

Tuuliturbiinin lavan rakenneanalyysi

Kuitujen orientaation vaikutus komposiittilavan taipumaan

Tiivistelmä

Tekijä(t) Kauhala, Teemu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2022
	Sivumäärä 63	
Työn nimi Tuuliturbiinin lavan rakenneanalyysi Kuitujen orientaation vaikutus komposiittilavan taipumaan		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), Konetekniikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli analysoida tuuliturbiinin kuitulujitteisen komposiittilavan lujuusteknisiä ominaisuuksia. Analyysissa hyödynnettiin numeerisia ratkaisuperiaatteita, kuten elementtimenetelmiä ja numeerisen virtausdynamiikan simulaatioita. Komposiittirakenteiden analyysi keskittyi selvittämään, miten kuitujen orientaatio vaikuttaa komposiittilavan taipumaan sekä laminaatissa esiintyviin jännityksiin ja vaurioihin.</p> <p>Jatkuvasti kasvavat uusiutuvan energian markkinat ja yhä suurempi tarve energiantuotantoon kuluneen vuosikymmen aikana ovat lisänneet tutkimus- ja kehitystyön tarvetta tuulitekniikan alalla. Tuulivoimalaitoksissa tapahtunut kehitys nähdään laitosten fyysisen koon kasvuna sekä tuotetun energian määrän lisääntymisenä. Entistä suurempien laitosten toteuttaminen tuo kuitenkin uusia haasteita, sillä suunnittelussa on analysoitava yksityiskohtia, joiden määrittely perinteisin menetelmin on lähes mahdotonta.</p> <p>Opinnäytetyön tietoperustana ovat tuulitekniikan perusteet sekä tuuliturbiinin lavan rakenne, siinä käytetyt materiaalit, materiaalien mekaniikka ja numeerinen virtausdynamiikka. Tietoperustassa esitellään myös elementtimenetelmien peruskäsitteet. Työn toiminnallisessa osuudessa tehdyt CFD- ja FE-analyysit toteutettiin Ansys 2021 R2 -simulaatio-ohjelmaan sisältyvillä Fluent- ja Static Structural -analyysijärjestelmillä.</p> <p>Opinnäytetyössä toteutetuista analyyseistä saadut tulokset osoittivat, että kuitujen orientaation vaikutukset komposiittilavan taipumaan ovat kuitujen toisessa pääsuunnassa yli kolme kertaa suurempia verrattuna ensimmäiseen pääsuuntaan. Vastaavasti rakenneanalyysin tulokset osoittivat myös, että ortotrooppisessa laminaattirakenteessa esiintyvät vauriot ovat riippuvaisia kuitujen orientaatiosta. Tämä johtuu siitä, että lapamateriaalina käytetyn lasikuidun mekaaniset ominaisuudet poikkeavat toisistaan kuidun pääsuuntien välillä.</p>		
Asiasanat tuulivoimalaitos, komposiitti, numeerinen virtausdynamiikka, elementtimenetelmät		

Abstract

Author(s) Kauhala, Teemu	Type of Publication Bachelor's thesis, UAS	Published 2022
	Number of Pages 63	
Title of Publication Structural analysis of a wind turbine blade Effect of fiber orientation on wind turbine blade tip deflection		
Degree and field of study Engineer (UAS), Mechanical engineer		
Abstract <p>The purpose of the thesis was to analyze the mechanical properties of the fiber-reinforced composite blade of a wind turbine by utilizing numerical solution methods, such as the finite element method as well as computational fluid dynamics simulations. The analysis of composite structures in this thesis focused on determining the effect of fiber orientation on wind turbine blade deflection, as well as examining its effect on fiber failure.</p> <p>The ever-growing market for renewable energy and the growing need for energy production over the last decade have increased the need for research and development in the field of wind technology. The advancement of wind power plants is seen in their increasing physical size and in the amount of energy produced. However, the requirements of design for ever larger wind power plants reveal details which are nearly impossible to analyze and subsequently examine by traditional methods.</p> <p>The thesis is functional by nature. The theoretical framework consists of topics related to the basics of wind technology and the structure of wind turbine blades, materials utilized, as well as mechanics of materials. Both computational fluid dynamics and basic concepts in the finite element method were also examined. The CFD- and FE-analyses carried out in the functional part of the thesis were performed using Fluent and Static Structural analyses included in the Ansys 2021 R2 -simulation software.</p> <p>The results of the analyses carried out in the thesis showed that the total deflection of a wind turbine blade depends largely on fiber orientation. Total deflection of the wind turbine blade was shown to be over three times larger with fibers oriented along the transverse direction relative to the length of the blade. Similarly, the results of the structural analysis showed that failure in the orthotropic laminate structure was also dependent on the orientation of the fibers due to the mechanical properties of the S-glass fiber in all three fiber directions.</p>		
Keywords wind turbine, composite, computational fluid dynamics, finite element method		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
1.1	Tilannekatsaus uusiutuvaan energiaan.....	1
1.2	Kehitys tuulitekniikassa.....	1
1.3	Opinnäytetyön tavoite ja rajaus.....	3
2	Tuulivoimalaitos.....	4
2.1	VAWT.....	4
2.2	HAWT.....	4
2.3	Toimintaperiaate.....	5
2.4	Tuulienergia.....	6
3	Lapa.....	10
3.1	Aerodynamiikka.....	10
3.2	Rakenne.....	13
4	Materiaalit.....	15
4.1	Komposiittimateriaalit.....	15
4.2	Väsyminen.....	16
4.3	Vaurioteoriat.....	17
5	Numeerinen virtausdynamiikka.....	19
5.1	Ratkaisuperiaate.....	19
5.1.1	Vallitsevat perusyhtälöt.....	19
5.1.2	Diskretisointi.....	22
5.1.3	Yhtälöryhmän ratkaisu.....	23
5.2	Turbulenssi.....	24
6	Elementtimenetelmät.....	28
6.1	Historia.....	28
6.2	Kiinteiden kappaleiden mekaniikka.....	28
7	Lavan mallinnus.....	34
7.1	Siipiprofiilit.....	34
7.2	Malli.....	37
8	CFD-analyysi.....	40
8.1	Elementtiverkon luonti.....	40
8.2	Analyysin rajaehdot.....	42
8.3	Tulokset.....	43
9	FE-analyysi.....	45
9.1	Lavan rakenne.....	45

9.1.1	Käytetyt materiaalit.....	46
9.1.2	Laminaatti.....	47
9.2	Elementtiverkon luonti.....	47
9.3	Analyysin rajaehdot.....	47
9.4	Tulokset.....	48
10	Pohdinta.....	53
10.1	Lapaprofiilien virtausanalyysit.....	53
10.2	Lavan virtausanalyysi.....	54
10.3	Lavan rakenneanalyysi.....	56
11	Yhteenveto.....	58
	Lähteet.....	60

Liitteet

Liite 1. S818-siipiprofiilin suunnittelukoordinaatit

Liite 2. S830-siipiprofiilin suunnittelukoordinaatit

Liite 3. S831-siipiprofiilin suunnittelukoordinaatit

Liite 4. Lavan koordinaatit

Liite 5. Suorituskyvyn kerroin TSR:n funktiona

Liite 6. Tuuliturbiinin lavan kärjessä käytetty laminaatti

Käytetyt termit

ACP	Ansys Composite PrepPost
AoA	Angle of attack, kohtauskulma
CD	Coefficient of drag, kitkakerroin
CFD	Computational fluid dynamics, numeerinen virtausdynamiikka
CL	Coefficient of lift, nosteen kerroin
CLT	Classical lamination theory, klassinen laminaatioteoria
C_p	Coefficient of performance, suorituskyvyn kerroin
E_k	Liike-energia
FDM	Finite difference method
FEA	Finite element analysis
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä
FVM	Finite volume method, tilavuusmenetelmä
HAWT	Horizontal-axis wind turbine, vaaka-akselin suuntainen tuuliturbiini
LE	Leading edge, johtoreuna
MOS	Margin of safety, varmuuskerroin
NREL	National renewable energy laboratory
$P_{m,ideal}$	Ideaaliturbiinin tehon tuotto
P_w	Tuulesta saatava teho
RANS	Reynolds averaged Navier-Stokes, Reynoldsin keskiarvoiset Navierin-Stokesin yhtälöt
SST	Shear stress transport
TE	Trailing edge, jättöreuna
TSR	Tip-speed ratio, lavan kärjen nopeussuhde
VAWT	Vertical-axis wind turbine, pystyakselin suuntainen tuuliturbiini

1 Johdanto

1.1 Tilannekatsaus uusiutuvaan energiaan

Maailmanlaajuisesti kasvava energiantuotannon tarve on viime vuosien aikana kehittynyt yhdeksi keskeisimmistä keskustelun aiheista. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2018/2001 käsitellään uusiutuvista lähteistä peräisin olevien energialähteiden käytön edistämistä. Direktiivin päätavoitteisiin lukeutuu uusiutuvien energialähteiden suosiminen fossiilisten energialähteiden sijaan kasvihuonekaasupäästöjä vähentäen, sekä energiansaannin varmuuden edistäminen ja kustannusystävällisen energian tarjoaminen mahdollisimman laajalle käyttäjäkunnalle. (RED II -direktiivi 2018/2001.)

Käytettävistä energialähteistä uusiutuvan energian tuoton osuus tulisi saada vähintään 32 prosentin tasolle. Tavoiteltu 32 prosentin raja tulisi saavuttaa siten, että uusiutuvista energialähteistä aiheutuvia käyttökustannuksia tarkastellen voidaan asetettua 32 prosentin tavoitetta määritellä uudelleen jokaisen jäsenvaltion kohdalla. (RED II -direktiivi 2018/2001.)

Uusiutuvista energiantuotantomenetelmistä tuuli- ja aurinkoenergian tuotto kasvoi vuonna 2020 ennennäkemättömät 238 GW, ja se johtui suurelta osin Kiinan subventoinneista uusiutuvaan energiaan. Pidemmällä aikavälillä tuuli- ja aurinkoenergian kapasiteetti kasvoi vuosien 2015 ja 2020 välisenä aikana 800 GW, mikä vastaa keskimäärin 18 prosentin vuosittaista kasvua. Tuuli- ja aurinkoenergian oletetaan kasvavan seuraavan kymmenen vuoden aikana 14–18 prosenttia vuosittain. Vastaavasti Suomessa tuulienergian kapasiteetti on vuosien 2009 ja 2019 aikana kasvanut 31,6 prosenttia. Vuonna 2020 kasvu lisääntyi 8,1 prosenttia nostaen tuulienergian osuuden energian kokonaistuotannosta Suomessa 0,3 prosenttiin. (BP 2021.)

Isoimpana vaikuttajana nykyiselle kasvulle uusiutuvan energian osalta entinen British Petroleum (nykyisin BP) esittää syyksi 40 prosentin laskun kustannuksissa viimeisten viiden vuoden aikana. Säästöt kustannuksissa voidaan yhdistää uusiutuvan energian teknologian kehityksessä sekä kasvavan tarpeen täyttämisen yhteydessä tapahtuneesta oppimisesta. Lähitulevaisuudessa uusiutuvan energian, eritoten tuulienergian, hinta riippuu osin kehitystyöstä ja kehitystyö puolestaan jatkuvasta kasvun tarpeesta vihreämmän energiatarpeen täyttämiseen liittyen. (BP 2021.)

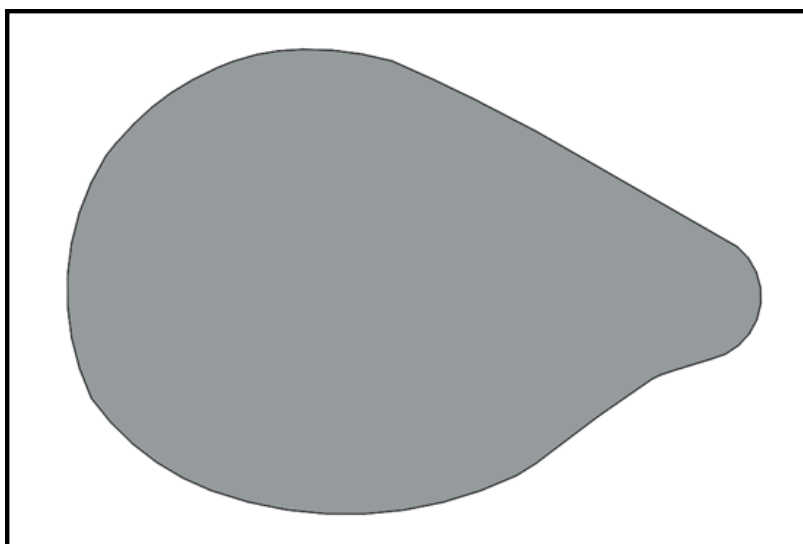
1.2 Kehitys tuulitekniikassa

Tuuliturbiinit ovat viimeisten vuosikymmenien aikana kehittyneet valtavasti. 80-luvun alkupuolella käyttöön otetut 100 kW:n suuruusluokaltaan olevat turbiinit ovat nykypäivään

verrattuna pieniä. Nykyään tuuliturbiinit ovat kooltaan jopa usean megawatin suuruisia puhumattakaan siitä, että suunnitteilla on jo 15 MW:n kokoinen turbiini, jossa lavan pituus olisi 120 metriä. (U.S. Department of Energy 2020.)

Tuuliturbiinit ovatkin viimeisen 20 vuoden ajan kasvaneet fyysiseltä kooltaan isommiksi roottorin halkaisijaltaan ja sen seurauksena myös korkeudeltaan. Roottorin halkaisijan kasvulla on suora yhteys energian tuottoon: mitä suurempi roottoripinta-ala, sitä suurempi määrä energiaa on saatavilla. Koon kasvattamisen periaatteena on tuuliväänteen hyödyntäminen asettamalla turbiini korkeammalle, jolloin päästään hyödyntämään suurempia tuulen nopeuksia, koska tuulen nopeuden suhde siitä saatavaan energiaan on potenssiin kolme. (Thresher ym. 2008.)

Thresherin ym. (2008) mukaan tuuliturbiinien koon kasvu aiheuttaa suunnittelun kannalta ongelmia, sillä lavan pituuden kasvaessa tulevat siihen kohdistuvat kuormituksetkin kasvaamaan. Roottorin rakenteellisen hyödyn kannalta oleellisiksi asioiksi suunnittelussa tulevat oikeanlaiset materiaalit, kuten komposiitti, jotta lavan massa pidettäisiin mahdollisimman alhaisena. Toisena tekijänä tulee siipiprofiilien kehitys: Pidempiin lapoihin kohdistuvien kuormitusten ollessa melko suuria tulee ohuempia profiileja välttää. Paksummilla profiileilla puolestaan aerodynaamiset ominaisuudet voivat jäädä heikommiksi, jolloin tarpeelliseksi tulee valita siipiprofiili, jossa yhdistyy molempien edellä mainittujen hyviä puolia. Esimerkki suuremman lavan tyveen soveltuvasta siipiprofiilista näkyy kuvassa 1.



Kuva 1. Siipiprofiili lavan tyvessä (mukaillen Thresher ym. 2008)

Kuvan 1 mukainen siipiprofiili soveltuu suuremman lavan tyveen kuormankantokyvyn ansiosta. Paksumpi poikkileikkaus mahdollistaa suuremman määrän materiaalia, jolloin juureen vaikuttavat voimat jakautuvat suuremmalle alalle ja siten jännitykset pysyvät matalina.

1.3 Opinnäytetyön tavoite ja rajaus

Kasvava tarve uusiutuvasta energiasta tulee näkymään tulevaisuudessa tuotekehitystyön kasvuna tuulitekniikan alalla, eritoten suunnittelussa. Yhä suurikokoisemmat tuulivoimalaitokset edellyttävät tarkempia päätöksiä turbiineissa käytettävistä osista ja materiaaleista. Lisäksi tarvitaan tietoa turbiineihin kohdistuvista kuormituksista, kuormitustapauksista ja käyttöolosuhteista. Vallitsevien olosuhteiden ja niistä aiheutuvien kuormien huomiointi ei perinteisillä analyyttisillä menetelmillä onnistu riittävällä tarkkuudella, jolloin tuuliturbiinien suunnittelussa oleelliseksi tulevat numeeriset tarkastelumenetelmät, näistä mainittakoon virtausdynamiikan ja elementtimenetelmien simulaatiot. Numeeristen analyysityökalujen avulla mahdollistetaan sellaisten asioiden tarkastelu, joita ei käsin laskettuna kannata edes kokeilla suunnittelukohteiden ja niissä ilmenevien yksityiskohtien monimutkaisuuden vuoksi.

Tämä opinnäytetyö alkaa tuulitekniikan perusteista ja erilaisten tuuliturbiinien esittelystä. Tuulivoimalaitoksista siirrytään tuulesta saatavaan energiaan sekä tuuliturbiinin lapaan, sen rakenteeseen ja siinä käytettäviin materiaaleihin. Työn teoreettinen osuus päätetään syventymällä numeerisen virtausdynamiikan ja elementtimenetelmien ratkaisumekaniikkaan sekä työn toiminnallisen osuuden kannalta valittuihin keskeisimpiin käsitteisiin.

Opinnäytetyön toiminnallisessa osassa mallinnetaan tuuliturbiinin lapa SolidWorks-suunnitteluohjelmalla. Mallinnetulle lavalle suoritetaan ensin virtausdynamiikan simulaatio, josta saadut tulokset muodostavat tuuliturbiinin lapaan kohdistuvat kuormitukset tyypillisissä käyttöolosuhteissa. Opinnäytetyön toiminnallinen osuus päätetään FE-analyysiin, jossa analysoidaan kuitujen orientaation vaikutuksia tuuliturbiinin lavan taipumaan, komposiittirakenteisessa laminaatissa esiintyviä lavan kuormituksesta aiheutuvia jännityksiä sekä lavassa ilmeneviä potentiaalisia vaurioita.

2 Tuulivoimalaitos

2.1 VAWT

Tuuliturbiinit voidaan jakaa pysty- ja vaaka-akselin suuntaisiin tuuliturbiineihin. Vertical-Axis Wind Turbine (VAWT) eli pystyakselin suuntainen tuuliturbiini on nimensä mukaisesti laite, jossa lavat pyörivät pystyakselin ympäri. Tuulivoimalaitoksena kuvassa 2 näkyvillä oleva laite on turbiinityypeistä harvemmin käytetty, koska sen hyötysuhde on keskimääräistä heikompi. Lisäksi pystyakselin suuntainen tuuliturbiini vaatii alkukäynnistyksen toimiakseen. (Letcher 2017, 185.)



Kuva 2. VAWT (Wacker 2010)

Kuvan 2 mukaisen pystyakselisen turbiinin hyviin puoliin puolestaan kuuluu se, ettei sitä tarvitse asettaa tuulen suuntaan. Lisäksi tyyppin huoltaminen on helpompaa, koska suurin osa huoltoa vaativista osista sijaitsee maan tasolla jalustaan asennettuna. (Bajaro 2011.)

2.2 HAWT

Horizontal-Axis Wind Turbine (HAWT), tai vaaka-akselin suuntainen tuuliturbiini, on kaikkien yleisin käytössä oleva turbiinityppi. Vaaka-akselisessa tuuliturbiinissa roottori pyörii vaakatasoon asetetun akselin ympäri kuvassa 3 esitetyllä tavalla. Tyyppin suosio perustuu paljolti sen parempaan kykyyn tuottaa tehoa verrattuna pystyakselin suuntaiseen tuuliturbiiniin. (Bajaro 2011.)

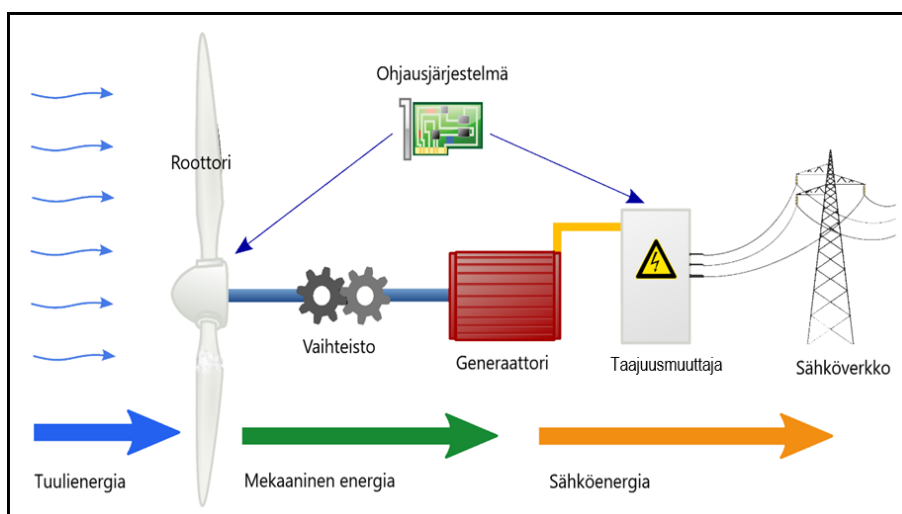


Kuva 3. HAWT (Nuala 2005)

Kuvassa 3 esitetyn vaaka-akselin suuntaisen tuuliturbiinin suurempi hyötysuhde perustuu siihen, että HAWT turbiinissa jokainen lapa vaikuttaa energian tuotantoon niiden pyöriessä, minkä seurauksena sähkön tuotanto on halvempaa ja siten kannattavampaa. Kääntöpuolelta eritoten isommilla tuulivoimalaitoksilla tulee komponenttien kuljetus asennuspaikoille. (Bajaro 2011.)

2.3 Toimintaperiaate

Mohd (2012, 17–18) toteaa, että tuuliturbiini on toimintaperiaatteeltaan laite, jossa tuulen kineettinen energia muunnetaan ensin mekaaniseksi energiaksi ja mekaaninen energia edelleen sähköenergiaksi. Olipa kyseessä sitten useamman megawatin suuruinen turbiini tai katuvalopylvään päälle sijoitettu muutaman sadan watin suuruinen tuulivoimalaite, on molempien tyyppien toimintaperiaate sekä tuulesta saatavan energian muutos sähköenergiaksi sama. Toimintaperiaate esitetään kuvassa 4.

