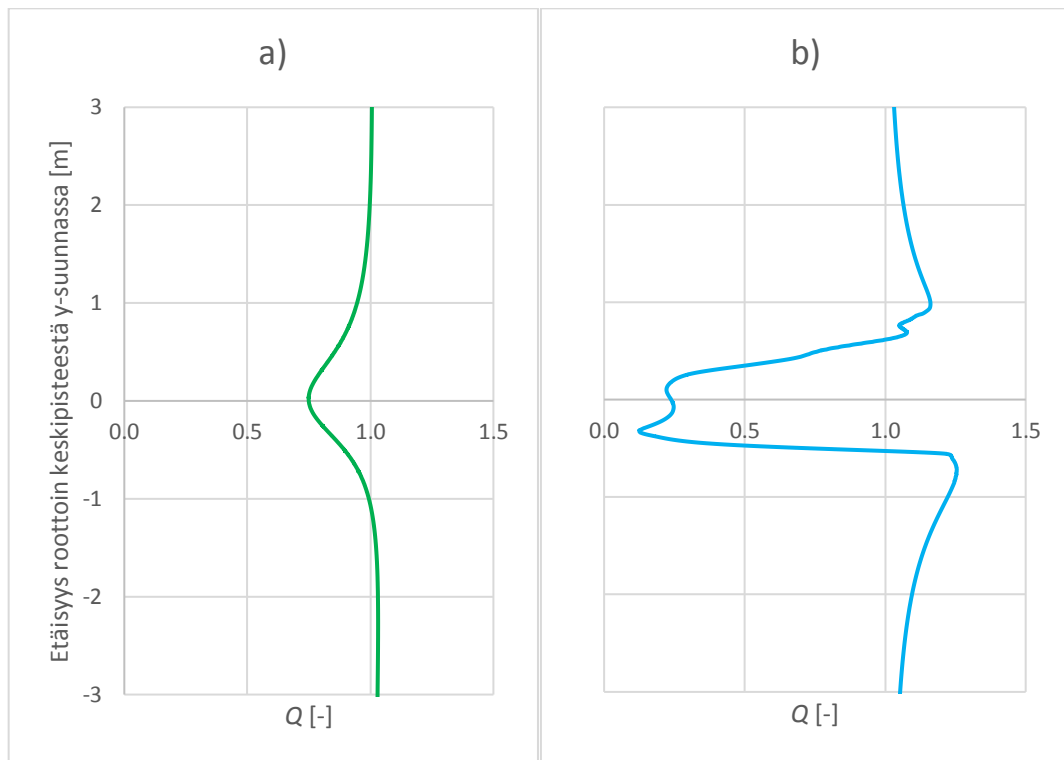
Kuvassa 43 on esiteltyä virtausmallinnuksen tuloksena sekä painejakauma että virtausnopeusjakauma staattorin vaikutuksesta. Virtausmallinnuksen voidaan olettaa ennustavan luotettavasti virtauksen pääpiirteitä, ja tietyt virtaustekniset ilmiöt voidaan todeta todellisiksi. Esimerkiksi virtauksen kohdatessa staattorirakenteen toisen kerran tuulen alapuolisella osalla, jokaisen staattorisiiven pinnalle muodostuva stagnaatiopiste on todellinen ilmiö. Virtauksen kohdatessa virtausesteen, sen pinnalle aiheutuu aina kohta, jossa virtausnopeus on nolla ja staattisen paineen arvo on suurimmillaan. Vaikka stagnaatiopisteen virtausta hidastava vaikutus onkin pienempi ulostulossa kuin sisääntulossa, stagnaatiopisteiden virtausta hidastava vaikutus ulottuu selkeästi suunnitellulle roottorin pyörimisliikkeen kehälle tuulen alapuolisella osalla. Stagnaatiopisteiden korkeapaineen alueet voivat siis mahdollisesti nostaa siipiprofiilin imupuolen painetta kuvan 43 mukaisesti sen pyörähdyskulman arvoilla 245–360°, jolloin siipiprofiilin paine- ja imupuolen paine-ero pienenee ja siipiprofiilin suorituskyky heikkenee tällä alueella. Stagnaatiopisteiden vaikutusta on mahdollista välttää pienentämällä roottorin halkaisijaa, mutta tällä on muita negatiivisia vaikutuksia tuuliturbiinin suorituskykyyn, esimerkiksi roottorin pintasuhteen σ kasvu.