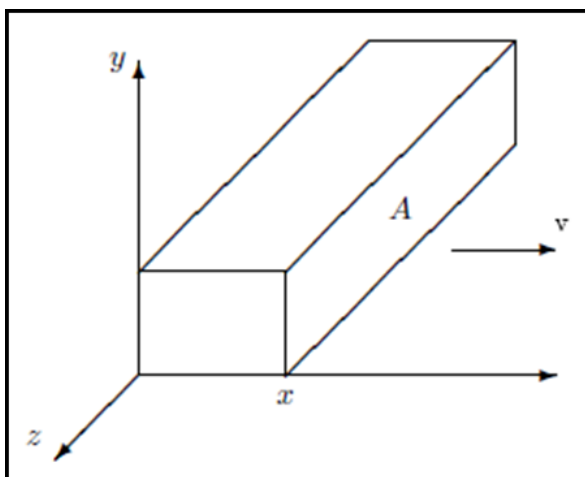


Kuva 4. Tuuliturbiinin toimintaperiaate (mukailtu Jalonsom 2021)

Turbiinityypistä riippumatta tuulivoimalaitos koostuu kuvan 4 mukaan vähintäänkin roottori eli lavoista, joiden liike riippuu niiden ohi virtaavasta ilmasta ja sen nopeudesta. Roottori on yhdistetty voimansiirtoakselilla vaihteistoon tai suoravetoisessa turbiinissa generaattoriin, jonka tehtävänä on muuttaa lavan pyörimisliike eli mekaaninen energia sähköenergiaksi. Järjestelmän ohjauksesta vastaa ohjelmoitava logiikka, jonka ohjattavia parametrejä ovat muun muassa lavan kulma ilman vapaaseen virtaukseen nähden ja roottorin pyörimisnopeuden rajoitus. Generaattorista sähkö siirretään taajuusmuuttajan kautta sähköverkkoon ja loppukäyttäjälle. (Mohd 2012, 17–18.)

2.4 Tuulienergia

Tuulesta saatavalla energialla tarkoitetaan liikkuvan ilmassan eli ilman kineettisen energian muuntamista mekaaniseksi energiaksi ja edelleen sähköenergiaksi. Mohd (2012, 25) havainnollistaa tuulen kineettistä energiaa ilman halki liikkuvan ilmapartikkelin avulla (kuva 5), mikä saa kaavassa 1 esitetyn muodon. Kuva 5 esittää äärettömän pienen ilmapartikkelin kineettistä energiaa E_k ja sen muutosta, kun ilmapartikkelin massaa kasvatetaan.



Kuva 5. Ilmapartikkeli (Johnson 2006, 137)

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)v^2 \quad (1)$$

missä

A = poikkileikkauksen pinta-ala [m^2]

m = partikkelin massa [kg]

v = partikkelin nopeus [m/s]

ρ = ilman tiheys [kg/m^3]

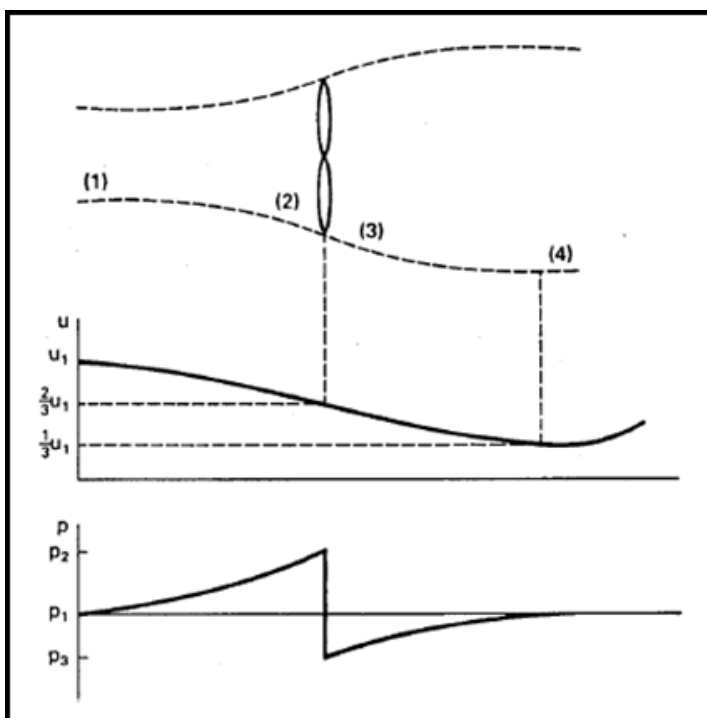
x = ilmapartikkelin paksuus [m].

Olettaen, että kuvan 5 mukaisen ilmapartikkelin x-akselin suuntainen sivu liikkuu, voidaan kaavasta 1 todeta, että kineettisen energian muutos on suoraan verrannollinen ilmapartikkelin paksuuden arvoon, koska partikkelin massa kasvaa samassa suhteessa. Siten tuulesta saatava teho P_w voidaan ilmaista kineettisen energian muutoksena ajan suhteen ideaaliturbiinille kaavalla 2. (Johnson 2006, 136.)

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Todellisuudessa tuulesta ei ole kuitenkaan mahdollista saada kaikkea energiaa irti, kuten kaava 2 antaa ymmärtää, vaan iso osa saatavilla olevasta energiasta häviää lavan pintakarheudesta aiheutuvan kitkan takia. Lisäksi tuuliturbiinin lapapinta-ala rajoittaa roottorin kykyä siirtää ilmasta saatavaa kokonaisenergian määrää akselille. Tästä syystä tuulella on energiaa roottorin jälkeenkin.

Kuvasta 6 nähdään, että ilman nopeus laskee ja paine nousee sen lähestyessä roottoria, ja vastaavasti paine laskee alle vallitsevan ilmanpaineen heti roottorin jälkeen. Paineen nousu ennen roottoria kuvastaa tuulen kineettisen energian muutosta potentiaalienergiaksi. Sama asia voidaan todeta myös roottorin jälkeisellä alueella, jossa paine nousee takaisin ilmanpaineen tasolle kuvastaen sitä, ettei roottori kykene hyödyntämään kaikkea ilmasta saatavilla olevaa energiaa. (Johnson 2006, 138.)



Kuva 6. Ilman nopeuden (u) ja vallitsevan paineen (p) muutos ilman virratessa turbiinin läpi (Johnson 2006, 138)

Kuvan 6 avulla voidaan osoittaa, että kaavojen 3–6 mukaiset suhteet pätevät optimaalisissa olosuhteissa, kun roottorin ohi virtaavasta ilmasta siirtyy suurin mahdollinen määrä energiaa turbiiniin (Johnson 2006, 138).

$$u_2 = u_3 = \frac{2}{3}u_1 \quad (3)$$

$$u_4 = \frac{1}{3}u_1 \quad (4)$$

$$A_2 = A_3 = \frac{3}{2}A_1 \quad (5)$$

$$A_4 = 3A_1 \quad (6)$$

missä

A_1 = ilmavylvään häiriintymätön pinta-ala

A_2 = turbiinin pinta-ala

A_3 = virtausnopeuden hidastumisesta häiriintynyt ilmavylvään pinta-ala

A_4 = ilmavylvään maksimipinta-ala

u_1 = vapaan ilman virtausnopeus

u_2 = ilman virtausnopeus ennen turbiinia

u_3 = ilman virtausnopeus turbiinin jälkeen

u_4 = ilman virtausnopeuden minimi.

Kaavojen 3–6 yhdenmukaisuuksista seuraa, että tuulesta saatavaa mekaanista tehoa voidaan ajatella roottoriin tulevan ja siitä lähtevän tehon erotuksena kaavan 7 mukaisesti (Johnson 2006, 139).

$$P_{m.ideal} = P_1 - P_4 = \frac{1}{2}\rho(A_1u_1^3 - A_4u_4^3) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}A_1u_1^3\right) \quad (7)$$

Kaavan 7 mukaan ideaalinen turbiini pystyisi hyödyntämään 8/9 saatavilla olevasta tehosta, mikä johtaa väärinkäsityksiin. Yleisemmin käytetty määritelmä turbiinista saatavalle teholle esitetään kaavassa 8. (Johnson 2006, 139.)

$$P_{m.ideal} = \frac{1}{2}\rho\left[\frac{8}{9}\left(\frac{2}{3}A_2\right)u_1^3\right] = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{16}{27}A_2u_1^3\right) \quad (8)$$

missä

u = virtaavan ilman nopeus.

Tuulesta saatavissa olevan energian suhdetta roottorin avulla kehitettyyn energian määrään kutsutaan tuuliturbiinin suorituskyvyn kertoimeksi tai tehokertoimeksi, ja sitä ilmaistaan kaavassa 9 esitetyllä tavalla (Singh & Santoso 2011).

$$C_p = \frac{\text{Roottorin keräämä energia}}{\text{Tuulesta saatava energia}} = \frac{P_{\text{roottori}}}{P_{\text{tuuli}}} \quad (9)$$

Käytännössä tuuliturbiini pystyy hyödyntämään kaavan 8 perusteella enintään 16/27 tai 59,3 prosenttia saatavilla olevasta tehosta. 59,3 prosentin rajaa kutsutaan Betzin laiksi. Nykyään ei kuitenkaan ole olemassa tuulivoimalaitosta, joka pystyisi hyödyntämään saatavilla olevasta tehosta 59,3 prosenttia, vaan oikea lukema ylittää hyvin suunnitellullakin laitteella enintään 50 prosenttiin. (Johnson 2006, 139.)

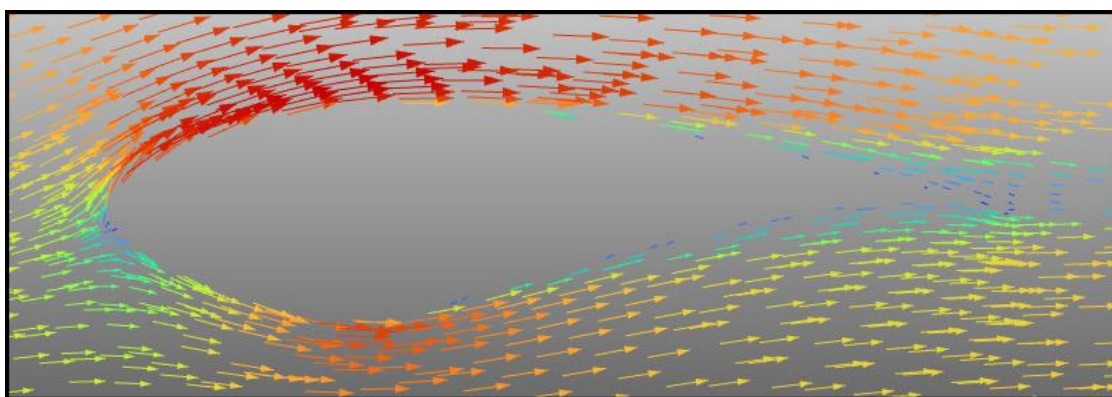
3 Lapa

3.1 Aerodynamiikka

Käsitteenä aerodynamiikka on noin 300 vuotta vanha ja yksi virtausdynamiikan alatieteenaloista. Aerodynamiikalla tarkoitetaan kiinteiden aineiden ja fluidipartikkelien välistä vuorovaikutusta. Fluidin määritelmä virtausdynamiikassa voi käsittää useita asioita, mutta tämän työn osalta aerodynamiikalla viitataan ilmapartikkeleihin sekä niiden käyttäytymiseen esimerkiksi tuuliturbiinin lapaprofiilin kohdatessaan. (Anderson 2017, 11–14.)

Andersonin (2017, 16–17) mukaan fluidipartikkelien virtaus kiinteän pinnan ohi muodostaa perustan aerodynamiikan tieteenalalle. Kiinteäksi pinnaksi määritellään esimerkiksi siipiprofiili, joka liikkuu vapaaseen ilmavirtaan nähden nopeudella v . Tällöin on itsestään selvää, että kaikki siipiprofiiliin sisältyvät osat liikkuvat yhdenmukaisesti samaa nopeutta, mutta vastaavanlaista ilmiötä ei nähdäkään enää ilmapartikkeleiden käytöksessä.

Fluidi on ominaisuuksiltaan, eritoten objektin kohdatessaan, jatkuvasti muotoaan muuttava, ja sen paikallisen tangentialisen leikkausjännityksen suuruus on suoraan verrannollinen sen muodonmuutoksen gradienttiin. Kuvassa 7 nähdään, miten ilmapartikkelien käyttäytyminen eroaa kiinteän aineen käytöksestä niiden kohdatessa toisensa. (Anderson 2017, 16–17.)



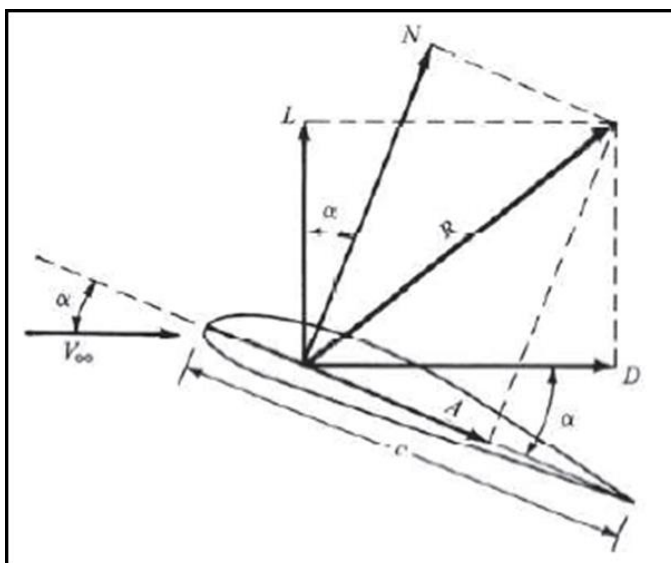
Kuva 7. Ilman virtaus siipiprofiilin ympäri

Kuva 7 esittää, miten ilmapartikkelien nopeus ja suunta muuttuvat niiden virratessa siipiprofiilin ohi. Kuvassa nähdään, että virtauksen aikana ilmapartikkelien paikallinen nopeus saa maksimiarvonsa profiilin korkeimmilla kohdilla.

Aerodynaamiset voimat

Aerodynaamiset voimat ja momentit luokitellaan johtuvaksi kahdesta lähteestä: tarkasteltavan siipipinnan paine- ja leikkausjännitysten jakaumasta. Aerodynaamisten voimien muodostuminen on siten riippumaton esimerkiksi tarkasteltavan pinnan monimutkaisuudesta.

Aerodynaaminen resultanttivoima johdetaan siipiprofiilin jännettä kohtisuoraan nähden vaikuttavan paineen sekä tangentin suuntaisen leikkausjännityskomponentin avulla kuvassa 8 esitetyllä tavalla. (Anderson 2017, 19.)



Kuva 8. Siipiprofiiliin kohdistuvat aerodynaamiset voimat (Anderson 2017, 20)

missä

A = aksiaalinen voima, vektorisumman R vaakakomponentti

D = nosteesta indusoitunut vastus

L = siipiprofiilin kehittämä noste

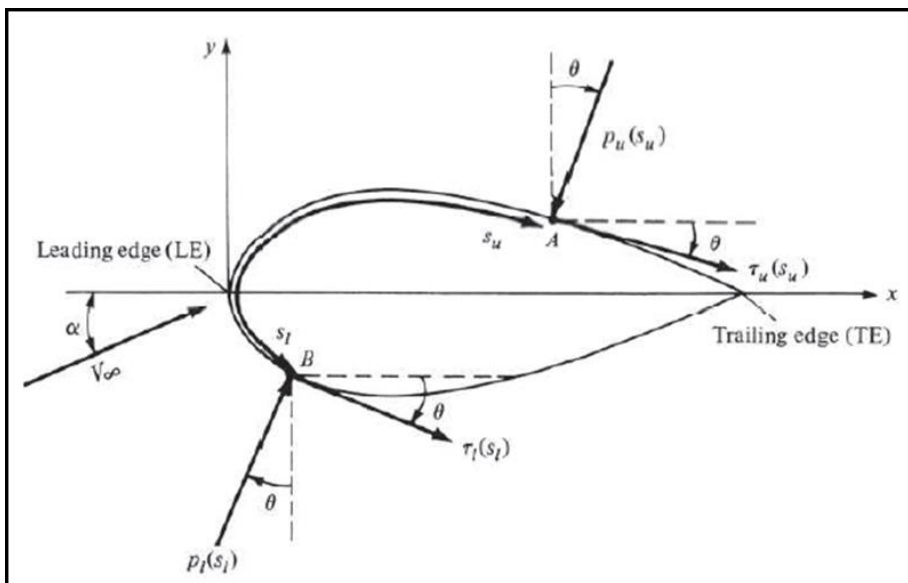
N = normaalivoima, vektorisumman R pystykomponentti.

Kuvassa 8 esitetyn aerodynaamisen resultanttivoiman muodostuminen perustuu nostovoiman sekä siitä indusoituneen vastuksen vektorisummaan. Tällöin siipiprofiiliin kehittämä noste ja siitä indusoitunut vastus voidaan määrittellä normaalivoiman ja aksiaalisen voiman komponenteilla kaavoin 10 ja 11. (Anderson 2017, 20.)

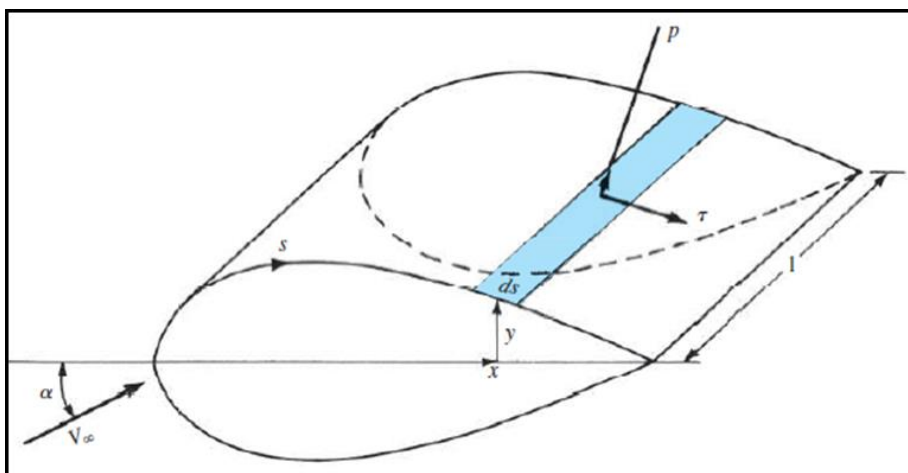
$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (10)$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \quad (11)$$

Aerodynaamisten voimien johtaminen kaksikulotteisesta siipiprofiilista saadaan integroimalla pintaan kohdistuva paine ja leikkausjännitys johtoreunan ja jättöreunan väliltä kuvissa 9 ja 10 esitettyjen määritelmien avulla (Anderson 2017, 20–21).



Kuva 9. Terminologia 2D-profiilille (Anderson 2017, 21)



Kuva 10. Pintaelementtiin kohdistuva aerodynaaminen voima (Anderson 2017, 22)

missä

A, B = mielivaltainen piste

θ = leikkausjännityksen suuntainen kulma vaakatasoon nähden

p_u, p_l = paine ylä- ja alapinnalla

τ_u, τ_l = leikkausjännitys ylä- ja alapinnalla

s_u, s_l = siipiprofiilin ylä- ja alapinta.

Kuvista 9 ja 10 huomataan, että paineen ja leikkausjännityksen vaikutus kuvitteelliseen äärettömän pitkän pinnan omaavaan elementtiin ds on sekä normaalivoiman että aksiaalisen voiman kokonaisvaikutus pituusyksikköä kohti siiven ylä- ja alapinnalla kaavojen 12–15 mukaisesti (Anderson 2017, 22).

$$dN'_u = -p_u ds_u \cos \theta - \tau_u ds_u \sin \theta \quad (12)$$

$$dA'_u = -p_u ds_u \sin \theta + \tau_u ds_u \cos \theta \quad (13)$$

$$dN'_l = p_l ds_l \cos \theta - \tau_l ds_l \sin \theta \quad (14)$$

$$dA'_l = p_l ds_l \sin \theta + \tau_l ds_l \cos \theta \quad (15)$$

Normaali- ja aksiaalivoimien summa pituusyksikköä kohti saadaan integroimalla kaavat 12 ja 15 siiven etu- ja jättöreunan väliltä kaavojen 16 ja 17 mukaisesti (Anderson 2017, 22).

$$N' = - \int_{LE}^{TE} (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta) ds_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \cos \theta - \tau_l \sin \theta) ds_l \quad (16)$$

$$A' = \int_{LE}^{TE} (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta) ds_u + \int_{LE}^{TE} (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta) ds_l \quad (17)$$

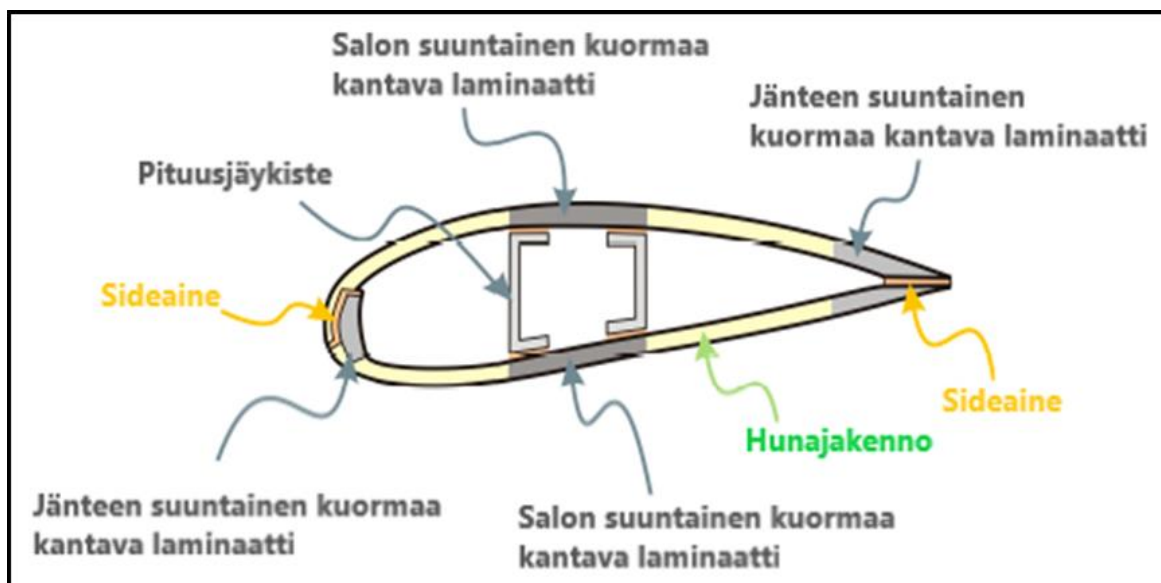
Siipiprofiilin muodostama nostovoima ja virtauksesta aiheutunut vastus saadaan sijoittamalla kaavat 16 ja 17 kaavoihin 10 ja 11, ja ne pätevät mielivaltaisesti määritellyille pinnoillekin (Anderson 2017, 23).

Hansen (2015, 7–8) toteaa, että nostovoiman kehitys tuuliturbiinin lavassa on lopputulos siipiprofiilin ohi virtaavan ilman ja ilmavirran suhteellisen nopeuden muutoksesta profiilin molemmin puolin. Siipipinnan muodolla ja kohtauskulmalla on olennainen rooli kehitetyn nostovoiman tuotossa siten, että kohtauskulman suuruus vaikuttaa suoraan pintojen välisen paine-eron muodostumiseen, koska jyrkempi kohtauskulma pakottaa siipipinnan ylimenevän ilman liikkumaan suuremmalla nopeudella kuin alapinnalla liikkuvan ilman. Tällöin syntävä paine-erokin kasvaa, kunnes profiili sakkaa riittävän suuren kohtauskulman saavutettuaan, eikä siipi enää kehitä riittävää nostetta.

3.2 Rakenne

Oikein suunniteltuna tuuliturbiinin lavan oletetaan kestäväen jatkuvaa käyttöä 10–30 vuotta. Tavoitellun käyttöiän saavuttamiseksi pitää lapaan kohdistuvat kuormitukset huomioida rakenteellisilla toimenpiteillä riittävän jäykkyyden ja kestävyuden takaamiseksi sekä mahdollisimman kevyen lopputuloksen aikaansaamiseksi. (Arias 2016.)

Tuulivoimalaitoksen lapa koostuu tyypillisesti useista eri osista ja materiaaleista. Kuva 11 esittää tuuliturbiinin lavan poikkileikkausta, josta nähdään lavan ylä- ja alapinnat. Ne on lavan tyypistä ja koosta riippuen valmistettu alumiinista tai puusta tai hyödyntämällä eri materiaalien yhdistelmiä eli komposiittimateriaaleja. (Mishnaevsky ym. 2017.)



Kuva 11. Tuuliturbiinin laparakenne (mukailtu Mishnaevsky ym. 2017)

Kuvan 11 laparakenteessa ulkokuori on useista eri kerroksista laminoitua komposiitti- ja hunajakennorakennetta. Salon suuntainen eli siiven pituussuuntainen jäykkyys taataan asentamalla pituusjäykiste, mikä yhdistää profiilin ylä- ja alapinnat. Siiven jännitys-puristuskestävyys puolestaan toteutetaan jänteen suuntaisilla eli profiilin pituussuuntaisilla kuormaa kantavilla laminaateilla. (Mishnaevsky ym. 2017.)

4 Materiaalit

Tuuliturbiinin käyttöympäristö ja -olosuhteet määrittelevät sen lavoilta vaadittavat ominaisuudet. Normaaleilla käyttöolosuhteilla viitataan yleensä vallitsevan tuulen nopeuteen, mikä turbiinityypistä riippuen asettuu 1–25 m/s alueelle. Ääriolosuhteissa, eli tuulen ylittäessä 25 m/s, tuuliturbiinin lavat yleensä pysäytetään ja käännetään pituusakselinsa ympäri laparakenteisiin kohdistuvien kuormitusten minimoimiseksi ja materiaalivahinkojen välttämiseksi. Tämän toimenpiteen vaikutukset tuuliturbiinin lapojen käyttöikään ovat merkittävät. Tuuliturbiinin lavat tulisi suunnitella kestäväksi sekä normaali- että ääriolosuhteista aiheutuvia rasituksia, kuten yli 25 m/s tuulta, osumatta torniin sekä väsymättä useamman vuosikymmenen. Materiaalien valinnassa on tällöin optimoitava materiaalin kestävyys ja verrattava sitä eritoten materiaalien ominaispainoihin ja valmistuskustannuksiin. Komposiittimateriaalit ovat viimeisen viidenkymmenen vuoden aikana nousseet yleisimmiksi käytettäviksi materiaaleiksi lapojen valmistuksessa. (Brøndsted ym. 2005.)

4.1 Komposiittimateriaalit

Komposiitin yleispätevä määritelmä on kahden tai useamman eri materiaalin yhdistelmä siten, että kaikki materiaalit pitävät ominaisuutensa alkuperäisinä. Komposiittimateriaalien suosio perustuu siihen, että niitä voidaan soveltaa yhä erikoisempiin kohteisiin. (Dowling ym. 2013, 100.)

Painokriittisiin suunnittelukohteisiin, kuten tuuliturbiinin lapoihin, soveltuu laminoitu komposiittirakenne erinomaisesti sen verraten korkeiden lujuusteknisten ominaisuuksiensa ansiosta. Lavoissa käytetyt laminoituvat komposiittirakenteet koostuvat tyypillisesti useasta eri kerroksesta, joissa kuitujen orientaatiolla pyritään laminaatin lujuusteknisiä ominaisuuksia ohjaamaan tarkoituksenmukaisesti lapaan kohdistuvien kuormitusten aiheuttamien vaikutusten minimoimiseksi ja lavan käyttöikänsä maksimoimiseksi. (Dowling ym. 2013, 103–105.)

Komposiittimateriaalien ominaisuudet ovat perinteisiin metallimateriaaleihin verrattuna erilaiset (vrt. isotrooppinen ja ortotrooppinen). Toisin kuin metalleilla, kuitulujitteisten komposiittien lujuustekniset ominaisuudet ovat riippuvaisia paljolti suunnasta, johon kuidut asetetaan. Edellä mainitusta syystä komposiittimateriaalit luokitellaan ortotrooppisiin materiaaleihin. Olipa kyseessä lämmönjohtavuus, iskunkestävyys tai lämpölaajenemisen kerroin, voidaan ortotrooppisissa komposiiteissa todeta edellä mainittujen suureiden minimiarvot kuitujen ollessa 90 asteen kulmassa pituussuuntaan nähden eritoten yhdensuuntaisten kuitujen tapauksessa. Komposiittimateriaalien ortotrooppisuus ei näin ollen aiheuta suunnittelun kannalta kuitenkaan ongelmia, vaan lähinnä luo mahdollisuuksia, sillä oikein valitulla kuitu-

hartsiyhdistelmällä saadaan komposiittirakenteista aikaan lujimpiakin rakenneteräksiä vahvempi kokoonpano rakenteen kokonaispaino huomioiden. (Mallick 2007, 20–22.)

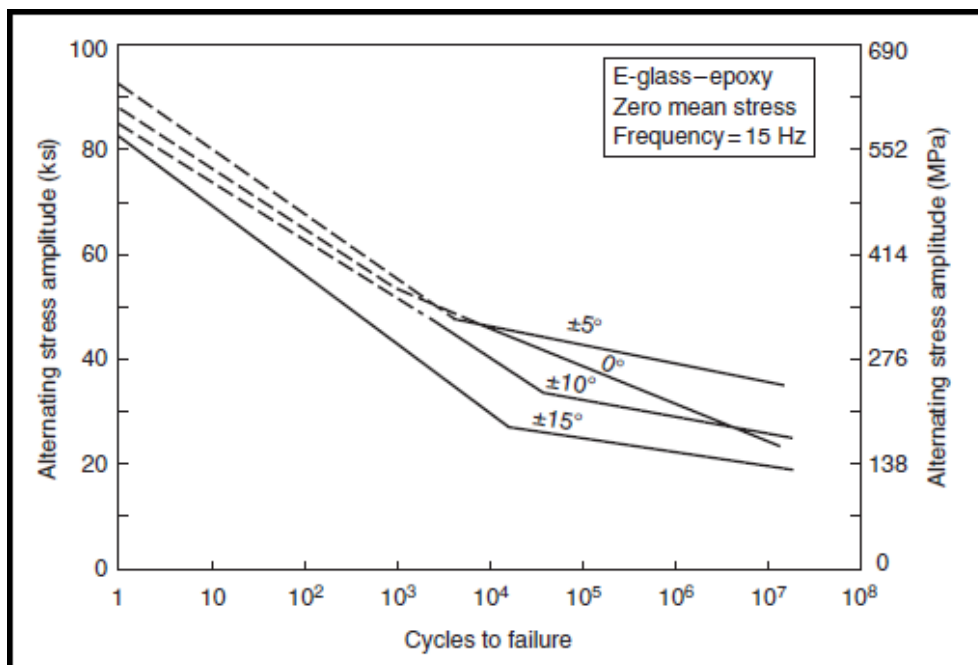
Ilmailualalla ja tuulitekniikassa tarve entistä kevyemmille ja vahvemmille rakenteille on jatkuvaa ja tästä todisteena on kasvu hunajakennorakenteiden käytössä. Hunajakennorakenteessa yhdistyy rakenteellisesti jäykkä ja kevyt ydin, jota ympäröi kuitulujitteinen pintamateriaali, eikä sille löydy vertailukelpoista vaihtoehtoa metallimateriaalien puolelta vastaavaan hintaan. (Mallick 2007, 24–30.)

4.2 Väsyminen

Nijssenin (2006) mukaan tuuliturbiinin lavat suunnitellaan kestämään käytössä vähintään 20 vuotta tai 10^8 – 10^9 kuormitus sykliä. Suunnittelun käyttöiän ja lapoihin kohdistuneiden rasitusten takia lapojen kestävyys väsyttävälle kuormitukselle muodostuu yhdeksi tärkeimmistä suunnittelukriteereistä.

Materiaalien väsymisellä viitataan materiaalin ominaisuuksien heikkenemiseen, mikä aiheutuu muun muassa rakennetta kuormittavasta voimasta, sen amplitudista ja kuormituskerroista. Tällöin on mahdollista, että pienikin kuorma kykenee rikkomaan kappaleen, kunhan riittävän määrä kuormituskertoja täyttyy. (Vassilopoulos 2010, 18.)

Materiaalien väsymiskäyttäytymistä luonnehditaan kuvan 12 mukaisten S-N-käyrien avulla.



Kuva 12. S-N-käyrä (Mallick 2007, 299.)

Kuvassa 12 esitetty S-N-käyrä kuvastaa lasikuitu-epoksilaminaatin kestoikää kuormitusvaihteluina jännitysamplitudin funktiona (Nijssen 2006, 52). Kuvasta 12 huomataan muun

muassa, että lasikuitu-epoksilaminaattirakenteen väsymiskestävyyskin on riippuvainen kuitujen orientaatiosta.

Komposiittimateriaalien mekaaniset ominaisuudet riippuvat suuresti kuitujen orientaatiosta ja kuormitustyyppistä, joiden vaikutukset tulee huomioida kuitulujitteisia komposiittirakenteita suunniteltaessa. Toisena merkityksellisenä erona metallimateriaalien väsymiseen verrattuna on se, että komposiittirakenteisiin vaikuttavan kuormituksen potentiaali aiheuttaa vauriota myös alhaisilla jännityksillä, jolloin komposiittirakenteille ei ole mahdollista suunnitella äärettömän pitkää käyttöikää toisin kuin teräsrakenteille. (Nijssen 2006, 69.)

IEC-64100-23- ja DNVGL-ST-0376-suunnittelustandardit koskevat tuuliturbiinin lapoja. Niiden mukaan väsymisen kannalta tarkastettavia asioita ovat muun muassa komposiittilaminaatin kestävyys kuitujen pääsuuntaan eri R-arvoilla eli jännityssuhteilla sekä sen selvittäminen, kuinka kauan lapa kestää väsyttävää kuormitusta rikkoutumatta tietyn suuruisella jännityksellä tai tietyillä jännitystyypeillä. (DS/IEC/TS 61400-23 2002, 31–32; DNVGL-ST-0376 2015, 44–45.)

4.3 Vaurioteoriat

Komposiittimateriaalit tuovat ominaisuuksiensa puolesta uudenlaisia suunnittelunäkökulmia verrattuna isotrooppisiin materiaaleihin. Ortotrooppisille materiaaleille soveltuvat suunnitteluteoriat eroavat metallimateriaalien suunnittelusta siten, ettei komposiiteissa nähdä samantasoista myötäämistä kuin esimerkiksi teräksillä, jolloin metallimateriaaleille sovellettavissa olevat vaurioteoriat eivät päde komposiiteilla. (Mallick 2007, 469.)

Suurimman jännityksen teoria

Yksinkertaisin menetelmä komposiittimateriaalien kestävyuden määrittelyyn on tehdä se olettamalla, että perusaine hajoaa, kun mikä tahansa jännitys on yhtä suuri tai ylittää tarkasteltavan materiaalin murtorajan jossakin sen kolmessa pääsuunnassa. Tällöin vaurion välttämiseksi pätevät kaavoissa 18–18.2 esitetyt epäyhtälöt. (Mallick 2007, 471.)

$$-S_{Lc} < \sigma_{11} < S_{Lt}, \quad (18)$$

$$-S_{Tc} < \sigma_{22} < S_{Tt}, \quad (18.1)$$

$$-S_{LTs} < \tau_{12} < S_{LTt}. \quad (18.2)$$

Tarkasteltaessa esimerkiksi x-akselin suuntaista vetokuormitusta vaikuttaa kappaleeseen vain jännityskomponentti σ_{xx} . Koska $\sigma_{yy} = \tau_{xy} = 0$, ovat muunnellut jännitykset ilmaistavissa kaavoin 19–21. (Mallick 2007, 471–472.)

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta \quad (19)$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta \quad (20)$$

$$\tau_{12} = -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta \quad (21)$$

Kaavojen 19–21 mukaan maksimijännitysteoria osoittaa, että laminaatin kestävyyttä voidaan parantaa kuitujen orientaatiota θ muuttamalla (Mallick 2007, 472–473).

Suurimman venymän teoria

Mallickin (2007, 474–475) mukaan komposiittirakenteessa esiintyviä vaurioita voidaan vaihtoehtoisesti määritellä myös maksimivenymään perustuvalla teorialla. Maksimivenymäteorian mukaan vaurio muodostuu tapauksissa, joissa havaitun venymän suuruus ylittää suurimman sallitun venymän. Tällöin vaurion välttäminen edellyttää, että kaavoissa 22–22.2 esitetyt epäyhtälöt toteutuvat.

$$-\varepsilon_{Lc} < \varepsilon_{11} < \varepsilon_{Lt}, \quad (22)$$

$$-\varepsilon_{Tc} < \varepsilon_{22} < \varepsilon_{Tt}, \quad (22.1)$$

$$-\gamma_{LTs} < \gamma_{12} < \gamma_{LTs}. \quad (22.2)$$

X-akselin suuntaisesti vetokuormitetussa komposiittisauvassa ilmenevät venymät määritellään kaikissa pääsuunnissa kaavoin 23–25 (Mallick 2007, 474).

$$\varepsilon_{11} = S_{11}\sigma_{11} + S_{12}\sigma_{22} = (S_{11}\cos^2\theta + S_{12}\sin^2\theta)\sigma_{xx}, \quad (23)$$

$$\varepsilon_{22} = S_{12}\sigma_{11} + S_{22}\sigma_{22} = (S_{12}\cos^2\theta + S_{22}\sin^2\theta)\sigma_{xx}, \quad (24)$$

$$\gamma_{12} = -S_{66}\tau_{22} = -S_{66}\sin\theta\cos\theta\sigma_{xx}. \quad (25)$$

Kaavoista 23–25 voidaan todeta, että suurimman venymän teoria on hyvin samantapainen suurimman jännityksen teoriaan verrattuna.

5 Numeerinen virtausdynamiikka

5.1 Ratkaisuperiaate

Numeerisen virtausdynamiikan ratkaisuperiaatteet voidaan jakaa kahteen päämenetelmään: Finite Difference Methodiin (FDM) ja Finite Volume Methodiin (FVM). Edellä mainituista periaatteista tilavuus- eli FVM-menetelmän käyttö on osoittautunut kaikkein suosituimmaksi, koska se mahdollistaa vallitsevien perusyhtälöiden käsittelyn divergenssimuodossa, jolloin säilyvyydestä (esim. massan, liikemäärän tai energian) muodostuu menetelmälle luontainen ominaisuus. (Mazumder 2016, 31–32.)

Ratkaisuperiaate virtausdynamiikan simulaatioissa on samantapainen. Olipa kyseessä sitten FDM- tai FVM-menetelmä, selkeitä eroja on nähtävissä edellä mainittujen diskretisointimenetelmien välillä, mutta tämä opinnäytetyö keskittyy tilavuusmenetelmän käsittelyyn. Pähkinänkuoressa ratkaisuperiaate virtausanalyysien ratkaisuun etenee Versteegin ja Malalasekeran (2007, 17) mukaan seuraavasti:

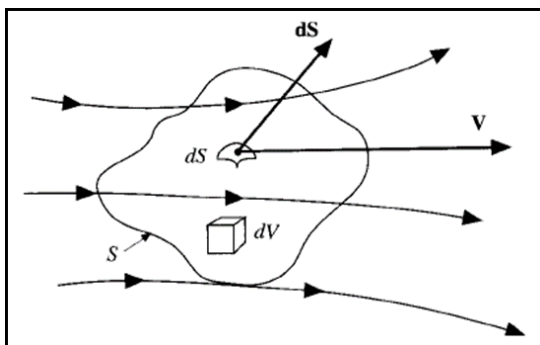
1. Vallitsevat perusyhtälöt integroidaan äärellisen virtausalueen rajojen välillä huomioiden relevanttien ominaisuuksien säilyvyys eksaktisti kunkin virtausalueen sisällä olevan solun kohdalla.
2. Virtausalue diskretisoidaan, eli jaetaan äärellisen pieniksi alueiksi, ja vallitsevat perusyhtälöt muutetaan algebrallisiksi yhtälöryhmiksi jokaisen muodostetun alueen osalta.
3. Yhtälöryhmät ratkaistaan iteroiden, jolloin tuloksena saadaan määritellyt arvot solujen keskustasta ja interpolointifunktion avulla solujen välistä sekä solmupisteistä.

5.1.1 Vallitsevat perusyhtälöt

Fluidin virtausta virtausanalyysissä kuvaillaan Navierin–Stokesin yhtälöillä, jotka esittävät miten lämpötila, paine ja tiheys ovat riippuvaisia toisistaan liikkuvassa väliaineessa. Keskeisimpiin käsitteisiin kuuluvat oletukset siitä, ettei fluidin massa muutu sen liikuessa. Toiseksi liikemäärän muutos on yhdensuuruinen fluidipartikkeliin kohdistuneiden voimien summaan Newtonin toisen lain mukaisesti. Kolmantena oletuksena pätee termodynamiikan ensimmäinen laki, minkä mukaan fluidipartikkeliin lisätty lämpöenergia ja tehty työ ovat yhdensuuruksia koko systeemin energian muutokseen. (Versteeg & Malalasekera 2007, 23.)

Massan säilyvyys

Perusyhtälöistä massan säilyvyyttä voidaan käsitellä systeemiin menevän ja siitä lähtevän massan taseena. Näin ollen systeemin läpi virtaava massa pysyy muuttumattomana, eikä sitä kerry kuvan 13 mukaiselle virtausalueelle fluidin virratessa sen läpi. Kuvassa 13 nähdään äärellisen pienten fluidipartikkelien virtaus paikalleen kiinnitetyn pinnan ohi rajoitetun virtausalueen sisällä. (Anderson 1995, 71.)



Kuva 13. Fluidipartikkelien liike pinnan ohi (Anderson 1995, 72)

Kun tarkastellaan kuvan 13 mukaista pintaa sekä pinnalta satunnaisesti valittua pinta-alan elementtiä dS , voidaan fluidin nopeutta tarkasteltavan pisteen ohi merkitä kirjaimella V . Tällöin virtausalueen läpi menevä massavirta pinnan s ohi on yhdensuuruinen virtausalueen dV sisällä vähenevän massan muutokseen aikayksikköä kohti. (Anderson 1995, 72–73.)