Kuva 45: LUT:n virtaustekniikan osaston suorittaman virtausmallinnuksen tuloksia. Virtauksen nopeusjakauma sekä painejakauma staattorirakenteen vaikutuksesta. (LUT 2016)

Kuvassa 44 on havainnollistettuna virtausmallinnuksen perusteella laskettu massavirtajakauma staattorin vaikutuksesta. Kuvan 44 a) perusteella voidaan todeta, että osa virtauksesta kiertää koko staattorirakenteen. Jo $0,5 D_{s,o}$ etäisyyden tuulen yläpuolisella osalla pelkkä staattorirakenne aiheuttaa noin 20 % massavirtahäviön leveydeltään staattorin halkaisijan kokoiselle alueelle, kun vertailukohtana on vapaan virtauksen massavirta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että staattorin vaikutuksesta roottorille pääsevä ilmamassan määrä pienenee, ja näin ollen myös ilmavirtauksen sisältämä maksimiteho pienenee, kun vertailukohtana on virtaus ilman staattorirakennetta massavirta m_{ref} ja ilmavirtauksen sisältämä teho lasketaan yhtälön 2 mukaisesti.

Kuvasta 44 b) huomataan että heti staattorirakenteen takana massavirta pienenee radikaalisti, ja kasvaa staattorin peittämän $0,75$ m levyisen alueen ulkopuolella. Tästä ei kuitenkaan voida suoraan päätellä miten staattorirakenne toimii virtausesteenä, sillä kuvan 43 virtausmallinnuksen nopeusjakaumasta huomataan, että virtaus purkautuu staattorin sisältä hyvin laajalta alueelta staattorin ulkokehällä, mikä korostaa massavirran kasaantumista alueille staattorin ulkokehän läheisyydessä.



Kuva 46: Staattorirakenteen vaikutus massavirtajakaumaan y-suunnassa $0,5D_{s,o}$ etäisyydellä staattorirakenteesta a) ylävirtaan b) alavirtaan. Massavirtojen suhdeluku $Q = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ref}}$, missä \dot{m} = virtauksen massavirta staattorin vaikutuksesta ja \dot{m}_{ref} = massavirta täysin vapaassa virtauksessa. Eli kun $Q = 1$, massavirta on vastaava kuin vapaassa virtauksessa ilman minkäänlaista virtausestettä.

Edellä oleva vertailu on pätevämpi, kun vertailukohtana on pyörimissäteeltään vastaavan kokoinen vaaka-akselinen tuuliturbiini. Pystyakselisilla tuuliturbiineilla puolet ilmavirrasta on kuitenkin toiminnan kannalta epäsuotuisaa, ja staattorirakenteella on pyritty tämä epäsuotuisa vaikutus poistamaan. Pystyakselisien tuuliturbiinien keskinäisessä vertailussa onki parempi tarkastella staattorin vaikutusta massavirtaan ainoastaan roottorin kannalta suotuisalla alueella, koska epäsuotuisalle puolelle aiheutetusta massavirtahäviöstä on etua haitan sijaan. Pelkkää suotuisaa puolta tarkasteltaessa massavirtahäviö on kuitenkin myös noin 20 %. Kuvan 43 virtausmallinnuksen avulla voidaan kuitenkin päätellä staattorirakenteen ohjaavan virtausta kriittisimmällä osalla roottorin pyörähdyskehää loivemmassa kulmassa siipiprofiilin johtoreunalle, mikä pienentää siipikohtaisen kohtauskulman vaihteluväliä. Tämän voidaan olettaa vähentävän dynaamista sakkausta ja

parantaa roottorin suorituskykyä ainakin matalilla tuulenopeuksilla sekä alhaisilla kärkinopeussuhteen arvoilla. Staattorin siipien aiheuttamat vanavedet aiheuttavat kuitenkin isoja muutoksia siipiprofiilin kohtaamaan virtausnopeuteen, mikä voi mahdollisesti lisätä dynaamisen sakkauksen määrää.