Massan säilyvyys voidaan esittää siten kaavan 26 mukaisesti

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (26)$$

missä

∇ = nabla

ρ = fluidin tiheys

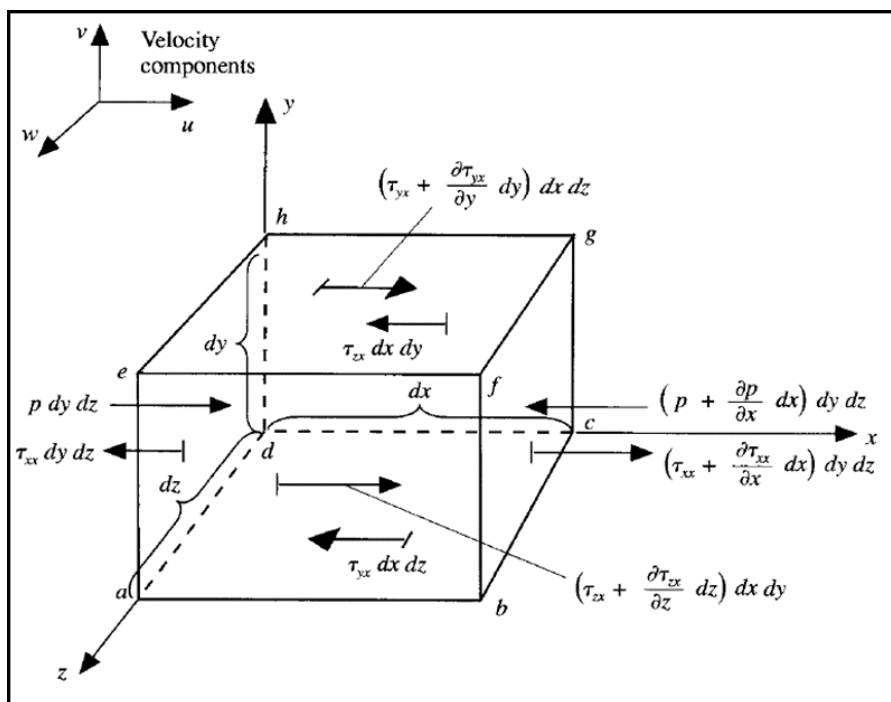
u, v, w = virtauskentän nopeuskomponentit suunnissa x, y ja z

V = virtausnopeuden vektorikenttä.

Kaavassa 26 esitetyn yhtälön vasemmalla puolella oleva osittaisderivaatta kuvastaa tarkasteltavaan virtausalueeseen kertyvän massan määrää. Yhtälön divergenssikomponentti puolestaan kuvaa systeemiin tulevan ja siitä lähtevän massan erotusta.

Liikemäärän säilyvyys

Säilyvyyden yhtälöistä saadaan liikemäärä soveltamalla Newtonin toista lakia liikkeessä olevaan kuvan 13 mukaiseen fluidin tilavuuselementtiin. Tilavuuselementtiin kohdistuva nettovoima on siis lähemmin tarkasteltuna elementin massan ja x-suuntaisen kiihtyvyyden tulo (kuva 14). Nettovoiman ollessa vektorisuure on elementtiin kohdistuvat voimat mahdollista jakaa kunkin akselin suuntaisiin komponentteihin. (Anderson 1995, 78.)



Kuva 14. Äärellisen pieni fluidielementti (Anderson 1995, 79)

Tarkasteltaessa kuvan 14 mukaista elementtiä huomataan x-suuntaisen nettovoiman koostuvan kahdentyyppisistä voimista. Yhtälön vasen puoli muodostuu koko kappaleeseen kohdistuvista voimista. Näihin lukeutuvat painovoima sekä elementin pintaan kohdistuvat voimat, kuten pinnan painejakaumasta aiheutuva voima ja pintaan kohdistuvat normaali- ja leikkausjännitysten vaikutukset. Yhtälön oikea puoli koostuu puolestaan fluidielementin massan ja sen liikkeen muutoksesta aikaan nähden eli kiihtyvyyden ja massan tulosta. Tällöin liikemäärän säilyvyyttä voidaan esittää kaavoin 27–27.2. (Anderson 1995, 79.)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (27)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (27.1)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (27.2)$$

missä

27 = liikemäärän säilyvyyden x-komponentti

27.1 = liikemäärän säilyvyyden y-komponentti

27.2 = liikemäärän säilyvyyden z-komponentti

p = paine

τ_{ij} = normaali- ja leikkausjännitysten komponentit fluidissa

f_i = fluidielementtiin kohdistuva kappaleen voima massayksikköä kohti.

Kaavojen 27–27.2 mukaisista yhtälöistä on huomattavissa, että ne ovat säilyvyysmuodossa eivätkä ei-konservatiivisessa muodossa. Erona ei-konservatiiviseen muotoon on yhtälön vasen puoli, mikä materiaaliderivaatan määritelmän avulla muuttuu skalaarin eli tiheyden ja vektorin tulon divergenssiksi. (Anderson 1995, 82–83.)

5.1.2 Diskretisointi

Numeeristen suureiden, kuten pintaan vaikuttavan paineen tai siitä ohi virtaavan väliaineen, virtausnopeuden laskentaa varten on virtausalue jaettava riittävän pieniksi osiksi. Sayma (2009, 34) esittää, että äärellisen pieniksi osiksi jaettua virtausaluetta voidaan kuvata tarkastelupisteinä. Yhdistämällä edellä mainitut tarkastelupisteet toisiinsa on mahdollista muodostaa niiden avulla funktio, josta halutut suureet määritellään.

Numeerisen virtausdynamiikan diskretisointimenetelmistä mainittakoon FVM, jota voidaan ajatella painotettujen jäännösten erikoistapauksena. Painotusfunktio saa silloin kaavassa 28 esitetyn muodon. (Sayma 2009, 41.)

$$W^i = 1 \tag{28}$$

missä

W = painotusfunktio.

Jaetun virtausalueen soluista muodostetaan kaavaa 28 käyttäen yhtälöt, joissa painotusfunktio saa arvoksi 0 kaikkialla muualla paitsi tarkasteltavalla alueella. Tästä seuraa, että jokaisen jaetun tilavuuselementin jäännöksen on lähestyttävä arvoa nolla ja saavutettava se. (Sayma 2009, 41.)

FVM-menetelmässä tilavuuselementtien rajapintojen väliset vuot lasketaan yhteen globaalin säilyvyyden määrittelemiseksi, josta seuraa algebrallinen yhtälöryhmä. Algebrallista yhtälöryhmää käytetään säilyvyyden yksinkertaistuksen vuoksi ja ongelman ratkaisun

nopeuttamiseksi haluttujen suureiden (esim. paineen tai nopeuden) selvittämiseksi solujen keskustoissa. (Sayma 2009, 42).

5.1.3 Yhtälöryhmän ratkaisu

Diskretisoitu virtausalue johtaa kaikissa tapauksissa yhtälöryhmän muodostukseen, jotta halutut suureet voidaan ratkaista elementtisolujen keski- tai solmupisteistä. Sayman (2009, 103) mukaan virtausalueen osista muodostettu yhtälöryhmä voi olla joko lineaarinen tai epälineaarinen riippuen tarkasteltavasta ongelmasta.

Sayma (2009, 105) toteaa, että väliaineen virtausta tutkittaessa yhtälöryhmän invertointi onnistuu esimerkiksi Newtonin menetelmää käyttäen. Newtonin menetelmässä yhtälöryhmä ratkeaa iteroimalla, jolloin alkupisteenä toimii olettamus tai arvaus ratkaisusta $\{x\}$. Tällöin yhtälöryhmä voidaan esittää kaavalla 29.

$$\{R\} = [A(x)]\{x\} - \{B\} \quad (29)$$

missä

A = järjestelmämatriisi

B = rajaehdot sisältävä vektori

R = jäännös, riippuen yhtälöryhmän vastaukseksi asetetun alkuarvon tarkkuudesta

x = alkuarvo järjestelmän vastaukseksi.

Newtonin menetelmä perustuu kaavaan 29 ja se voidaan esittää kaavan 30 mukaisesti (Sayma 2009, 105).

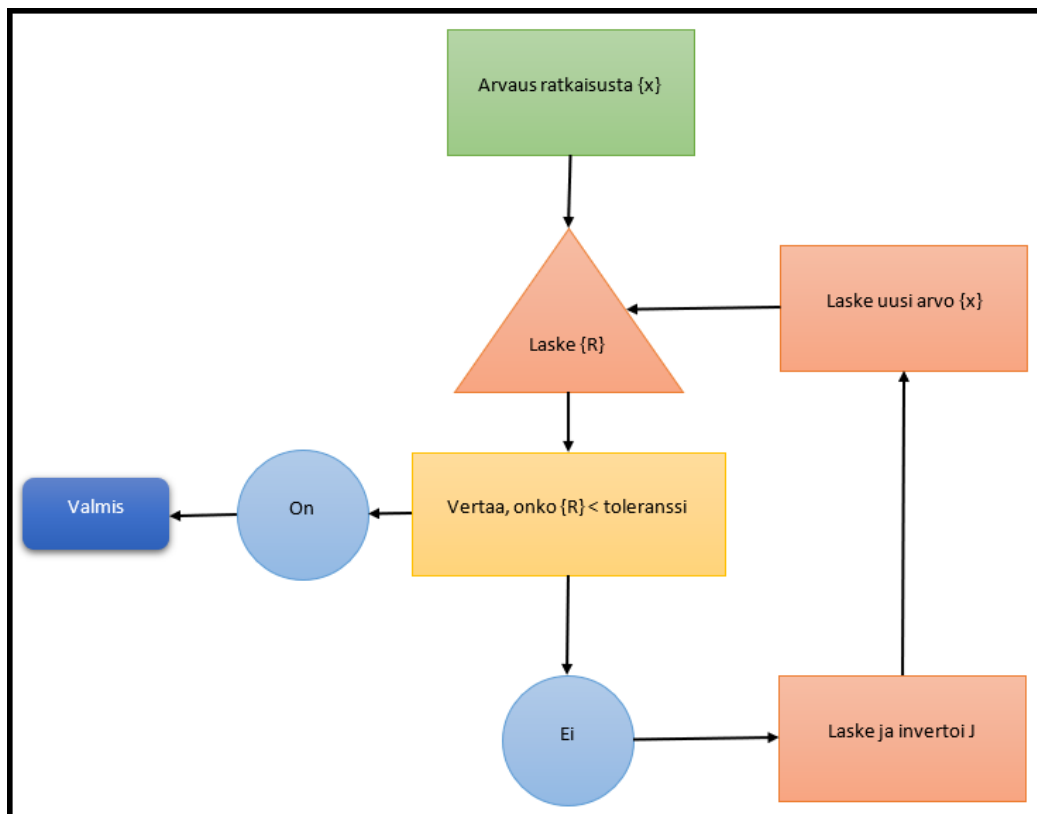
$$\{x^{n+1}\} = \{x^n\} - [J^n]^{-1}\{R^n\} \quad (30)$$

missä

J = Jacobin matriisi

n = nykyinen iteraatio.

Kuvassa 15 nähdään vuokaaviona, miten kaavan 30 perusteella muodostettu lineaarinen yhtälöryhmä ratkaistaan Newtonin menetelmällä (Sayma 2009, 106).

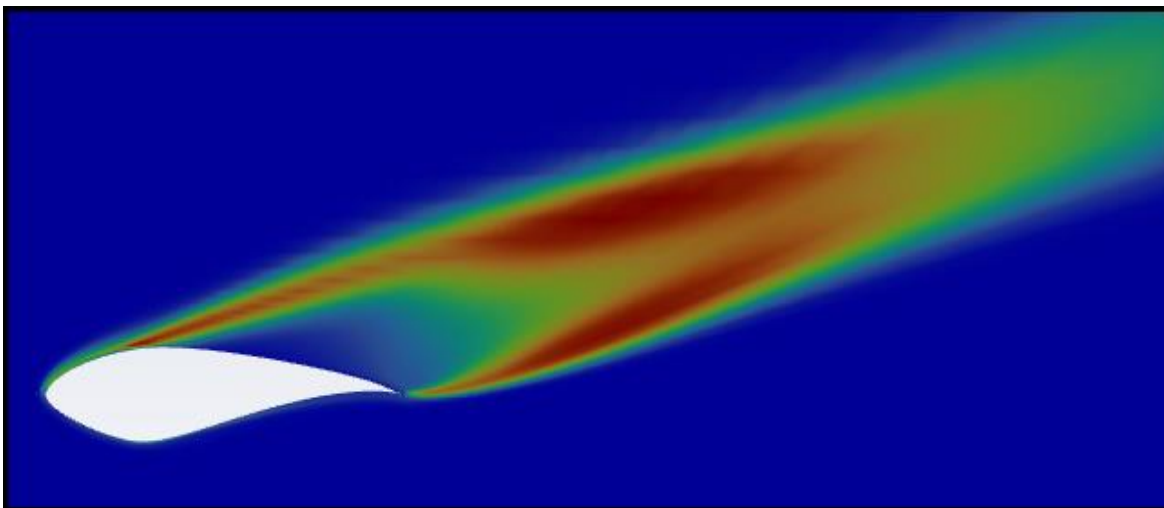


Kuva 15. Newtonin menetelmä (mukaillen Sayma 2009, 106)

Kuvassa 15 esitetty vuokaavio kuvastaa Newtonin menetelmän ratkaisuperiaatetta, jossa ensimmäiseksi on asetettava olettaus ratkaisusta iteratiivisen prosessin käynnistämiseksi. Alkuarvon perusteella lasketaan ensimmäinen jäännös, jonka arvoa verrataan valittuun toleranssiin ja todetaan alittaako haluttu suure vertailuarvon vai ei. Suureen alittaessa vertailuarvon iteratiivinen prosessi lopetetaan, sillä se tarkoittaa sitä, että riittävä tarkkuus on saavutettu. Muussa tapauksessa Jacobin matriisi arvioidaan uudelleen ja invertoidaan, minkä tuloksena saadaan uusi arvo x :lle, josta iterointi jatkuu, kunnes haluttu toleranssi on alitettu ja vastaukseen on päästy.

5.2 Turbulenssi

Käytännön virtausongelmissa on virtauksen todettu muuttuvan epävakaaksi tapauksissa, joissa kriittinen Reynoldsin raja ylittyy. Kriittisen luvun alapuolella virtaus käyttäytyy laminaarisesti. Versteegin ja Malalasakeran (2007, 54) mukaan laminaarisen virtauksen käyttäytymistä voidaan tarkastella numeerisesti kaavojen 26–27.2 avulla. Kriittisen Reynoldsin luvun yläpuolella virtaus kuitenkin muuttuu turbulenttiseksi, jolloin virtauksen nopeus ja valitseva paine muuttuvat jatkuvasti ajan suhteen kuvan 16 mukaisesti.



Kuva 16. Turbulenssin kineettinen energia, kohtauskulma 20 astetta

Kuvassa 16 nähdään, miten siipiprofiilin ohi virtaava väliaine käyttäytyy. Kuvasta huomataan, että siipiprofiilin etureunalla virtaus pysyy laminaarisena ja jättöreunaa lähestyessä se muuttuu turbulentsiksi ja irtoaa profiilin pinnasta. Turbulenssin huomiointi virtausongelmissa tuo näin ollen uusia muuttujia, jotka on huomioitava vallitsevissa perusyhtälöissä (Versteeg & Malalasekera 2007, 55).

RANS

Turbulenttisen virtauskentän mallinnusta varten aikaisemmin esitellyt Navierin–Stokesin yhtälöt on aikakeskiarvotettava. Kaavoilla 26–27.2 esitettyjen yhtälöiden aikakeskiarvotus tapahtuu Reynoldsin hajoamisperiaatteen avulla kaavan 31 mukaan. (Chung 2002, 691–692.)

$$\overline{f'g'} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} f'g' dt \neq 0 \quad (31)$$

missä

f, g = muuttuja

t = aika.

Kaavalla 31 esitetty yhtälö esittää Chungin (2002, 692–693) mukaan sitä, että kahden eri muuttujan vaihteluosan tulo on aikakeskiarvotettu olettaen, että muuttuja f on sen keskiarvon ja muuttuvan f'-komponentin summa. Tällöin massan ja liikemäärän säilyvyys voidaan esittää aikakeskiarvotettuina kaavan 32 periaatetta käyttäen, mikä sovellettuna Navierin–Stokesin yhtälöihin johtaa kaavoin 33–34.2 esitettyihin yhtälöihin.

$$u = \bar{u} + u' \quad (32)$$

Massan säilyvyys:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{U}) = 0 \quad (33)$$

Liikemäärän säilyvyys:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{U}\tilde{V}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x} + \mu\nabla^2\tilde{U} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (34)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{V}\tilde{V}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial y} + \mu\nabla^2\tilde{V} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \quad (34.1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{W})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{W}\tilde{V}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial z} + \mu\nabla^2\tilde{W} + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \quad (34.2)$$

missä

μ = fluidin viskositeetti

∇^2 = Laplace operaattori

\sim = Favre (tiheys) -keskiarvotettu muuttuja

$-$ = aikakeskiarvotettu muuttuja

S_{Mi} = lähde-termi kappaleeseen kohdistuvien voimien määrittämiseksi.

Kaavoista 33–34.2 huomataan, että Reynoldsin hajoamisperiaate tuo Navierin–Stokesin yhtälöihin lisäkomponentteja liikemäärän säilyvyyteen. Hajoamisperiaatteen tuomat lisäkomponentit hakasulkujen sisällä koostuvat Reynoldsin jännityksistä. (Chung 2002, 694.) Verksteegin ja Malalasekeran (2007, 78) mukaan Reynoldsin jännitykset tai toiselta nimeltään turbulentsit jännitykset koostuvat kolmesta normaali- ja kolmesta leikkausjännityskomponentista, missä normaalijännitys kuvailee varianssia kunkin nopeuskomponentin vaihtelussa. Leikkausjännityksen komponentit puolestaan kuvastavat turbulentsien vaihteluiden tuottamaa voimaa.

Reynoldsin jännityskomponenttien tuntemattomat tekijät on kuitenkin ratkaistava numeerisesti, ja siitä syystä vallitsevia perusyhtälöitä on tuettava ylimääräisillä yhtälöillä, jotta tarvittavia yhtälöitä olisi vastaava määrä tuntemattomiin tekijöihin nähden (Chung 2002, 694).

Sulkeumahypoteesi ja SST k- ω

Aikakeskiarvotetuista Navierin–Stokesin yhtälöistä jäänyt niin kutsuttu sulkeutumisongelma korjataan turbulenssimallin avulla. Yhtälöiden aikakeskiarvotuksesta aiheutuva

sulkeutumisongelma on seuraamus Reynoldsin jännityskomponenteista, joiden määrittely analyttisesti johtaa yhä suurempaan määrään ratkaistavia tuntemattomia tekijöitä ja edellyttää erillisen sulkeumahypoteesin, koska turbulenssin vaikutukset keskiarvotetussa virtauksessa on selvitettävä (Nieuwstadt ym. 2016, 170–171).

Launder ja Sandham (2002, 18–19) toteavat, että kahden yhtälön Boussinesq-aproksimaatioon perustuvissa sulkeumahypoteeseissa määritellään siirto- eli jatkuvuusyhtälöt, joilla kuvataan turbulentsin nopeuden ja turbulenssissa ilmenevien pyörre- ja vastavirtausten sisältämän energian suuruutta ja siirtymistä avaruudessa. Jatkuvuusyhtälöt Reynoldsin jännityskomponenttien aiheuttaman sulkeutumisongelman täyttämiseksi muodostetaan esimerkiksi turbulenssin kineettistä energiaa k ja sen dissipaatiota ω varten.

Edellä mainituista yhtälöistä turbulenssin kineettinen energia määritellään suoraan Reynoldsin jännityskomponenteista. Kineettisen energian tasapaino edellyttää viittä komponenttia, joihin lukeutuu konvektiosta tai advektiosta ja ajasta riippuva liike-energian muutos massayksikköä kohti, liike-energian siirto sekä turbulenssin kineettisen energia tuotto ja sen dissipaatio. Termien yhteyttä turbulenssin kineettiseen energiaan voidaan kuvailla Reynoldsin jännitysten vaikuttaessa keskimääräisnopeuden gradienttia vastaan. (CFD Online 2013.)

Toissijaisen yhtälön, kuten ω :n, määrittelyyn sulkeutumisongelmassa on Bredbergin (2001) mukaan kaksi vaihtoehtoa. Vaihtoehtoista ensimmäisessä ω johdetaan puoliempiirisesi hyödyntämällä ϵ :tä, eli turbulenssin kineettisen energian hajoamisen määritelmää, koska toissijaisista yhtälöistä ϵ on ainoa, jonka komponenttien määrittelyminen eksaktisti on mahdollista. Toisena vaihtoehtona on ω , eli turbulenssin kineettisen energian muutos lämpöenergiaksi, joka on mahdollista määrittellä ensisijaisen yhtälön k avulla dimensionaalisesti kartoittamalla ω -yhtälö ylimääräisten vakioiden ja vaimennusfunktion kanssa.

Cable (2009) toteaa, että vaihtoehtoja sulkeutumisongelman ratkaisemiseksi on monia, mutta numeerisen virtausdynamiikan ongelmissa Shear Stress Transport (SST) k - ω -turbulenssimalli soveltuu siihen erinomaisesti. SST k - ω -turbulenssimalli on k - ω -mallin erikoistapaus, ja se koostuu kahdesta yhtälöstä: turbulenssin kineettisestä energiasta k ja kineettisen energian muutoksesta lämpöenergiaksi eli dissipaatiosta ω . SST k - ω -mallissa yhdistyvät k - ϵ - ja k - ω -mallien parhaimmat puolet tehden siitä erinomaisen vaihtoehdon sulkeutumisongelman korjaamiseksi. SST-malli eroaa perinteisestä k - ω -menetelmästä tavalla, jolla turbulentsin viskositeetti on laskettu turbulentsin pääleikkausjännitysten siirtoa varten. Toisena erona SST-mallissa on seinäalueiden tarkempi käsittely ja vapaassa virtauksessa k - ϵ -mallin hyödyntäminen tulosten luotettavuuden parantamiseksi.

6 Elementtimenetelmät

6.1 Historia

Koutromanosin (2018, 6–7) mukaan elementtimenetelmien historia ulottuu noin 70 vuoden taakse 1950-luvulle. Menetelmää kehitettiin alussa ilmailu- ja avaruustekniikan alalla pääasiallisesti Jon Turnerin, John Argyrisin ja Ray Cloughin ohjaamana Yhdysvalloissa ja Euroopassa. Tarve tietokoneavusteiselle analyysille ja lujuustarkastelulle syntyi, kun piti suunnitella uudentyypinen lentokone, jonka siivissä haluttiin hyödyntää nuolikulman tuomia hyötyjä. Analyttiset menetelmät edellä mainitun yksityiskohdan tarkasteluun eivät kuitenkaan tuottaneet riittävän tarkkoja arvioita osan kestävydestä, jolloin tarve uudentyyppiselle analysointityökalulle syntyi.

Ensimmäisessä versiossa siiven pintaa mukailtiin kolmikulmaisilla elementeillä, joissa jännityksiä käsiteltiin vakioina. Jännitysten pitäminen vakioina mahdollisti sen, että kolmikulmaisten elementtien sivut pysyivät suorina siiven taipuessa, millä estettiin vierekkäisten elementtien väliin muodostuvien aukkojen syntymistä. Tätä ominaisuutta kuvataan matemaattisesti siirtymäkentän jatkuvuudella elementtien sisäisillä rajapinnoilla, mikä oli perusedellytys jäänteiden eli tavoiteltujen suureiden konvergenssiin. (Koutromanos 2018, 6–7.)

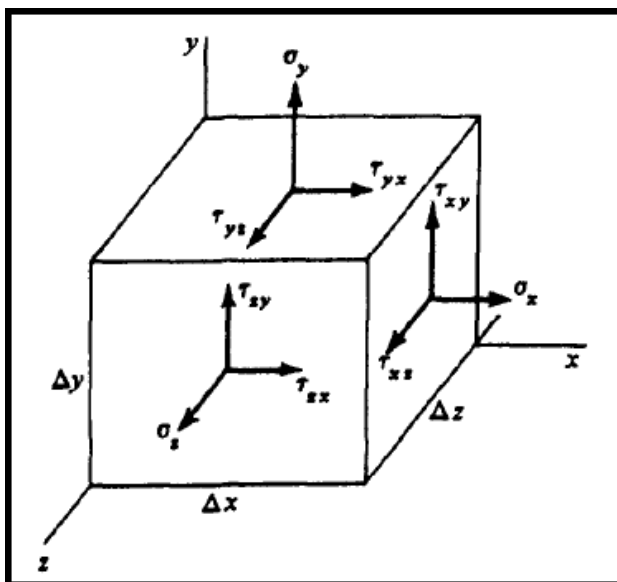
Jälkikäteen Clough havaitsi, että rakenteesta muodostetut matriisit on mahdollista koota yksittäisten osien summana superpositioperiaatteella, jolloin direct stiffness -menetelmää ryhdyttiin kutsumaan elementtimenetelmäksi tai nimellä Finite Element Method (FEM). Elementtimenetelmien kehitys jatkui 1960-luvulla Cloughin ja Ed Wilsonin toimesta johtaen ensimmäiseen elementtimenetelmiä hyödyntävään laskentaohjelmaan jännitysten analysointia varten. Alkuvaiheessa työkalun käyttöä vaikeutti saatavilla oleva laskentateho, mutta tietotekniikan nopea kehitys on mahdollistanut yhä suurempien ja monimutkaisempien geometrioiden analysoinnin nykypäivään tultaessa. (Koutromanos 2018, 7.)

6.2 Kiinteiden kappaleiden mekaniikka

Kiinteän aineen mekaniikassa siirtymien määrittelystä muodostuu keskeisin tehtävä. Olettamuksina kiinteän aineen käyttäytymiselle ovat kappaleessa tapahtuvien siirtymien ja venymien magnitudi, eli siirtymät ja venymät ovat pienempiä kuin kappale, johon kuormitukset kohdistuvat. Toisena oletuksena on staattinen kuormitus, mikä tarkoittaa sitä, että vaikuttava voima muuttuu siten, ettei inertialla ole vaikutusta. Kolmanneksi oletetaan, että kiinteästä aineesta koostuva kappale käyttäytyy lineaarisesti eli kuormituksen poistuessa poistuu myös siirtymä ja kappale palaa alkuperäiseen asentoonsa. (Koutromanos 2018, 189.)

Jännitys ja venymä

Kappaleeseen vaikuttavat voimat voidaan jakaa ulkoiisiin kappaleen pinnalle vaikuttaviin voimiin sekä kappaleen sisäisiin voimiin. Kiinteän aineen mekaniikassa kohdistuvalla voimalla on aina aiheuttaja, ja Newtonin kolmannen lain mukaisesti vaikuttava voima ja sen vastavoima muodostavat tasapainotilan. (Malvern 1969, 75.) Häviävän pieneen kappaleeseen kohdistuvat jännitykset nähdään kuvasta 17.



Kuva 17. Jännityskomponentit (Malvern 1969, 91)

Koutromanosin (2018, 189) mukaan kuvassa 17 esitetyn kiinteän kappaleen käyttäytymistä kuvaillaan toisen kertaluvun jännitys- ja venymätensoreiden avulla. Venymätensorin avulla määritellään kappaleessa ilmeneviä siirtymiä ja niiden suuruuksia. Kolmiulotteisella kappaleella tämä voidaan esittää matriisina kaavan 35 mukaisesti.

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (35)$$

missä

ε_{ij} = venymä eli kappaleessa esiintyvä suhteellinen muodonmuutos.

Lisäksi olkoon $x_1 = x$, $x_2 = y$ ja $x_3 = z$, jolloin jokaiselle venymätensorin komponentille saadaan yleispätevä määritelmä, jota esitetään kaavalla 36 (Koutromanos 2018, 190).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (36)$$

Jännitystensorin merkitys kiinteän aineen mekaniikassa on toimia kappaleeseen vaikuttavan voiman mittarina, jossa vaikuttava voima on seuraus aiheutuneista siirtymistä.

Venymän tavoin myös jännitystensoria voidaan kolmiulotteisissa tapauksissa kuvata 3x3 matriisilla, joka koostuu yhdeksästä tekijästä kaavan 37 mukaisesti (Koutromanos 2018, 191).

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (37)$$

missä

σ_{ij} = jännityskomponentti.

Jännitysten osalta kaavan 37 tekijöillä kuvataan kutakin pääsuuntaa vastaavaa jännityskomponenttia sekä kohtisuoraa pinta-alaa, johon jännitys vaikuttaa (Koutromanos 2018, 191).

Materiaalin luonteesta puolestaan kertoo jännitysten ja venymien välinen konstitutiivinen malli kaavan 38 mukaisesti (Koutromanos 2018, 194).

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (38)$$

missä

D = kimmomatriisi.

Kaavan 38 mukaan jännitysvektorilla on suhde venymää kuvastavaan vektoriin materiaalin kimmomatriisin kautta. Anisotrooppisilla (esim. komposiitti) materiaaleilla kimmomatriisi on symmetrinen (Koutromanos 2018, 194).

Ortotrooppisilla materiaaleilla (esim. kuitulujitteiset komposiitit) elastisten ominaisuuksien määrittäminen vaatii yhdeksän vakiota: E_{11} , E_{22} , E_{33} , G_{12} , G_{13} , G_{23} , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} . Vakioiden ominaisuudet ovat yhdensuuruksia toiseen ja kolmanteen pääsuuntaan tarkoittaen sitä, että $E_{22} = E_{23}$. Sama yhdenvertaisuus pätee myös kahdelle muullekin tekijälle, mistä seuraa että G_{23} voidaan esittää E- ja ν -tekijöiden avulla kaavan 39 mukaisella suhteella. (Mallick 2007, 171–172.)

$$G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1 + \nu_{23})} \quad (39)$$

missä

E_{11} , E_{22} ja E_{33} = kimmomoduulit

G_{12} , G_{13} ja G_{23} = liukumoduulit

ν_{12} , ν_{13} ja ν_{23} = Poissonin vakiot.

Hooken laki

Malvern (1969, 284) toteaa, että kuormitetussa kappaleessa materiaalin makroskooppinen käyttäytyminen on seurausta sen sisäisestä rakenteesta. Rakenteiden suunnittelussa ja jännitysanalyysissä oletukset käytetyistä materiaaleista ovat ideaalisesti elastisia siten, että ne noudattavat Hooken lakia. Hooken laki esittää materiaalin kimmokerrointa jännitysten ja venymien suhteen. Kolmessa ulottuvuudessa Hooken laki voidaan esittää matriisimuodossa kaavalla 40.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (40)$$

missä

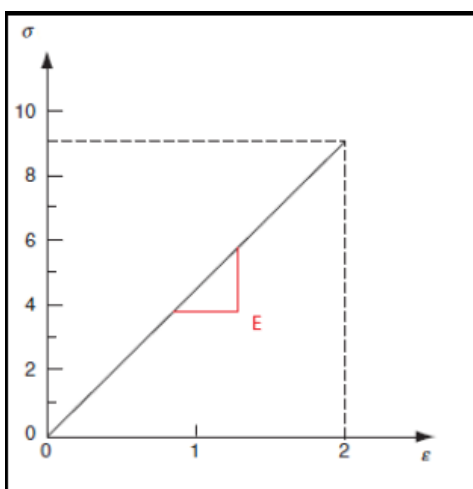
ε = venymä

ν = Poissonin vakio

σ = jännitys

E = kimmomoduli.

Kaavalla 40 esitetään jokaista jännityskomponenttia venymien lineaarisena yhdistelmänä. Yleisesti käytetyillä rakennemateriaaleilla Hooken lain yleinen muoto pätee kuvassa 18 esitettyssä idealisoidussa jännitys–venymäkäyrässä lähes täydellisesti. (Malvern 1969, 285.)



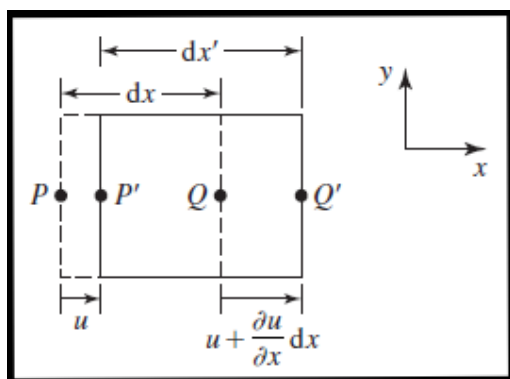
Kuva 18. Idealisoitu jännitys–venymäpiirros (mukaillen Mallick 2007, 237)

Kuvassa 18 esitetty jännitys–venymäpiirros esittää sitä aluetta, jossa materiaali käyttäytyy täysin kimmoisasti tarkoittaen sitä, että kuormitustilanteen poistuessa materiaali palaa alkuperäiseen tilaansa eikä pysyviä muodonmuutoksia ilmene.

Siirtymä–venymäsuhde

Todellisiin rakenteisiin kohdistuvia venymiä ei kyetä määrittelemään yhdellä komponentilla, eikä sitä voida ajatella yhdensuuntaisenakaan. Todellisuudessa venymät vaihtelevat rakenteen eri osissa, ja siten venymän tarkastelu vaatii kuusi komponenttia: kolme kappaletta normaalivenymille ja kolme kappaletta leikkausta varten. (Hutton 2004, 455.)

Kuvassa 19 esitetään vetojännityksessä olevan elementin muodonmuutosta. Huttonin (2004, 455) mukaan x-akselin suuntaisesti vedetyssä elementissä tapahtuvaa pisteen P siirtymää kuvataan kirjaimella u , kun taas pisteen Q siirtymää kuvaa kaava 41.



Kuva 19. Normaalijännitys (Hutton 2004, 456)

$$Q = u + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) dx \quad (41)$$

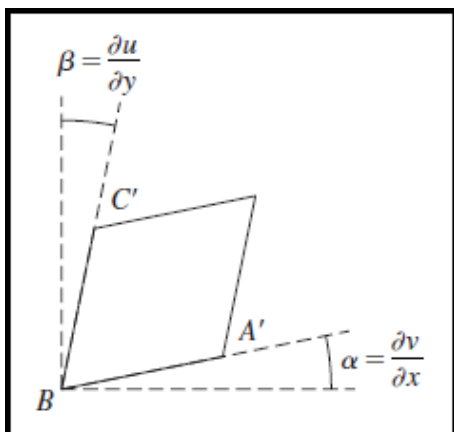
Tällöin kuvan 19 mukaisessa elementissä vallitseva normaalijännityksestä aiheutuva siirtymä suuntaan x noudattaa kaavassa 42 esitettyä Taylorin sarjakehitelmää (Hutton 2004, 455).

$$dx' = dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad (42)$$

Tästä seuraa, että akselin normaalivenymä suuntaan x voidaan esittää kaavalla 43 (Hutton 2004, 456).

$$\varepsilon_x = \frac{dx' - dx}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (43)$$

Vastaavasti leikkauksessa ilmeneviä siirtymiä ja siten myös venymiä voidaan tarkastella kuvan 20 avulla (Hutton 2004, 456).



Kuva 20. Leikkausjännitys (Hutton 2004, 456)

Leikkausjännityksen vaikutus venymään nähdään kuvasta 20, jossa elementtiin vaikuttavan voiman seurauksena alkuperäinen suora kulma muuttuu kahteen suuntaan. Leikkausjännityksen aiheuttamaa venymää voidaan täten esittää kaavalla 44. Kaavan alaindeksi viittaa tasoon, jossa kulman muutosta esiintyy. (Hutton 2004, 457.)

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (44)$$

missä

γ_{ij} = leikkauksesta aiheutunut venymä.

Yhteenvedona voidaan esittää, että jännitys ja venymä, Hooken laki, sekä kaavoilla 43 ja 44 esitetyt siirtymä-venymäsuhde tarjoavat riittävän määrän yhtälöitä tuntemattomien tekijöiden ratkaisemiseksi numeerisesti kiinteiden kappaleiden mekaniikassa.

7 Lavan mallinnus

7.1 Siipiprofiilit

Yksi suurimmista ongelmista tuulitekniikassa on tuuliturbiinin lapojen suunnittelu. Lavan geometrian merkitys tuulesta saatavalle teholle on erittäin suuri. Tutkimukset tuuliturbiineihin soveltuvista siipiprofiileista ovat osoittaneet, etteivät esimerkiksi lentokoneiden siipiin soveltuvat profiilit toimikaan tuuliturbiinin lavoissa erilaisten käyttöolosuhteiden ja lapojen sakkasominaisuuksien takia.

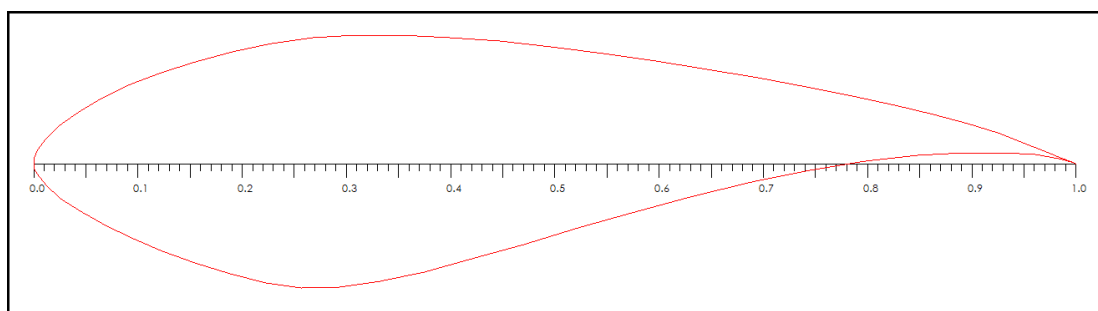
Tyypillisesti tuuliturbiinin lavat koostuvat kolmesta kuvitteellisesta pääosasta: juuren alueesta sekä keski- ja kärkialueesta. Kullakin osalla on lavan toiminnan kannalta merkityksellinen rooli ja vaikutus lavan tuottamaan energiaan.

Lavan suunnittelussa huomioitavista asioista tärkeimmäksi osoittautuu lavan hyötysuhteen maksimointi, mikä edellyttää mahdollisimman suurta nostovoiman kerrointa ja matalaa kitakerrointa. Lavan nostovoimakertoimella on suora yhteys lavan aerodynaamiseen hyötysuhteeseen ja siten myös lavan tuottamaan hyötytehoon. (Mamadanimov 2013.)

Tätä opinnäytetyötä varten mallinnettu tuuliturbiinin lapa muodostui kolmesta eri siipiprofiilista. National Renewable Energy Laboratory (NREL 2012) esittää keskikokoisen tuuliturbiinin eli kokoluokaltaan noin 25 metriä pitkän lavan siipiprofiileiksi S818 lavan juureen, S830 lavan keskialueelle ja S831 lavan kärkeen.

S818

Laparakenteisiin kohdistuvista rakenteista tyvi on alue, johon suurimmat jännitykset kohdistuvat. Tällöin lavan tyvessä käytettävän siipiprofiilin paksuus suhteessa jänteen pituuteen tulisi olla suurin muihin lavassa käytettyihin profiileihin verrattuna. Kuvassa 21 nähdään liitteessä 1 esitettyjen suunnittelukoordinaattien perusteella mallinnettu tyviprofiili lapaan, jossa profiilin paksuus on 24 prosenttia jänteen pituudesta.



Kuva 21. S818 siipiprofiili (mukaillen Airfoil Tools a)

Kuvassa 21 esitetyn siipiprofiilin parempi kyky vastaanottaa siihen kohdistuvia rasituksia tuo mukanaan myös huonommat aerodynaamiset ominaisuudet, kuten selkeästi alhaisemman nosteen verrattuna muihin lavassa käytettyihin profiileihin. Tämän vuoksi optimoitavaksi tulee profiilin kohtauskulman asettaminen siten, että nostovoiman suhde indusoituun vastukseen maksimoidaan. Nostovoimakertoimen suhde vastuksen kertoimeen S818-siipiprofiilille nähdään taulukosta 1.

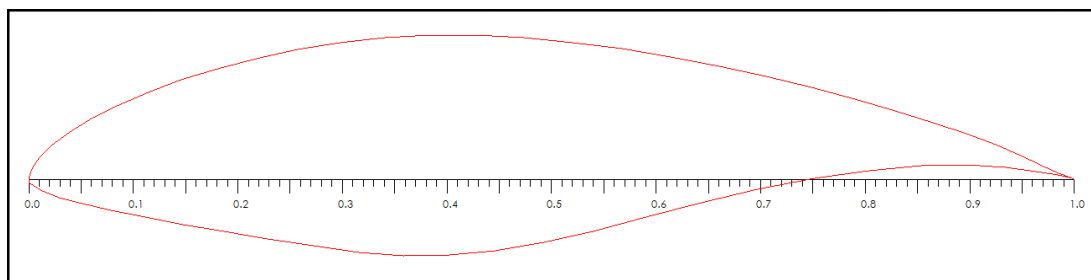
AoA [deg]	CD	CL	P [Pa]	CL/CD
0	0.01954	0.43293	-0.37941	22.153
2.5	0.02113	0.71174	-0.40581	33.691
5	0.02403	0.97397	-0.44985	40.525
7.5	0.02854	1.21141	-0.50624	42.452
10	0.03580	1.41677	-0.56795	39.575
12.5	0.04718	1.55777	-0.61941	33.021
15	0.06855	1.55828	-0.62168	22.733
17.5	0.11352	1.30804	-0.51295	11.522
20	0.15613	1.18960	-0.44197	7.619

Taulukko 1. S818 CL/CD

Taulukon 1 mukaan optimaalinen kohtauskulma olisi 7,5 astetta tuulen vapaaseen virtaukseen nähden, jolloin nostekertoimen suhde vastuskertoimeen on hieman yli 40. Tällöin tyviprofiilin ollessa 7,5 asteen kulmassa vapaaseen virtaukseen nähden toimii lapa mahdollisimman korkealla aerodynaamisella hyötysuhteella. Taulukosta 1 voidaan myös todeta, että nettopaine koko siipiprofiilissa saa maksimiarvonsa profiilin ollessa 12,5 asteen kulmassa. Tällöin siipi kehittäisi suuremman määrän energiaa, mutta huonommalla hyötysuhteella verrattuna 7,5 asteeseen.

S830

Siiven keskialueen profiilin vaikutukset roottorin aerodynaamisiin ominaisuuksiin ovat verraten matalat. Lavaan keskialueella käytetyn profiilin tulee sopia mahdollisimman hyvin juuressa käytetyn siipiprofiilin kanssa yhteen ottaen huomioon, että lavan jänne pienenee kärkeen päin mennessä. Kuvassa 22 on siiven keskialueelle valittu profiili, jonka suunnittelu-koordinaatit esitetään liitteessä 2.



Kuva 22. S830-siipiprofiili (mukaillen Airfoil Tools b)

Taulukosta 2 nähdään S830-siipiprofiilin polaarit eri kohtauskulmille.

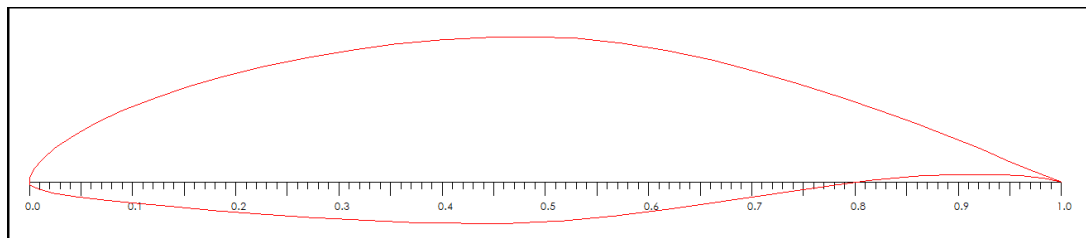
AoA [deg]	CD	CL	P [Pa]	CL/CD
0	0.01777	0.61762	0.34732	34.762
2.5	0.01997	0.88188	0.38143	44.171
5	0.02350	1.12434	0.43185	47.837
7.5	0.02867	1.33062	0.49034	46.418
10	0.03726	1.48391	0.54436	39.825
12.5	0.05117	1.56348	0.57856	30.553
15	0.07316	1.54913	0.57464	21.175
17.5	0.10424	1.47257	0.53697	14.126
20	0.14374	1.38077	0.48330	9.606

Taulukko 2. S830 CL/CD

Taulukosta 2 voidaan todeta, että indusoidulla vastuksella on yhteys kuvassa 22 esitetyn siipiprofiilin paksuuteen, mikä mahdollistaa suuremman hyötysuhteen pienemmällä kohtauskulmalla.