Vastusvoimaperiaatetta hyödyntävien roottorien tapauksissa siipien kokoa on hyvä pienentää staattorillisessa ratkaisussa kuvan 43 virtausmallinnuksen nopeusjakauman mukaisen roottorin keskipisteen alueella ilmenevän nollavirtauksen alueen takia siiven keskipisteen puoliselältä osalta. Nollavirtausalueen ulkopuolelle ulottuvan siiven koon pienentäminen johtaa kuitenkin alhaisempaan roottorin tehokertoimen maksimiin, koska osa virtauksesta pääsee tällöin kulkemaan liian pienen siiven ohi, eikä koko virtauksen massavirtaa hyödynnetä vääntömomentin tuottamiseen. Vastusvoimaroottorin siipien lukumäärän lisääminen parantaa sen kykyä käynnistyä alhaisilla tuulenopeuksilla, mutta heikentää roottorin suorituskykyä, eli maksimitehokerrointa. Paras tehokerroin saavutetaan kaksisiipisellä roottorilla, mutta kolmisiipisellä roottorilla saadaan aikaiseksi tasaisempi vääntömomentin tuotto sekä parempi toiminta käynnistymisen olosuhteissa.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Pienikoisen pysty akselisen tuuliturbiinin toimintaperiaatteelle on kaksi vaihtoehtoa, nostovoimaan perustuva sekä vastusvoimaan perustuva tuuliturbiini. Nostovoimaan perustuvilla tuuliturbiineilla on lähtökohtaisesti korkeampi tehokerroin, mutta pienikokoiseksi skaalattuna ilmenee sen suorituskykyä alentavia aerodynaamisia ilmiöitä, joiden syynä ovat esimerkiksi roottorin pintasuhteen kasvu sekä siipiprofilien toiminta alhaisen Reynoldsin luvun alueella. Alhaisen Reynoldsin luvun alueella toimimisesta aiheutuvan laminaarisen virtauksen irtoamisen aiheuttamien vastusvoimahäviöiden vähentämiseksi on mahdollista muokata siipiprofilia esimerkiksi lisäämällä siiven pinnalle sen toimintaolosuhteisiin suunniteltu uurre-kalvo tai turbulaattori. Pintasuhteen arvon kasvu tarkoittaa roottorin tehokertoimen huipun ilmenemistä alhaisemmilla kärkinopeussuhteen arvoilla, jolloin myös tehokertoimen huipun arvot pienenevät siipien välisen interferenssin sekä siipikohtaisen kohtauskulman suuren vaihteluvälin aiheuttaman dynaamisen sakkauksen vaikutuksesta. Kohtauskulman isoa vaihteluväliä on mahdollista pienentää säädettävällä siiven asetuskulmalla. Jos säädettävällä siiven asetuskulmalla saadaan pidettyä sen kohtauskulma juuri sakkaurajan alapuolella koko sen pyörähdysten ajan, roottorin suorituskyky paranisi huomattavasti. Käytännössä tämä on kuitenkin erittäin haastavaa toteuttaa ja monimutkaistaisi tuuliturbiinin rakennetta huomattavasti. Pienikokoisissa pysty akselisisissa tuuliturbiinisovelluksissa roottorin tukirakenteiden aiheuttamat vastusvoimahäviöt kasvavat suhteessa siipien tuottamaan nostovoimaan nähden isokokoisiin tuuliturbiinisovelluksiin verrattuna, etenkin alhaisen siipien sivusuhteen sovelluksissa. Pienikokoisissa tuuliturbiinisovelluksissa nostovoimaan perustuvan roottorin saavutettavissa olevan tehokertoimen arvo laskee siis tasolle joka on saavutettavissa myös vastusvoimaperiaatteella toimivilla tuuliturbiineilla. Hyvin pienikokoisissa tuuliturbiinisovelluksissa (halkaisija alle 1 m) vastusvoimaperiaatteella toimiva roottori onkin yksinkertaisuutensa sekä itsestään käynnistyvyytensä ansioista nostovoimaroottoria parempi vaihtoehto. Nostovoimaroottoreissa on kuitenkin potentiaalia myös pienikokoisissa sovelluksissa, etenkin mikäli siiven asetuskulman säätö saadaan toteutettua.

Pysty akselisille tuuliturbiineille on ominaista että ilmavirtauksesta aiheutuu osalle roottorin siiven pyörähdystä ainoastaan haittaa sen suorituskyvyn kannalta. Pysty akselisen

tuuliturbiinin ympärille suunnitellulla staattorirakenteella on mahdollista estää virtauksen pääsy sille osalle pysty akselisen roottorin pyörähdystä, jossa virtauksesta on haittaa sen suorituskyvyille, ilman että sen kyky toimia samalla tavalla kaikilla mahdollisilla tuulensuunnilla kärsii. Staattorirakenteesta aiheutuu kuitenkin voimakkaat virtaushäviöt, arviolta noin 20 %, mikä laskee tuuliturbiinin kokonaishyötysuhdetta samassa suhteessa. Staattorirakenteen aiheuttamia virtaushäviöitä on hankala pienentää, mikäli sen koko halutaan pitää maltillisena ja edellä mainituista ominaisuuksista halutaan pitää kiinni. Tiheä staattorirakenne suojaa kuitenkin paremmin roottoria ulkopuolisilta esineiltä sekä estää voimakkaasti roottorin pyörimisestä aiheutuvaa välkehdintää. Samaa staattorirakennetta voi soveltaa sekä nostovoima että vastusvoimarootoreille. Rakenteeltaan suutinta muistuttavalla staattorilla ei ole virtausta kiihdyttävää vaikutusta. Staattorirakenteen voidaan kuitenkin olettaa parantavan nostovoimaroottorin käynnistymistä alhaisemmillä tuulennopeuksilla sen virtausta ohjaavien ominaisuuksien ansioista.

Työhön oli tarkoituksena sisällyttää laskennat matemaattisen mallin perusteella tutkitusta tuuliturbiinikokonaisuudesta sen suorituskyvyn osalta. Olemassa olevat laskentamallit soveltuvat kuitenkin paremmin käytettäväksi isokokoisempien tuuliturbiinien yhteydessä, jolloin vältetään pienikokoisten sovelluksien yhteydessä ilmenevien aerodynaamisten ongelmien ilmeneminen ja niiden mallintaminen. Pysty akselisten nostovoimarootoreiden matemaattisen mallintamiseen käytetään yleisesti kaksinkertaista moniviivateoriaa (englanniksi Double-Multiple Streamtube Theory, eli DMST), mutta staattorirakenteen vaikutuksesta tuuliturbiinikokonaisuuden läheisyydessä ilmenevät virtaviivat ovat hyvin monimutkaiset, eikä teoria sovellu sen tarkkaan mallintamiseen. Laskentateorioiden kehittämiseen työn sovelluksen mallintamisen mahdollistamiseksi ei työn aikataulun puitteissa ollut realistista mahdollisuutta.

Pienikokoisten, etenkin vastusvoima periaatteella toimivien, pysty akselisten tuuliturbiinien suunnittelussa hyödynnetään nykypäivänä yleisesti virtausmallinnusta. Diplomityö on yksi osa LUT:n virtaustekniikan osaston tekemää tutkimustyö projektia, jonka yhteydessä tehdyt virtausmallinnukset olivat oleellisena osana myös työssä suunnitellun staattorirakenteen vaikutuksien arvioinnissa. Projektiin liittyvän virtausmallinnuksen tulosten osalta diplomityöhön ehti kuitenkin vain pelkän staattorirakenteen virtausmallinnus ilman roottoria.

Vastusvoimaperiaatteella toimivien pysty akselisten tuuliturbiinien eri geometrioiden vaikutusta sen suorituskykyyn on tutkittu melko laajalti. Staattorirakenteen sisäpuolelle integroidun roottorin toiminta poikkeaa jonkin verran paljaan roottorin toiminnasta, mutta joitakin tutkimuksissa ilmenneitä tuloksia voidaan soveltaa myös staattorirakennetta hyödyntävään vastusvoimaroottoriin. Vastusvoimaroottorin siipien lukumäärän lisääminen mahdollistaa sen käynnistymisen alhaisemmilla tuulennopeuksilla, mutta heikentää sen potentiaalista maksimitehokerrointa. Paras tehokertoimen arvo saadaan kaksisiipisellä roottorilla, mutta kompromissiratkaisuna toimii hyvän käynnistymisen sekä hyvän tehokertoimen välillä kolmisiipinen roottoriratkaisu. Siipien kokoa on hyvä pienentää staattorillisessa ratkaisussa roottorin keskipisteen alueella ilmenevän nollavirtauksen alueen takia siiven keskipisteen puolelta. Nollavirtausalueen ulkopuolelle ulottuva siiven koon pienentäminen johtaa alhaisempaan roottorin suorituskykyyn, sillä osa virtauksesta pääsee tällöin kulkemaan liian pienen siiven ohi eikä koko virtauksen kineettinen energia siirry siiven välityksellä tuuliturbiinin akselin vääntömomentiksi. Vastusvoimaroottorin siipien pienentämisen ja määrän lisäämisen yhteisvaikutuksen tuloksena olisi erittäin alhaisilla (<2 m/s) tuulennopeuksilla käynnistyvä tuuliturbiini, mutta samalla sen suorituskyky heikkenisi voimakkaasti. Roottorin käynnistymisellä erittäin alhaisilla tuulennopeuksilla ei ole juurikaan hyötyä, sillä alhaisilla tuulennopeuksilla virtauksesta hyödynnettävän kineettisen energian määrä on tuuliturbiinin rajallisella pyyhkäisy pinta-alalla erittäin vähäinen. Staattorirakenteen virtausta ohjaavan ominaisuuden ansioista se parantaa kuitenkin mahdollisesti myös vastusvoimaroottorin kykyä käynnistyä alhaisemmilla tuulennopeuksilla.

LÄHDELUETTELO

Airfoiltools 2016. Tools to search, compare and plot airfoils [verkkosivu]. [Viitattu 03.12.2016] Saatavilla <http://airfoiltools.com/>

Akwa J. V. et al. 2012. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 16, pp 3054–3064.