S831

Lavan kärjessä profiilin aerodynaamiset ominaisuudet ovat kriittisiä suuren pyörimisnopeuden takia. Suurilla lavoilla voi hyvinkin olla nopeutta 80–90 m/s lavan kärjestä mitattuna. Lavan kärjessä käytetty siipiprofiili ja sen suunnittelukoordinaatit nähdään kuvasta 23 ja liitteestä 3.



Kuva 23. S831-siipiprofiili (mukaillen Airfoil Tools c)

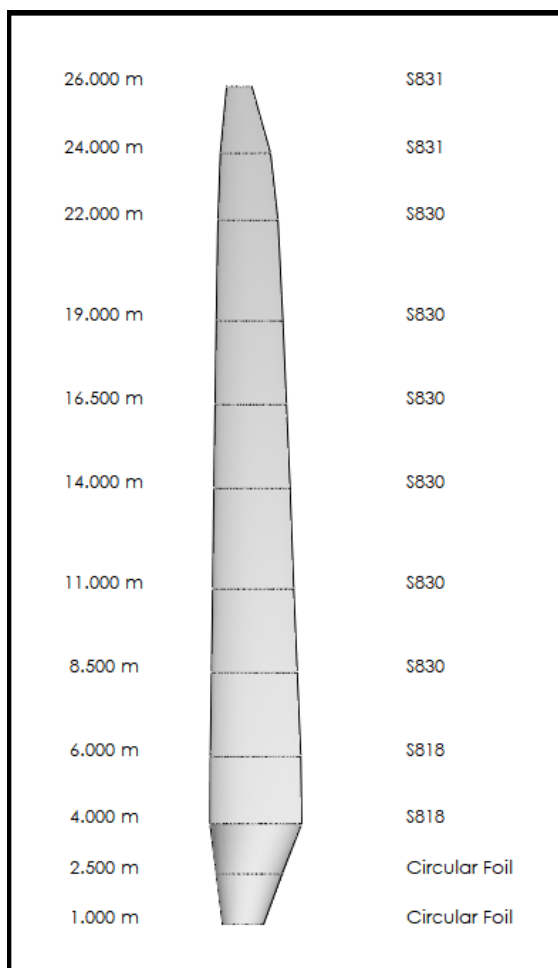
Ominaisuuksiltaan kuvan 23 mukainen S831-siipiprofiili soveltuu NREL:in mukaan erinomaisesti 40–50 metriä halkaisijaltaan olevaan tuuliturbiinin lavan kärkeen. Taulukosta 3 voidaan todeta, että S831 on aerodynaamisten ominaisuuksiensa puolesta tehokkain, koska sen paksuus on vain 18 prosenttia jänteen pituudesta, minkä seurauksesta indusoidun vastuksen kerroin on alhaisin ja nosteen suhde vastukseen edellä mainituista siipiprofiileista suurin.

AoA [deg]	CD	CL	P [Pa]	CL/CD
0	0.01638	0.64041	-0.32382	39.105
2.5	0.01869	0.89157	-0.35670	47.706
5	0.02249	1.11870	-0.40511	49.744
7.5	0.02809	1.30145	-0.45854	46.335
10	0.03749	1.41907	-0.50195	37.853
12.5	0.05134	1.48488	-0.53069	28.923
15	0.06928	1.52417	-0.54892	22.001
17.5	0.09244	1.54412	-0.55727	16.704
20	0.12624	1.50072	-0.53247	11.888

Taulukko 3. S831 CL/CD

7.2 Malli

Opinnäytetyön analyyseissä käytettävä lapa mallinnettiin SolidWorks-suunnitteluohjelmissä käyttäen. Tuuliturbiinin lavasta tehtiin solidi kappale CFD-analyysiä varten ja vastaava pintamalli FE-analyysiin. Analyysejä varten mallinnettu lapa nähdään kuvassa 24.



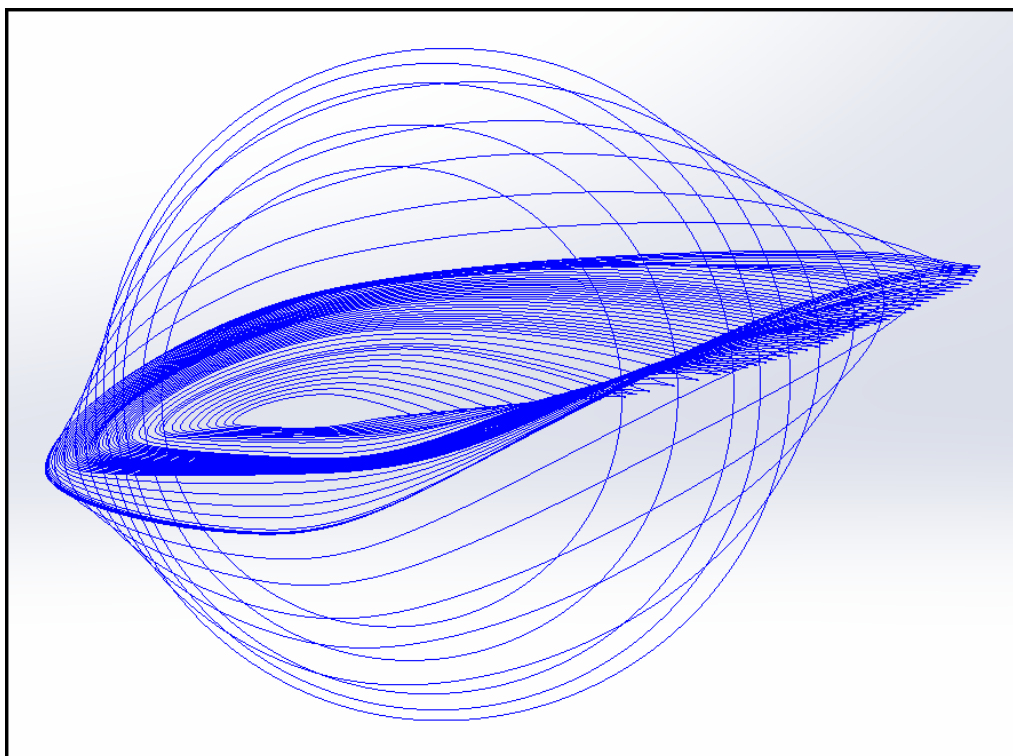
Kuva 24. Tuuliturbiinin lapa

Kuva 24 esittää mallinnetun lavan perusmitat sekä siipiprofiilien sijainnit. Lavalle on myös asetettu hieman aerodynaamista kiertoa, jonka suuruus ja positio näkyvät taulukossa 4.

Positio [m]	Jänteen pituus [m]	Kierto [θ]	Siipiprofiili
1.00	1.25	9.00	Circular
2.50	2.00	9.00	Circular
4.00	2.80	9.00	S818
6.00	2.75	9.00	S818
8.50	2.50	8.00	S830
11.00	2.40	7.75	S830
14.00	2.30	7.50	S830
16.50	2.20	7.25	S830
19.00	2.00	7.00	S830
22.00	2.85	7.00	S830
24.00	1.50	5.00	S831
26.00	0.75	5.00	S831

Taulukko 4. Lavan tiedot

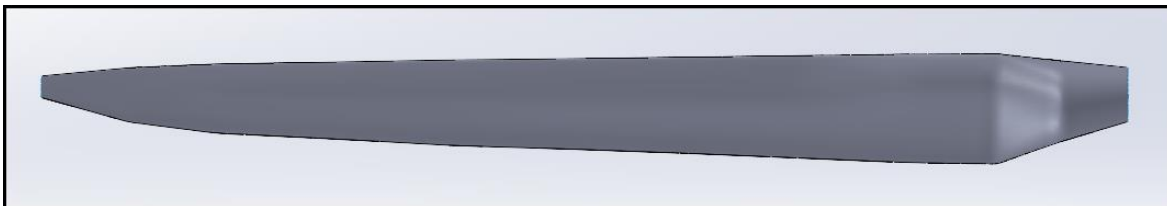
Lava mallinnettiin SolidWorks-suunnitteluohjelmassa kolmiulotteisina käyrinä, jotka antoivat lavalle sen kuvassa 25 näkyvät pääpiirteet liitteessä 4 ja taulukossa 4 annettujen tietojen perusteella.



Kuva 25. 3-D käyristä muodostettu tuuliturbiinin lapa

Kuvassa 25 esitetyt käyrät muodostivat rajat, joiden välille pursotettiin pinta. Pinnan tarkkuuteen vaikuttaa suuresti salon suuntaisten pisteiden määrä. Erityistä tarkkuutta vaadittiin

myös kohtiin, jossa näkyy äkillisiä muutoksia, kuten lavan juuren ja kärjen alueella, missä janteen suuruus muuttuu huomattavasti kuvan 26 mukaisesti.



Kuva 26. Lavan pintamalli

Kuvassa 26 esitetty lapa on laadittu pintamallina, koska lavalle asetettavat materiaalit sekä niiden ominaisuudet määriteltiin myöhemmin FE-analyysissä. Toisaalta umpinaisen mallin elementtiverkko olisi vienyt myös huomattavan määrän opiskelijalisenssin rajallisista solmupisteistä pois.

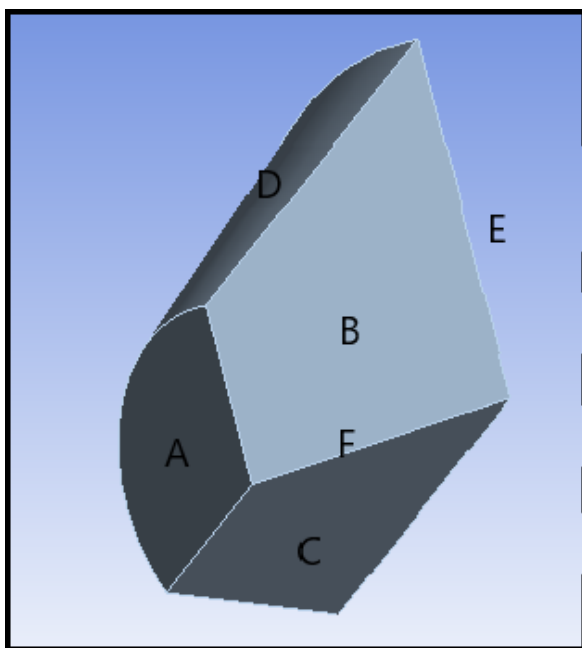
8 CFD-analyysi

Tuuliturbiinin lapaan kohdistuvien rasiusten aiheuttajista merkityksellisimmäksi muodostuu ilman virtaus siiven ohi sen pyöriessä sekä painovoiman vaikutukset. Ohi virtaavan ilman vaikutuksia pyörivään lapaan selvitetään CFD-analyysin eli numeerisen virtausanalyysin avulla. Tässä opinnäytetyössä virtausanalyysi suoritettiin käyttäen Ansys-ohjelmaan sisällytettyä Fluent-työkalua.

Tässä työssä CFD-analyysi rajattiin täysin yhden lavan ohi virtaavan väliaineen käyttäytymiseen sekä väliaineen ohivirtauksesta muodostuneiden vaikutusten analyysiin. Tuuliturbiinista ei siten mallinnettu ja analysoitu kokonaista kolmella lavalla varustettua roottoria, vaan simulaatiossa hyödynnettiin symmetriaa, jonka seurauksena analyysin ratkaiseminen oli huomattavasti kevyempää ja siten nopeampaa. Toisena olennaisena syynä symmetrian hyödyntämiseen olivat ohjelman opiskelijalisenssin määräämät rajat, jotka rajoittivat elementtiverkon maksimikoon 512 000 solmupisteeseen.

8.1 Elementtiverkon luonti

Väliaineen virtauksen tarkastelua varten oli mallinnettava virtausalue, koska tarkasteltiin siiven ohi virtaavaa ilmaa. Opinnäytetyötä varten mallinnettu tuuliturbiinin lapa asetti virtausalueen vähimmäismitat. Kolmelapaiselle tuuliturbiinille soveltuva virtausalue on muodoltaan lieriö. Tarkoituksena oli kuitenkin hyödyntää rajalliset solmupisteet mahdollisimman tehokkaasti, jolloin symmetrian periaatetta hyödyntäen virtausalueesta laadittiin kuvan 27 mukainen katkaistun kartion osa.

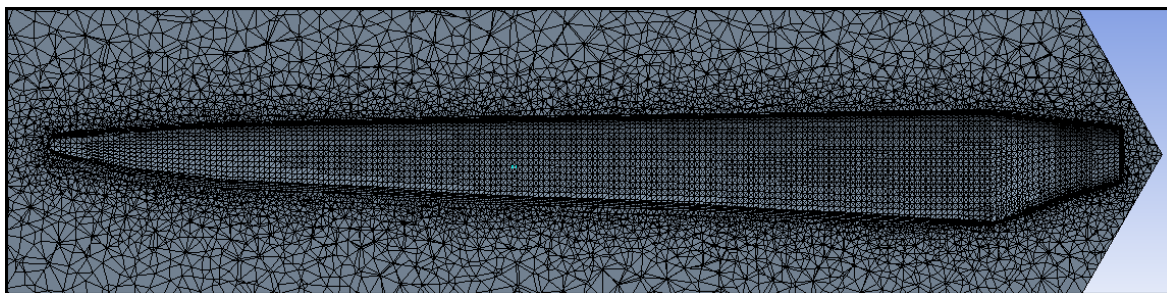


Kuva 27. CFD-analyysin virtausalue

Kuvan 27 mukainen kartion osa on kooltaan 156 metriä pitkä ja sen säteet ovat 78 ja 156 metriä. Päätös kartion muodosta perustui siihen, että roottorin etupuolella esiintyvä ilmavirran hidastuminen ja sen seurauksena tapahtuva paineen nousu eivät aiheuta lähempää tarkastelua vaativia toimenpiteitä, mutta sama ei pädekään enää roottorin jälkeisellä alueella.

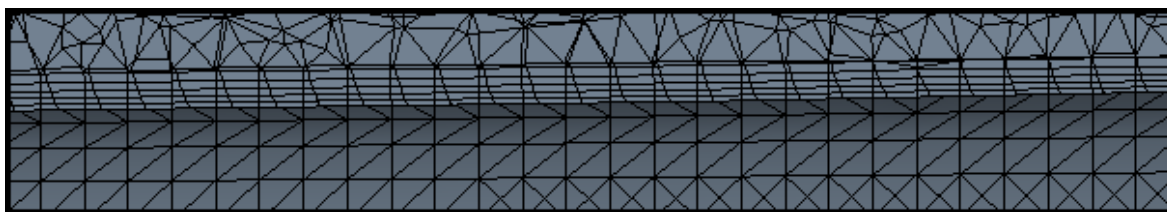
Väliaineen virratessa tuuliturbiinin lavan ohi putoaa ilman nopeus ja vallitseva paine. Edellä mainittujen ilmiöiden realistisempaa havainnointia varten roottorin jälkeistä aluetta laajennettiin ilman virtauksesta aiheutuvien potentiaalisten ongelmien minimoimiseksi.

Elementtiverkon laadintaa varten on Ansys-ohjelmistossa automaattinen vaihtoehto, mutta tämän ongelman kokoluokassa ei automaattista vaihtoehtoa suositella käytettäväksi, jotta tarkasteltaviin asioihin lukeutuvat suuret saavuttaisivat riittävän tarkkuuden. Virtausanalyyysiä varten laadittu elementtiverkko nähdään osittain kuvassa 28.



Kuva 28. Virtausalueen elementtiverkko lavan lähetyvillä

Kuvasta 28 huomataan, että elementtiverkko koostui määräämättömistä kolmikulmaisista elementeistä. Virtauksen kannalta tärkein alue oli lapaa ympäröivä alue ja siitä syystä kyseistä aluetta oli tarkennettava käyttäen Sphere of Influence -ominaisuutta, jolla lavan välittömässä läheisyydessä ollutta elementtiverkkoa muutettiin tiheämmäksi. Toinen harkintaa vaativa asia elementtiverkon laadinnassa siipiprofiileilla oli profiilin pinnalla esiintyvät nopeusgradientit ja tarkalleen ottaen rajakerroksessa ilmenevät leikkausjännitykset, joiden lähempää tarkastelua varten oli kuvassa 29 esitettyjä elementtikerroksia lisättävä.



Kuva 29. Lavan elementtikerrokset

Kuvasta 29 nähdään, että lavan pintaan oli asetettu 5 elementtikerrosta. Ansysin (2010, 122–123) käyttöohjeen mukaan elementtiverkon laadusta kertoo eritoten CFD-ongelmissa elementtien vinous (skewness), joka kuvastaa elementtien tasasivuisuutta. Opinnäytetyön

lapaa varten laaditussa virtausalueessa vinous oli keskimäärin noin 0,28 ja se kertoo siitä, että elementit olivat keskimääräisesti hyvälaatuisia.

8.2 Analyysin rajaehdot

Lavan virtausanalyysi tämän opinnäytetyön osalta keskittyi täysin ajasta riippumattomaan tarkasteluun, jolloin lavan pyörimistä täytyi simuloida tasaista nopeutta pyörivällä kehysellä. Roottorin pyörimisnopeus perustui kaavaan 45.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (45)$$

missä

ω = roottorin pyörimisnopeus [rad/s]

R = roottorin säde

v = ilman vapaan virtauksen nopeus

λ = lavan kärjen nopeussuhde.

Liitteessä 5 esitetyn alustavaan testiin perustuvan kuvion perusteella todettiin, että opinnäytetyössä käytetyn lavan suorituskyvyn kerroin sai maksimiarvonsa lavan kärjen nopeussuhteen ollessa noin 6. Tällöin kaavan 45 avulla laskettuna roottorin pyörimisnopeudeksi saatiin -2.77 rad/s, jossa negatiivinen etumerkki viittaa lavan pyörimissuuntaan.

CFD-analyysiä varten oli virtausalueelle asetettava myös rajaehdot. Taulukosta 5 huomataan kuvan 27 virtausalueelle asetetut ehdot.

Pinta	Nimi
A	Velocity Inlet
B	Interface
C	Interface
D	Velocity Inlet
E	Pressure Outlet
F	Wall (Lapa)

Taulukko 5. CFD-analyysin rajaehdot

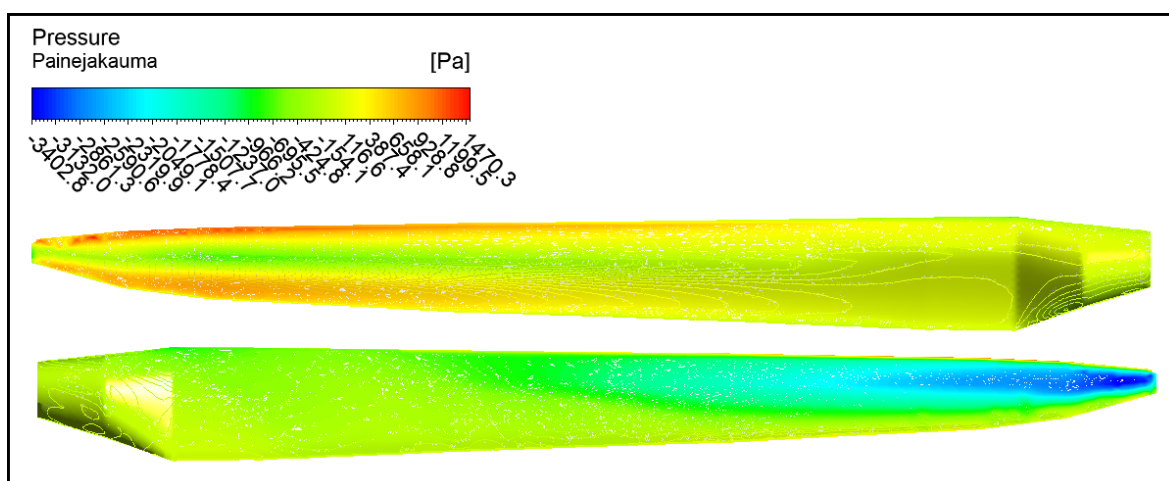
Taulukon 5 mukaisesti pinnat A ja D kuvastivat pintoja, joista ilma virtaa vapaasti virtausalueen läpi sekä lavan ohi nopeudella 12 m/s. Pinnat B ja C asetettiin rajapinnoiksi virtausalueen symmetriaehto varten. Rajapintojen asetus muodostui oleelliseksi, koska muussa tapauksessa Fluent olisi käsitellyt niitä ulostuloina tai seininä vaikuttaen analyysiin ja sitä

kautta saatuihin tuloksiin negatiivisesti. Pinta E kuvasti virtausalueen ulostuloa ja pinta F lavan tilavuutta vastaavaa seinää virtausalueen sisäpuolella, jonka ohi ilma virtaa.

Viimeiseksi valittiin virtausanalyysille sopiva turbulenssimalli. Vaihtoehtoja turbulenssimallille oli useampia. Tähän analyysiin soveltui kuitenkin parhaiten Shear Stress Transport (SST) k- ω -malli, koska Ansysin (2013, 96) käyttöoppaan mukaan SST-mallissa yhdistyy k- ϵ ja k- ω -mallien parhaimmat puolet eritoten seinäalueilla. Lisäksi k- ϵ -turbulenssimallin käyttö olisi edellyttänyt elementtiverkolta tarkemman resoluution seinäalueiden läheisyydessä, mikä olisi rajoittanut jo entuudestaan harvaa elementtiverkkoa virtausalueelle.