Alaimo A. et al. 2013. Slotted Blades Savonius Wind Turbine Analysis by CFD. *Energies*, vol. 6, pp 6335-6351.

Armstrong S. et al. 2012. Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences. *Renewable energy*, vol. 41, pp 13–22.

Batista N. C. et al. 2015. On a self-start Darrieus wind turbine: Blade design and field tests. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 508–522.

Bhutta M. M. A. et al. 2012. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp 1926–1939.

Blackwell B. F. et al. 1977. Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors. Sandia National Laboratories Report, SAND76-0131

Bos R. 2012. Self-starting of a small urban Darrieus rotor: Strategies to boost performance in low-Reynolds-number flows. Master of Science Thesis in Sustainable Energy Technology. Delft University of Technology: Faculty of Aerospace Engineering.

Chong W. T. et al. 2012. Design and Wind Tunnel Testing of a Savonius Wind Turbine Integrated with the Omni-Direction-Guide-Vane [verkkodokumentti]. [Viitattu: 12.12.2016]. Saatavilla https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0264_full%20paper.pdf

Claessens M. C. 2006. The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines. Diplomityö. Delft University of Technology: Faculty of Aerospace Engineering.

- Det Norske Veritas. 2002. Guidelines for Design of Wind Turbines. 2 ed. Copenhagen: Det Norske Veritas. ISBN 87-550-2870-5.
- Frantsi A. 1983. Pysty akselisen, suorasiipisen lämpöä tuottavan tuulivoimalan tekninen soveltuvuus Suomen olosuhteisiin. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan laitos.
- Gopalarathnam A. et al. 2003. Design of Low Reynolds Number Airfoils with Trips. *Journal of Aircraft*, vol. 40, No. 4, pp 768–775.
- Gosselin R. et al. 2013 Parametric study of H-Darrieus vertical-axis turbines using uRANS simulations. 21st Annual Conference of the CFD Society of Canada, May 6–9, 2013, Sherbrooke, Canada.
- Hansen M. 2008. Aerodynamics of Wind Turbines. 2 ed. USA & UK: Earthscan. ISBN 978-1-84407-438-9.
- Hill N. et al. 2009. Darrieus turbines: the physics of self-starting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers vol. 223 Part A: *Journal of Power and Energy*
- Islam M. et al. 2006. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp 1087–1109.
- Islam M. et al. 2009. Investigation of Low Reynolds Number Airfoils for Fixed-Pitch Straight-Bladed VAWT. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition 5 - 8 January 2009, Orlando, Florida.
- Kacprzak K. & Sobczak K. 2014. Numerical analysis of the flow around the Bach-type Savonius wind turbine. XXI Fluid Mechanics Conference. Journal of Physics: Conference Series 530. IOP Publishing.
- Kirke B. K. & Lazauskas L. 1991. Enhancing the Performance of Vertical Axis Wind Turbine Using a Simple Variable Pitch System. *Wind Engineering*, vol. 15, pp 186–195.
- Lee J-H. et al. 2015. Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. *Renewable energy*, vol. 86, pp 231–244.

- LUT 2016. Pysty akselisen tuuliturbiinin virtausmallinnus. Julkaisematon raportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Virtaustekniikan osasto.
- Lyon C. et al. 1997. Summary of Low-Speed Airfoil Data. SoarTech Publication. Horseshoe Circle Virginia Beach, Virginia, USA.
- Marmutova S. 2016. Performance of a Savonius wind turbine in urban sites using CFD analysis. Väitöskirja. Vaasan yliopisto: Teknillinen tiedekunta, Energiatekniikka.
- Mathew S. 2006. Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Berlin: Springer.
- McLaren K. et al. 2012a. Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions. *Journal of Fluids and Structures*, vol. 32, pp. 12–26.
- McLaren K. et al. 2012b. Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine. *Wind Energy*, vol. 15, pp 349–361.
- Mohamed M. H. A. 2011. Design Optimization of Savonius and Wells Turbines. Thesis. Germany, Magdeburg. Otto von Guericke University, Prosessi ja systeemitekniikan osasto.
- Mohamed M. H. 2012. Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, vol. 47, pp 522–530.
- Morgulis N. & Seifert A. 2016. Fluidic flow control applied for improved performance of Darrieus wind turbines. *Wind Energy*, vol. 19, pp 1585–1602.
- Nakayama Y. & Boucher R. F. 1999. Introduction to Fluid Mechanics. UK: Butterworth-Heinemann. ISBN 0 340 67649 3.
- Paraschivoiu I. 2002. Wind Turbine Design - With Emphasis on Darrieus Concept. Presses internationales Polytechnique. Canada. ISBN 978-2-553-01594-6.
- Paraschivoiu I. et al. 2009. H-Darrieus Wind Turbine with Blade Pitch Control. *International Journal of Rotating Machinery*. Hindawi Publishing Corporation.