8.3 Tulokset

Tuuliturbiinin lavalle tehdyn virtausanalyysin tarkoitus tässä opinnäytetyössä oli lavalle kohdistuvien kuormitusten määrittäminen komposiittirakenteiden FE-analyysiä varten. Virtausanalyysistä muodostuneet kuormat olivat lavan ohi virtaavan väliaineen muodostama paineja-kauma lavan pinnalle (kuva 30), lavan pyörimisestä aiheutuva keskihakuiskiikkyvyys (kaava 46) sekä coriolisvoima (kaava 47).



Kuva 30. Painejakauma lavan ala- ja yläpinnalla

$$a_c = \omega^2 r \quad (46)$$

$$F = 2m\omega \times v' \quad (47)$$

Kuvassa 30 esitetystä painejakaumasta kyetään toteamaan, että lapa toimi fyysisten perusperiaatteiden mukaisesti. Lavan ylä- eli imupuolella esiintynyt negatiivinen paine kertoi yläpinnan suuntaisesta nostovoiman kehityksestä. Vastaavasti lavan ala- eli painepuolella esiintyvä positiivinen paine oli suurin etureunan välittömässä läheisyydessä paikallisen ilman nopeuden laskun takia. Ilman nopeuden lasku siiven etureunassa johtuu etureunaan muodostuvasta patopisteestä.

Siiven pinnalla kuvassa 30 esitetty painejakauma johtui siiven ylä- ja alapintojen ohi virtaavan väliaineen nopeuserosta. Tästä seurasi, että imupuolella ilmavirran paikallinen nopeus oli suurempi, jolloin staattinen paine oli pienempi. Siipiprofiilin nostovoiman tuotto perustui profiilin pintojen väliseen paine-eroon. Kuvan 30 tuuliturbiinin lapa tuotti nostetta alipaineen suuntaan.

Hansen (2015, 91–92) toteaa, että lapaan vaikuttava kokonaiskuormitus muodostuu lavan pinnan normaalinsuuntaisesta ja tangentiaalisesta komponentista. Tangentiaalinen komponentti vaikuttaa roottorin pyörimissuuntaan ja siten suoraan lavan tuottamaan tehoon pyörittämällä generaattoriin kiinnitettyä akselia. Tällöin roottorin suorituskyvyn kerrointa on mahdollista arvioida käyttäen kaavaa 9, jossa tuulesta saatava teho esitetään kaavalla 48 ja roottorin keräämä energia puolestaan kaavalla 49.

$$P_{tuuli} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (48)$$

$$P_{roottori} = NT\omega \quad (49)$$

missä

ρ = väliaineen tiheys [kg/m³]

A = roottoripinta-ala [m²]

v = vapaan virtauksen nopeus [m/s]

N = lapojen lukumäärä

T = lavan momentti [Nm]

ω = roottorin pyörimisnopeus [rad/s].

Kaavojen 9, 48 ja 49 avulla saatiin roottorin suorituskyvyn kertoimeksi laskettua 0.414, jolloin 12 m/s käyttöolosuhteissa tuuliturbiinin tehontuotto olisi 930 kW. Roottorin kokonaisyötysuhteeseen vaikuttavat myös mekaanisista osista aiheutuvat häviöt, mutta niiden vaikutusten arviointi jätettiin pois tästä opinnäytetyöstä.

9 FE-analyysi

Kuitujen orientaatiolla sekä kuormitustyypillä on merkityksellinen rooli rakenteiden kestävyteen ortotrooppisissa komposiittimateriaaleissa. Tuuliturbiinin lapaan kohdistuvat kuormitukset määriteltiin tässä opinnäytetyössä CFD-analyysin kautta. Laparakenteisiin vaikuttavat kuormitukset mukailivat tuuliturbiinin toiminnasta aiheutuneita rasituksia, mihin sisältyi lavan pinnalla vaikuttava painejakauma (kuva 30) sekä lavan pyörimisestä aiheutuvat vaikutukset. Painejakaumasta voitiin päätellä, että tuuliturbiinin lapa taipui nosteen suuntaan, toisin sanoen lavan painepuoli oli vedossa ja imupuolella esiintyi puristusjännitystä.

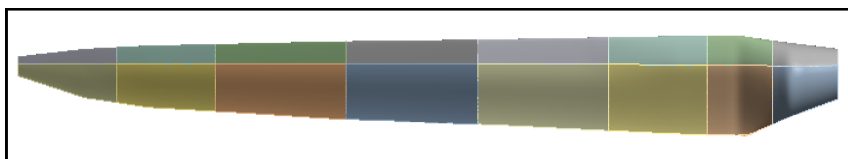
Tuuliturbiinin lapoja koskevan suunnittelustandardin mukaan lavan taipumaa tulisi rajoittaa siten, ettei se kuormitettuna osuisi torniin missään tilanteessa (DS/IEC/TS 61400-23 2001). Tässä opinnäytetyössä FE-analyysi rajattiin kuitujen orientaation vaikutusten analysointiin tuuliturbiinin lavan salon suuntaisen taipuman minimoimiseksi ja komposiittilaminaatissa ilmenevien potentiaalisten vaurioiden poissulkemiseksi.

9.1 Lavan rakenne

Tuuliturbiinin lapojen kevyt ja kestävä kokoonpano on mahdollistettu hyödyntämällä kuitulujitteisia komposiittimateriaaleja ja niistä muodostettuja laminaattirakenteita. Pienissä ja keskikokoisissa tuuliturbiinilavoissa yleisimmin käytettyihin komposiittimateriaaleihin kuuluu lasikuitu ja sen eri vaihtoehdot. Laminaateissa sideaineena käytetään tyypillisesti epoksi- tai polyesterihartsia sitomaan kuitumatot toisiinsa kiinni. Lisäksi lavan kokonaispainon minimoimiseksi ja rakenteellisen jäykkyyden lisäämiseksi on hunajakennorakenteiden käyttö suositeltavaa komposiittilaminaatin ydinrakenteena.

FE-analyysiä varten oli mallinnettuun tuuliturbiinilapaan rakennettava edellä mainittu laminoitu komposiittirakenne, ja sitä varten Ansys-suunnitteluohjelma tarjosi ACP-työkalua komposiittirakenteiden määrittelyä ja analyysiä varten.

Komposiittirakenteisen lavan materiaali jakauma on sellainen, että suurin osa materiaalista sijaitsee lavan juurialueella ja vähenee lavan kärkeen päin mennessä. Tämän aikaansaamiseksi oli mallinnettu lapa jaettava esimerkiksi kuvassa 31 esitetyllä tavalla riittävän monen osaan.



Kuva 31. Osiin jaettu lapa

Kuvasta 31 nähdään, että lapa jaettiin useampaa osaan. Syy lavan pituussuuntaiselle leikkaukselle perustuu siihen, ettei erillistä pituusjäykistettä asetettu lavan sisälle. Pituusjäykisteenä tuli toimimaan kuvassa 31 esitetty lavan etureuna ja sen komposiittirakenne.

9.1.1 Käytetyt materiaalit

Tuuliturbiinin lapoihin soveltuvista lasikuiduista S-Glass muodosti laminaattirakenteen kuitumateriaalin. S-Glass-nimen S tulee sanasta strength ja se viittaa kuitutyyppin verraten suureen lujuuteen. Vaihtoehtoiseen E-Glass lasikuituun verrattuna S-Glass soveltui paremmin vastaanottamaan voimaa sekä estämään väsymisestä aiheutuvia potentiaalisia vaurioita, ja se valittiin siitä syystä lavan kuitumateriaaliksi. Sideaineista epoksi on Mallickin (2007, 92) mukaan erinomainen vaihtoehto verrattuna polyesteriin epoksin suuremman vetolujuuden ja adheesio-ominaisuuksiensa ansiosta. Kääntöpuolena epoksihartsin korkeammille lujuusteknisille ominaisuuksille tulee kalliimpi hinta. Lasikuitu-epoksilaminaatin mekaaniset ominaisuudet nähdään taulukosta 6.

Property	Value	Unit		
Density	2000	kg/m ³		
Orthotropic Elasticity				
Young's Modulus X direction	50000	MPa		
Young's Modulus Y direction	8000	MPa		
Young's Modulus Z direction	8000	MPa		
Poisson's Ratio XY	0.3			
Poisson's Ratio YZ	0.4			
Poisson's Ratio ZX	0.3			
Shear Modulus XY	5000	MPa		
Shear Modulus YZ	3846.2	MPa		
Shear Modulus ZX	5000	MPa		
Orthotropic Stress Limits			Orthotropic Strain Limits	
Tensile X direction	1700	MPa	Tensile X direction	0.0244
Tensile Y direction	35	MPa	Tensile Y direction	0.0035
Tensile Z direction	35	MPa	Tensile Z direction	0.0035
Compressive X direction	-1000	MPa	Compressive X direction	-0.015
Compressive Y direction	-120	MPa	Compressive Y direction	-0.012
Compressive Z direction	-120	MPa	Compressive Z direction	-0.012
Shear XY	80	MPa	Shear XY	0.016
Shear YZ	46.154	MPa	Shear YZ	0.012
Shear ZX	80	MPa	Shear ZX	0.016

Taulukko 6. S-Glass-Epoxy-laminaatin mekaaniset ominaisuudet

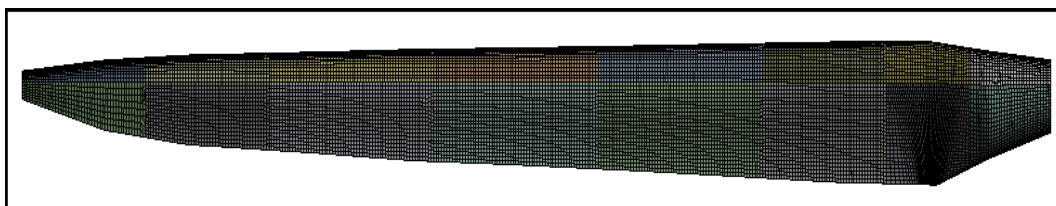
Taulukossa 6 esitetyn datan perusteella voidaan todeta, että analyysia varten valittu laminaatti oli tyypiltään ortotrooppinen. Se tarkoittaa, että laminaatin mekaaniset ominaisuudet ovat vahvasti riippuvaisia orientaatiosta ja se asettaa siltä osin perustan FE-analyysille tähän opinnäytetyöhön.

9.1.2 Laminaatti

Tuuliturbiinin lavan kokonaistaipuman minimoimiseksi analysoitiin tässä opinnäytetyössä kuitujen orientaation vaikutuksia laminaatissa. Orientaation vaikutuksia testattiin 0–120 asteen välillä, missä 0 astetta viittaa kuitujen suunnan olevan yhdensuuntaisia lavan pituus-suunnassa eli salon suunnassa lavan juuresta kärkeen päin. Vastaavasti 90 asteen kulmassa olevat kuidut suuntautuvat johtoreunasta jättöreunaan päin. Liitteessä 6 nähdään esimerkki lavan kärkialueen laminaattirakenteesta, missä hunajakennorakennetta ympäröi symmetrinen lasikuitu-epoksi-alilaminaatti.

9.2 Elementtiverkon luonti

Tuuliturbiinin lavan monimutkaisen geometrian ja opiskelijalisenssin rajallisten solmupisteiden takia oli mallinnetun lavan jättöreunaa muokattava siten, etteivät elementtiverkon solmupisteet ylittäneet 32 000. Lisäksi kuvassa 31 esitetyt lavan osat oli liitettävä toisiinsa siten, ettei analyysi olisi käsitellyt liitoskohtia erillisinä vapausasteina, vaan yhtenäisenä siipenä. Lavalle laadittu elementtiverkko vaati vastaavanlaisen toimenpiteen, jossa vierekkäisten alueiden elementit yhdistettiin toisiinsa. Lavan elementtiverkko nähdään kuvassa 32.

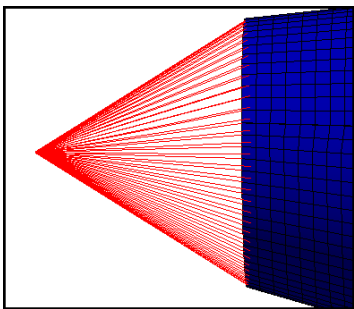


Kuva 32. Lavan elementtiverkko

Kuvasta 32 nähdään, että lavan elementtiverkko oli melko säännöllinen. Säännöllisen elementtiverkon hyviin puoliin kuuluu sen verrattainen keveys eli solmupisteiden määrä, jotka kuvan 32 mukaisessa verkossa jäivät 32 000 pisteen alapuolelle. Lavan elementtiverkon laatu oli myös lähes täydellinen. Tärkeitä mittareita FE-analyysissä ovat verkon ortogonaalinen laatu ja elementtien sivusuhte (Aspect Ratio), joista ortogonaalinen laatu sai keskiarvon 0,99447 maksiarvosta 1,0. Elementtien sivusuhte puolestaan oli keskimäärin 1,8956, mikä viittasi siihen, että elementit olivat suurelta osin lähes täydellisiä nelikulmioita.

9.3 Analyysin rajaehdot

FE-analyysin rajaehtoihin lukeutuvat lavan kiinnitys sekä lapaan kohdistuvien kuormien määrittäminen. Lavan kiinnitys toteutettiin kuvan 33 mukaisena etäpistekiinnityksenä.



Kuva 33. Etäpistekiinnitys

Kuvan 33 etäpisteellä simuloitiin lavan kiinnitys kuvitteellisen roottorin napaan. Etäpistekiinnitys mahdollisti vapausasteiden hienovaraisemman säädön ja hallinnan. Etäpiste sijaitsi metrin etäisyydellä lavan tyvestä ja kuvasti akselia, jonka ympäri roottori pyörii. Koska lavan toimintaa analysoitiin sen pyöriessä, oli pyörimisnopeus asetettava samoin perustein kuin CFD-analyysissä. Pyörimisnopeudeksi asetettiin $-2,77$ rad/s kaavalla 45 laskettuna.

Mallinnettu lapa oli pituudeltaan 25 metriä, jolloin odotettu taipuma lavan kärjessä oli suuri. Pieniin venymiin ja siirtymiin keskittyvä analyysi oletti, ettei aiheutuneista siirtymistä tapahtuvaa rakenteellista jäykkyyden muutosta tapahtuisi. Pyörivässä tuuliturbiinin lavassa esiintyneet siirtymät olivat kuitenkin suuruudeltaan sellaisia, että Large Deflection -ominaisuus piti asettaa päälle analyysissä tulosten tarkkuuden parantamiseksi.

Viimeisenä rajaehtona piti määritellä virtausanalyysistä saatu painejakauma FE-analyysiin. Ansys-ohjelma mahdollisti lähes saumattoman työnkulun CFD- ja FE-analyysien välillä, jolloin painejakaumaa ei tarvinnut erikseen laatia, vaan se oli mahdollista ladata CFD-analyysistä suoraan FE-analyysiin ja lavan pinnalle.

9.4 Tulokset

Komposiittirakenteisessa lavassa ilmenneet siirtymät ja venymät saatiin laskettua kappaleeseen kohdistuvasta kuormituksesta tai tarkalleen ottaen näiden tekijöiden välisestä suhteesta eli kulmakertoimesta. Jännitys–venymä-käyrän kulmakerroin kuvasti laminaatin suunnitteluvakioita, joiden perusteella liitteessä 6 esitetystä laminaattirakenteesta laadittiin taulukossa 7 esitetty niin kutsuttu vaatimustenmukaisuusmatriisi (Compliance matrix).

i	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1.00E-06	-3.00E-07	0	-2.07E-25	1.48E-24	0	0	0
1	-3.00E-07	6.25E-06	0	1.48E-24	2.83E-23	0	0	0
2	0	0	1.00E-05	0	0	0	0	0
3	-2.07E-25	1.48E-24	0	2.11E-08	-6.33E-09	0	0	0
4	1.48E-24	2.83E-23	0	-6.33E-09	1.32E-07	0	0	0
5	0	0	0	0	0	2.11E-07	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1.30E-05	0
7	0	0	0	0	0	0	0	9.98E-06

Taulukko 7. Vaatimustenmukaisuusmatriisi

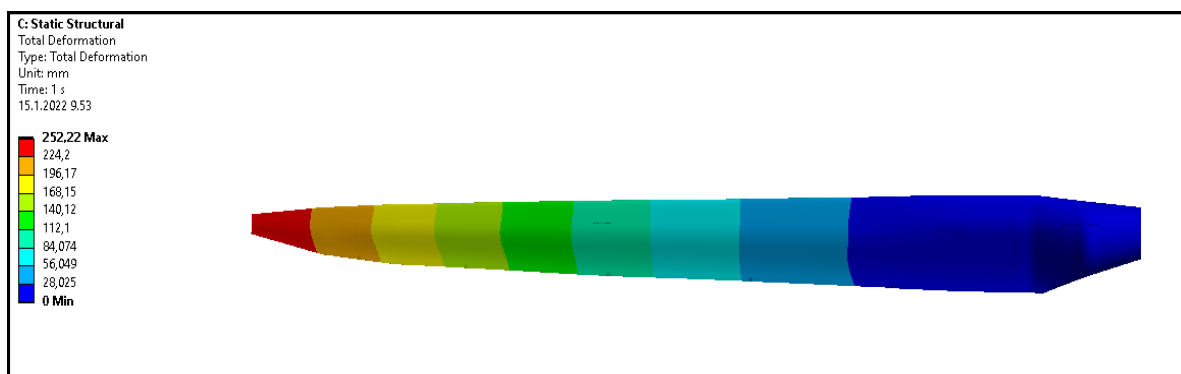
Taulukon 7 vaatimustenmukaisuusmatriisi siis liitti venymät jännityksiin, jolloin sen avulla oli mahdollista selvittää eri materiaalivakiot ortotrooppisille materiaaleille, kuten lasikuidulle ja siitä muodostetulle laminaatille. Liitteestä 6 nähdään rakenneanalyysiä varten muodostettu laminaattirakenne lavalle, jonka suunnitteluvakiot laskettiin klassisen laminaattiteorian (CLT) mukaan. CLT:n mukaan lasketut suunnitteluvakiot laminaatille esitetään taulukossa 8.

Property	0	15	30	45	60	75	90	deg
Flexural Laminate Shear Stiffness	4993.14	5276.77	5953.07	6360.69	5953.07	5276.77	4993.14	MPa
Flexural Laminate Stiffness E1	49931.4	33599.9	18386.7	11995.5	9349.36	8276.81	7989.03	MPa
Flexural Laminate Stiffness E2	7989.03	8276.81	9349.36	11995.5	18386.7	33599.9	49931.4	MPa
Laminate Shear Stiffness	4444.44	4696.91	5298.92	5661.76	5298.92	4696.91	4444.4	MPa
Laminate Stiffness E1	44444.6	29907.7	16366.3	10677.5	8322.09	7367.4	7111.25	MPa
Laminate Stiffness E2	7111.25	7367.4	8322.09	10677.5	16366.3	29907.7	44444.6	MPa
Out of Plane Shear G23	145.83	131.25	80.8121	46.0963	43.5621	81.2775	147.059	MPa
Out of Plane Shear G31	271.422	142.936	68.299	65.6101	120.538	230.715	267.266	MPa
Shear Correction Factor k44 (G23)	0.0426	0.0378	0.0222	0.0119	0.0105	0.0186	0.0331	
Shear Correction Factor k55 (G23)	0.0610	0.0327	0.0165	0.0169	0.0332	0.0663	0.0780	

Taulukko 8. Kuitujen orientaation vaikutus laminaatin suunnitteluvakioihin

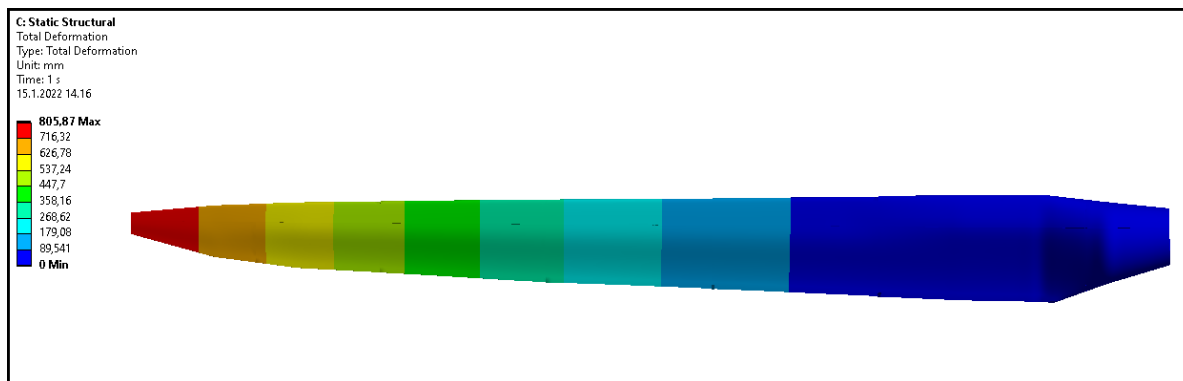
Taulukossa 8 esitetyn datan perusteella on mahdollista tehdä oletuksia lasikuitu-epoksi-laminaatin taipumasta. Taulukon mukaan tuuliturbiinin lavan voi olettaa saavuttavan suurimman taipuman kuitujen ollessa kohtisuorassa lavan pituussuuntaan katsottuna. Oletamus lavan taipumasta perustui taulukossa 8 esiintyviin E1- ja E2-arvoihin, jotka viittaavat laminaattirakenteen jäykkyyteen kaikissa kolmessa pääsuunnassa.

Lavan taipuman määrittämistä varten Ansys Mechanical -työkaluun sisältyy rakenteessa esiintyviä siirtymiä määrittelevä ominaisuus, jonka avulla laskettuja tuloksia nähdään kuvista 34 ja 35 sekä kuvioista 1. Kuitujen orientaation vaikutuksia analysoitiin 0 ja 120 asteen väliltä 15 asteen välein.