Ragni D. et al. Experimental investigation of an optimized airfoil for vertical-axis wind turbines. *Wind Energy*, vol. 18, pp 1629–1643.

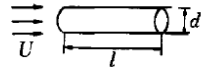
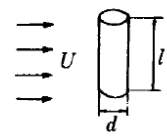
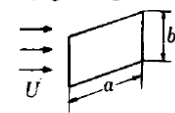

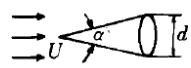
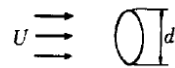


Saeed F. et al. 2011. Inverse Airfoil Design Method for Low-Speed Straight-Bladed Darrieus-Type VAWT Applications. *Wind Engineering*, vol. 35 no. 3, pp. 357–368.

Sareen A. et al. 2011. Drag Reduction Using Riblet Film Applied to Airfoils for Wind Turbines. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida.

Selig M. 2003 Low Reynolds Number Airfoil Design Lecture Notes [verkkodokumentti]. [viitattu 28.11.2016]. saatavissa: <http://m-selig.ae.illinois.edu/pubs/GopalarathnamEtal-2003-JofAC-LRNAirfoilDesignWithTrips.pdf>

LIITE I. ERI MUOTOJEN VASTUSVOIMEKERTOIMIEN ARVOJA TAULUKOITUNA

Taulukko 1: Eri muotojen vastusvoimakertoimien arvoja taulukoituna (Nakayama & Boucher 1999, 151).

Body	Dimensional ratio	Datum area, A	Drag coefficient, C_D
Cylinder (flow direction) 	$l/d = 1$		0.91
	2		0.85
	4	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.87
	7		0.99
Cylinder (right angles to flow) 	$l/d = 1$		0.63
	2		0.68
	5		0.74
	10	dl	0.82
	40		0.98
∞		1.20	
Oblong board (right angles to flow) 	$a/b = 1$		1.12
	2		1.15
	4		1.19
	10	ab	1.29
	18		1.40
	∞		2.01
Hemisphere (bottomless) 	I		0.34
	II	$\frac{\pi}{4}d^2$	1.33
Cone 	$a = 60^\circ$		0.51
	$a = 30^\circ$	$\frac{\pi}{4}d^2$	0.34
		$\frac{\pi}{4}d^2$	1.2
Ordinary passenger car 		Front projection area 	0.28–0.37

LIITE II. SAVONIUS-ROOTTORIN SUORITUSKYKYÄ KOSKEVIA TUTKIMUKSIA

Taulukko 1: Eri tutkimuksia taulukoituna koskien Savonius roottorin suorituskykyä. (Akwa et al. 2012; Marmutova 2016).

Tekijät	Tutkimusmenetelmä	Roottorin profiili	<i>Re</i>	Maksimi <i>C_{Pave}</i>
Simonds and Bodek, 1964	Field measurements	Semicircular profile buckets	Variable	0.14
Blackwell et al. 1977	Closed section wind tunnel test	Semicircular profile buckets	867,000	0.24
Alexander and Holownia 1978	Closed section wind tunnel test	Semicircular profile buckets	188,000	0.15
Shankar et al.	Open section wind tunnel test	Semicircular profile buckets	19,600	0.23
Mojola et al.	Field measurements	Semicircular profile buckets	Variable	0.27
Fujisawa 1922	Open section wind tunnel test	Semicircular profile buckets	110,000	0.17
Rabah and Osawa	Field measurements	Semicircular profile buckets	Variable	0.24
Kawamura et al.	Domain decomposition method	Semicircular profile buckets	Not informed	0.14

Tekijät	Tutkimusmenetelmä	Roottorin profiili	<i>Re</i>	Maksimi <i>C_P averaged</i>
Hayashi et al.	Open section wind tunnel test	Semicircular profile buckets	280,000	0.16
Saha and Rajkumar 2006	Open section wind tunnel test	Twisted buckets	119,000	0.14
Saha et al.	Open section wind tunnel test	Twisted buckets	61,000	0.32
Kamoji et al.	Open section wind tunnel test	Semicircular profile buckets	120,000	0.18
Kamoji et al.	Open section wind tunnel test	Buckets profiles shaped like a “hooks”	150,000	0.21
Nakajima et al.	Tests in hydrodynamic canal	Semicircular profile buckets	110,000	0.28
Kamoji et al. 2009	Open section wind tunnel test	Helical rotor	201,958	0.20
D’Alessandro et al.	Finite volume method	Semicircular profile buckets	294,000	0.25
Mohamed et al.	Finite volume method	Semicircular profile buckets	Not informed	0.30
Jae-Hoon Lee, Young-Tae	Wind tunnel and unsteady Reynolds average Navier Stokes (k-ε RNG) model	Helical rotor (different twist angles)	1,240,000	0.13

LIITE III. TUULITUNNELIN TUKKEUTUMISVAIKUTUKSEN ARVIOINTI

Tuulitunnelin tukkeutumisen vaikutusta voidaan arvioida tukkeutumisen korjauskertoimen ξ avulla. Korjatut virtausnopeus sekä dynaaminen paine saadaan arvioitua korjauskertoimen avulla. (Paraschivoiu 2002, 22.)

$$\xi = \frac{1}{4} \frac{A_m}{A_{wt}} \quad (1)$$









$$V_\infty = (1 + \xi)V_{\infty u} \quad (2)$$

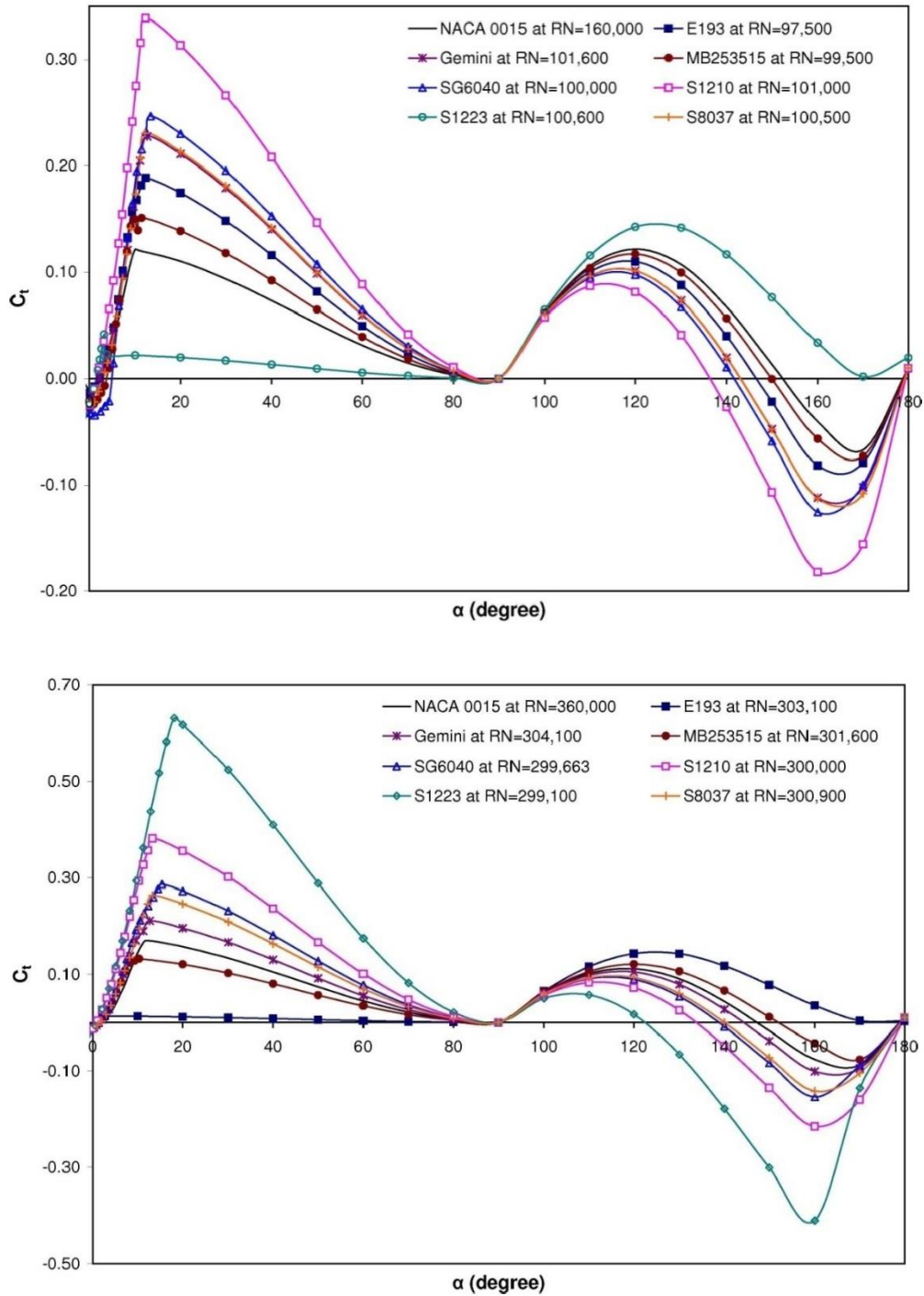
$$p_d = (1 + \xi)^2 p_{du} \quad (3)$$

missä	ξ	tuulitunnelin tukkeutumisen korjauskerroin [-]
	A_m	testattavan mallin poikkileikkauksen ala [m ²]
	A_{wt}	tuulitunnelin testiosan poikkileikkauksen ala [m ²]
	V_∞	korjattu virtausnopeus [m/s]
	$V_{\infty u}$	virtausnopeus ennen korjausta [m/s]
	p_d	korjattu dynaaminen paine [Pa]
	p_{du}	dynaaminen paine ennen korjausta [Pa]

LIITE IV. ESIMERKKEJÄ H-DARRIEUKSEN SIIPIPROFIILIVAIHTOEHDOSTA

Taulukko 1: Islam et al. (2009, 6) tutkimia siipiprofiilivaihtoehtoja suorasiipiselle Darrieus-roottorille.

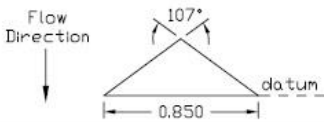
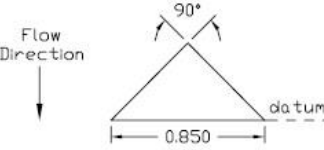
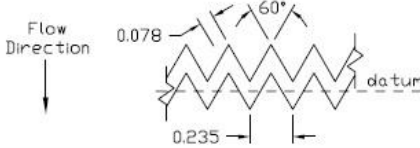
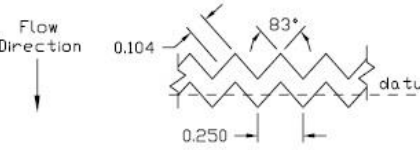
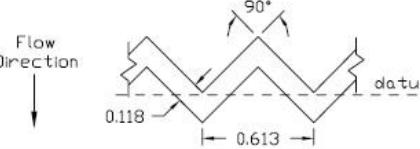
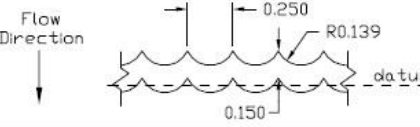
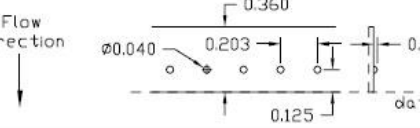
Name	Geometry	Source	Remarks
E193		Selig et. al ⁵	Eppler low RN asymmetric airfoil
GEMINI		Selig et. al ⁶	R/C sailplane asymmetric airfoil
MB253515		Selig et. al ⁵	Mike Bame low RN asymmetric airfoil
SG6040		Lyon et. al ⁷	Giguere wind turbine asymmetric airfoil
S1210		Selig et. al ⁸	Selig high lift low RN asymmetric airfoil
S1223		Selig et. al ⁸	Selig high lift low RN asymmetric airfoil
S8037		Lyon et. al ⁷	Selig low RN asymmetric airfoil
NACA 0015		Cyberiad ⁹	NACA symmetric airfoil



Kuva 1: Taulukon 1 mukaisien siipiprofilien tangentialivoimakertoimen kohtauskulman funktiona eri Reynoldsin luvun arvoilla. Islam et al. (2009, 7–8)

LIITE V. TURBULAATTORIGEOMETRIOITA

Taulukko 1: Erityyppisiä turbulaattorigeometrioita. (Lyon et al. 1997, 339)

Trip Name	Trip Geometry†	Trip Heights
small Hama		0.013 in. (0.11% <i>c</i>)
large Hama		0.013 in. (0.11% <i>c</i>)
narrow zigzag (trip type E)		0.018 in. (0.15% <i>c</i>) 0.038 in. (0.32% <i>c</i>)
medium zigzag		0.008 in. (0.07% <i>c</i>) 0.013 in. (0.11% <i>c</i>) 0.026 in. (0.22% <i>c</i>)
wide zigzag (trip type D)		0.015 in. (0.13% <i>c</i>) 0.030 in. (0.25% <i>c</i>)
crescent zigzag		0.008 in. (0.07% <i>c</i>) 0.013 in. (0.11% <i>c</i>) 0.026 in. (0.22% <i>c</i>)
raised hemispheres		0.012 in. (0.10% <i>c</i>)‡ 0.017 in. (0.14% <i>c</i>)‡ 0.022 in. (0.18% <i>c</i>)‡

† All drawings actual size. All dimensions in inches.

‡ Trip heights do not include heights of hemispheres.