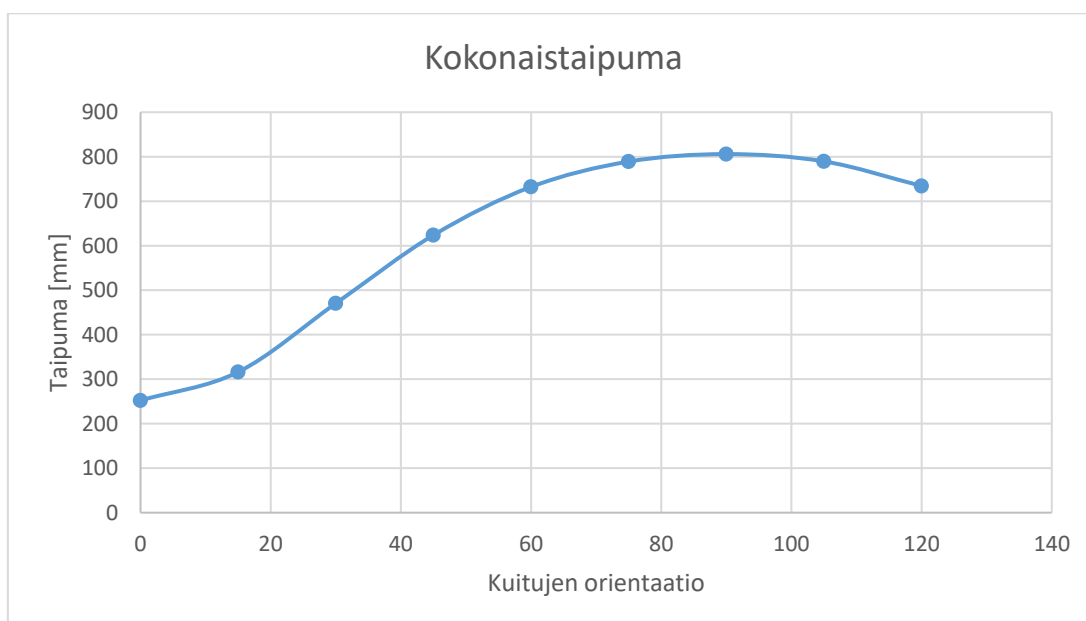
Kuva 34. Lavan taipuma, kuitujen orientaatio 0 astetta

Kuvasta 34 huomataan, että kun kuitujen orientaatio oli yhdensuuntainen lavan salon kanssa, oli lavan taipuma 252,22 mm ja siten kaikista pienin.



Kuva 35. Lavan taipuma, kuitujen orientaatio 90 astetta

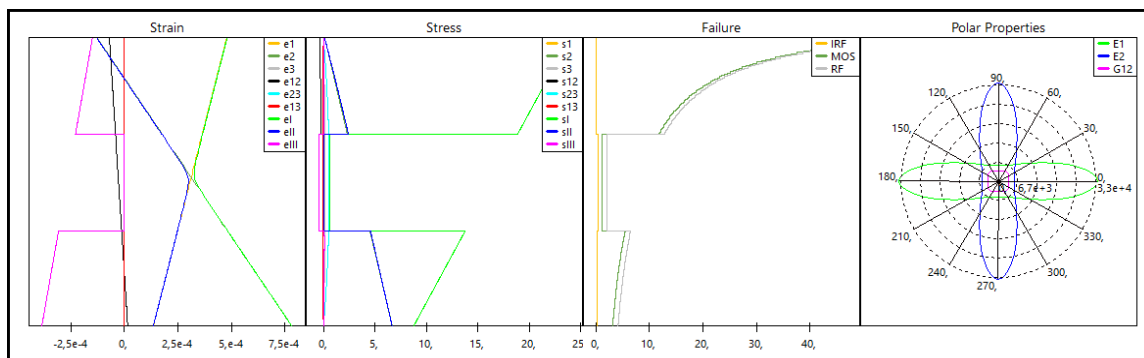
Vastaavasti kuvasta 35 nähdään, että lavan taipuman maksimiarvo 805,87 mm saavutettiin silloin, kuin laminaattirakenteen kuidut olivat lavan jänteen suuntaisia.



Kuvio 1. Lavan taipuma kuitujen orientaation funktiona

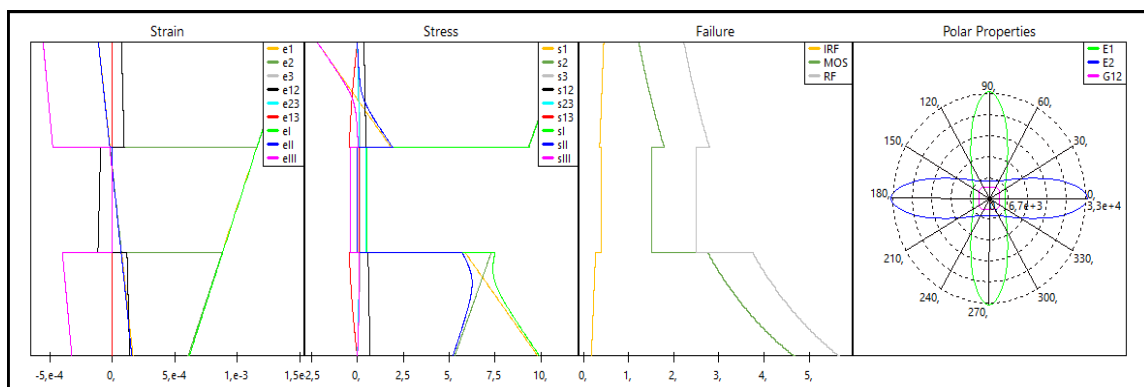
Kuvat 34, 35 ja kuvio 1 osoittavat, että lavan taipuma noudatteli aikaisemmin tehtyjä oletuksia. Alkuelämämuksena oli, että CLT:n avulla määritellyn laminaattirakenteen taipuma olisi pienintä kuitujen pääsuunnan ollessa samansuuntainen lavan pituussuunnassa. Tällöin voidaan todeta ensinnäkin se, että analyysissä päästiin vastaaviin lopputuloksiin. Toiseksi voidaan todeta, että z-akselin suuntaisen taipuman maksimiarvo 805,87 mm oli tapauksista huonoin ja sen verran suuri, että kyseisellä konfiguraatiolla valmistettu lapa vaatisi erillisen lapasalon. Muussa tapauksessa lavan pituussuuntaisen taipuman minimoimiseksi tulisi kuitujen orientaatio valita siten, että niiden pääsuunta poikkeaisi mahdollisimman vähän suunnasta, johon taipumaa halutaan pienentää. Tällöin salon suuntaisen taipuman minimoimiseksi olisi mahdollisimman moni kuitukerros orientoitava siten, että niiden pääsuunta vastaa lavan salon suuntaa.

Laparakenteisiin vaikuttavista jännityksistä suurimmat esiintyivät lavan juuresta 4–6 metrin etäisyydellä. Laminaattirakenteessa esiintyvät venymät sekä jännitykset perustuivat maksimijännitys- ja maksimivenymä-teorian mukaan laskettuihin arvoihin. Analyysissä huomioitiin myös matriisin ja hunajakennorakenteen vaurioituminen sekä leikkauksen aiheuttamat vahingot tasojaännitystilassa. Edellä mainituista asioista nähdään tuloksia kuvissa 36, 37 ja 38.



Kuva 36. Lavan juuresta esiintyvät jännitykset ja venymät, kuitujen orientaatio 0 astetta

Kuvassa 36 nähdään tuuliturbiinilavasta valitusta pisteestä lasketut jännitykset ja venymät. Kuvan jännitykset ja venymät kohdistuivat lavan etureunaan, joka oli samanaikaisesti vedossa lavan painepuolella ja puristuksessa lavan imupuolella. Kuvasta 36 huomataan, että jännityksistä suurimmat esiintyivät laminaatin yläpinnalla, mutta ne eivät johtaneet vaurioon. Ongelmakohtaksi laminaatissa muodostui sen hunajakennoydin, jonka varmuuskerroin eli Margin of Safety (MOS) kyseisessä kohdassa oli 1,02, mikä viittasi siihen, että rakenne oli lähellä vaurioitumista.

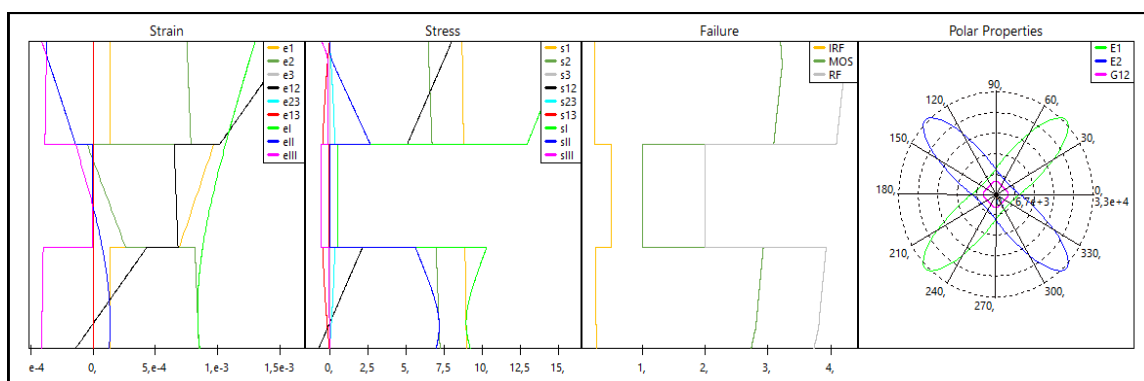


Kuva 37. Lavan juuresta esiintyvät jännitykset ja venymät, kuitujen orientaatio 90 astetta

Kuvasta 37 puolestaan voidaan todeta, että kuitujen orientaation muutos vaikutti erityisesti laminaatin jännityskestävyyteen ja vaurionsietokykyyn. Laminaatin pinnalla esiintyvät jännitykset alentavat selkeästi rakenteen kestävyyttä vallitsevalle kuormitustyyppille verrattuna 0 orientaatioon. Selkeästi alhaisempi kuormituksenkesto orientaation ollessa 0 astetta ei kuitenkaan viittaa pääjännityksien arvoon, sillä pääjännitykset ovat riippumattomia kuitujen

orientaatiosta, vaan sitä, että jännitykset 90 asteen orientaatiolla kuvastavat toisen pääsuunnan heikompaa lujuutta. Tästä seuraa, että laminaatti on rakenteellisesti heikompi, joka ilmenee alhaisempana varmuuskertoimenä. Ortotrooppinen materiaali, kuten opinnäytetyön lavassa käytetty lasikuitu, oli selkeästi heikompi materiaalin toisessa pääsuunnassa, mikä ilmenee kuvasta 37. Kuvan mukaan hunajakennorakenne ei enää muodostanut kriittisintä kohtaa vaan yläpinnalle asetettu kuitulaminaatti, jonka MOS alitti 1,0, jolloin lavan pinnalla voidaan havaita kuormituksesta aiheutuva vaurio.

Tuloksista on tähän mennessä nähty, että ongelmaksi muodostui laparakenteen hunajakennorakenne sekä tietyllä orientaatiolla myös lavan pintamateriaali. Kuvasta 38 nähdään analyysien perusteella optimaalinen orientaatio laminaatille vaurioiden välttämiseksi.



Kuva 38. Lavan juuressa esiintyvät jännitykset ja venymät, kuitujen orientaatio 45 astetta

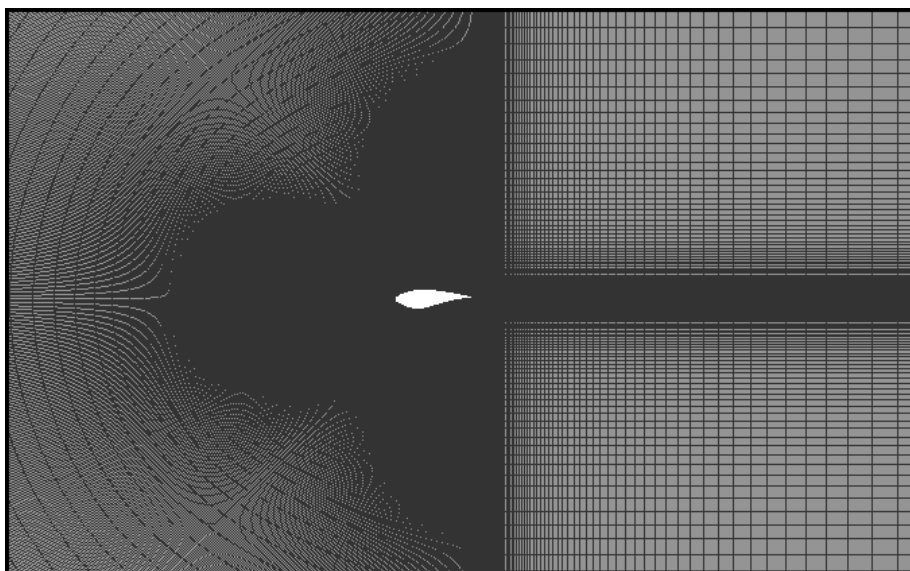
Kuvan 38 mukaan 45 asteen orientaatio osoittautui vaihtoehdoista parhaimmaksi. Kuvasta voidaan todeta, ettei lavan pinnan kuiduissa ilmennyt minkäänlaista vauriota kyseisessä tarkastelupisteessä. Sama voidaan todeta myös ydinrakenteessa, jonka varmuuskerroin pysyi hieman yli yhdessä kuten aikaisemmmissakin tapauksissa (kuvat 36 ja 37).

10 Pohdinta

10.1 Lapaprofiilien virtausanalyysit

Opinnäytetyön tarkoituksena oli analysoida tuuliturbiinin lapaan kohdistuvia kuormia ja lapa-rakenteissa ilmeneviä vaurioita sekä tarkastella lavan kokonaistaipumaa vaihdellen laminaattirakenteessa kuitujen orientaatiota. Vaikka opinnäytetyö keskittyi pääasiallisesti komposiittirakenteiden analyysiin, muodostui työn toinen puoli mallinnetun lavan aerodynamiikasta ja siihen liittyvistä virtausdynamiikan simulaatioista.

Analyyseistä ensimmäisenä tarkasteluun tuli luvussa 7 lavan mallinnus ja tuuliturbiinin lapaprofiilien aerodynaamisten ominaisuuksien määrittely. Analyysi suoritettiin kaksiulotteisena kuten siipiprofiileilla tyypillisestikin toimitaan. Kaksiulotteinen analyysi siipiprofiileille mahdollisti kuvan 39 mukaisen jäsennellyn elementtiverkon muodostamisen virtausalueelle.



Kuva 39. 2D-analyysin elementtiverkko

Kuvan 39 mukainen niin kutsuttu jäsennellyt elementtiverkko oli huomattavasti kevyempi verrattuna jäsentämättömään elementtiverkkoon. Kuvassa näkyvä verkko mahdollisti sen, että 512 000 solmupisteeseenkin rajoitettu virtausanalyysi pystyi arvioimaan toivottuja asioita riittäväällä tarkkuudella. Taulukosta 1 kuitenkin huomataan, että S818-profiilin indusoituneen vastuksen kerroin on noin kaksi kertaa suurempi kuin sen pitäisi olla. Indusoituneen vastuksen (coefficient of drag) kerroinarvon tarkkuus CFD-analyysissä riippuu suuresti muun muassa analyysin alkuarvoista, käytetystä turbulenssin mallista sekä y^+ -arvosta, jonka suuruus vaikuttaa siihen tarkkuuteen, millä seinäalueiden lähetyillä rajakerroksessa ilmeneviä leikkausjännityksiä tarkastellaan.

Siipiprofiileille suoritettiin useampi analyysi, joissa testattiin useampaa turbulenssimallia ja Reynoldsin lukuja. Analyyseistä saadut tulokset vaihtelivat huomattavasti riippuen käytetystä turbulenssimallista. Esimerkiksi inviscid-mallissa, jossa virtausta käsitellään täysin laminaarisena, huomattiin indusoidun vastuksen kertoimen olevan 20 prosenttia suurempi vertailuarvoihin nähden ja olevan siten kaikkein lähinnä todellista arvoa. Ongelmaksi kuitenkin muodostui se, ettei tapaus todellisuudessa ole täysin laminaarinen, vaan virtauksen irtoamista voidaan huomata jo kohtauskulman ollessa 0 astetta. Taulukossa 1 esitetyt arvot perustuvat $k-\epsilon$ turbulenssimallin avulla saatuihin tuloksiin, joiden mukaan indusoidun vastuksen kerroin olisi noin 100 prosenttia suurempi kuin vertailuarvo. Tuloksen suuri eroavaisuus johtuu todennäköisimmin siipiprofiilin pinnan tarkkuudesta. Analyysissä käytetty pinta syntyy pistekoordinaattien päälle muodostetusta käyrästä, joka sisältää 20 jänteen suuntaista pistettä, minkä seurauksena siipiprofiilin pinnan lähempi tarkastelu osoitti pinnan epätasaisuuden. Ratkaisuna ongelmaan olisi pintaa varten kannattanut asettaa huomattavasti enemmän pisteitä.

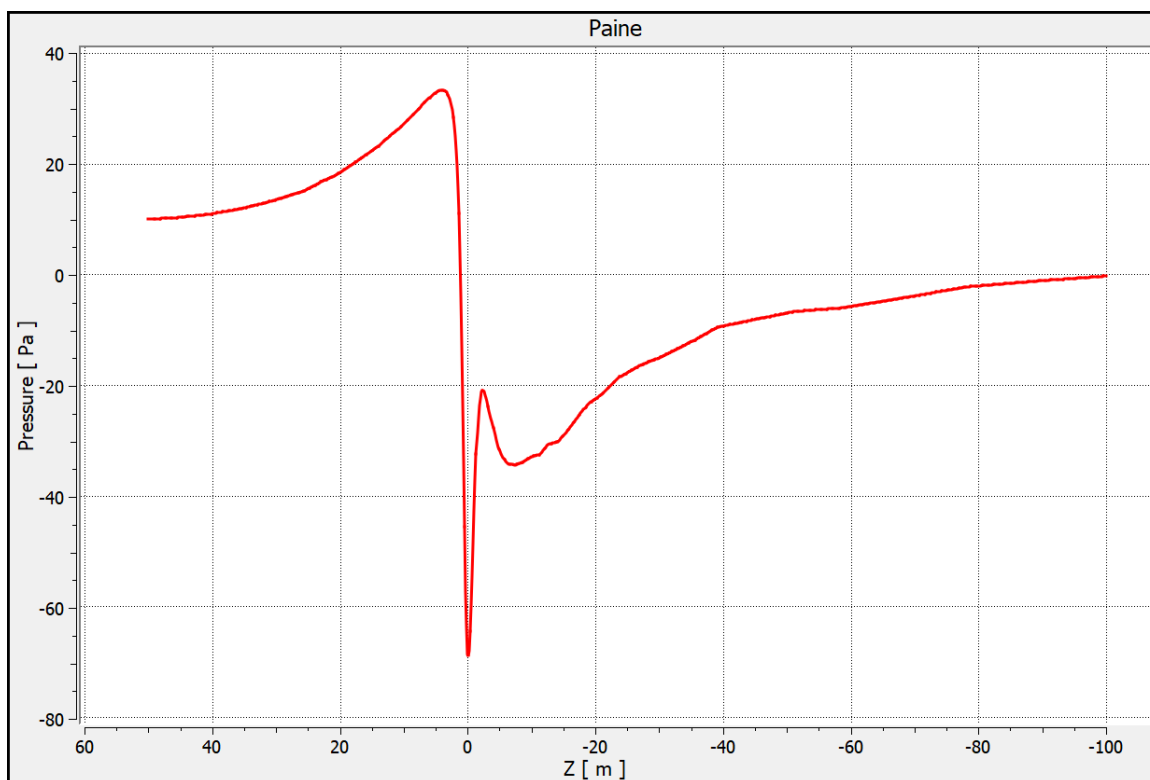
10.2 Lavan virtausanalyysi

Virtausanalyyseistä toisena oli mallinnetulle lavalle tehty analyysi, joka onnistui yleisellä tasolla hyvin. Opinnäytetyössä käytetty lapa ei vastannut olemassa olevia tuuliturbiinin lapa, ja siksi analyysistä saatujen tulosten validointi osoittautui mahdottomaksi. CFD-analyysin tulosten tarkkuutta on kuitenkin mahdollista arvioida. Virtausanalyysissä monitoroituihin asioihin lukeutui muun muassa lavan pinnalla vaikuttava staattinen paine ja lapaan kohdistuva momentti, eli z-akselin suuntainen painejakaumasta aiheutuva momentti, jonka perusteella roottorin tehokerrointa arvioitiin.

Tulosten luotettavuutta arvioitaessa hyödynnettiin jäänteiden konvergoitumista arvoon 0 sekä monitoroitujen määreiden muutosta. Jäänteiden konvergenssi riippuu paljolti oikein määritellystä analyysistä sekä valitusta toleranssista, joka asetettiin $1e-6$ tasolle kaikkien jäänteiden osalta. Haluttuun konvergenssiin ei kuitenkaan kaikkien jäänteiden kohdalla päästy, vaan toleranssin yläpuolelle jäivät massan säilyvyys, turbulenssin kineettinen energia ja sen dissipaatio. Massan säilyvyyden jäänteet jäivät $e-5$ tasolle ja arvoksi saatiin 0,01 kg/s, mikä viittaisi kuitenkin siihen että riittävän tarkkuuden taso saavutettiin. Turbulenssin kineettisen energian ja sen dissipaation jäänteet jäivät selkeästi halutun toleranssin yläpuolelle. Osasyynä jäänteiden arvoon vaikutti iteraatioiden määrä, joka ei missään vaiheessa ylittänyt 5 000 iteraatiota. Lavan virtausanalyysi rajoitettiin 5 000 iteraatioon ajallisista syistä, sillä 5 000 iteraatioon kului saatavilla olevasta laskentatehosta riippuen 3–4,5 tuntia. Tällöin useamman analyysin suorittaminen edellytti useampaa viikkoa analyysien välillä tehtävistä korjauksista ja eritoten elementtiverkon optimoinnista johtuen.

CFD-analyysiin laadittu virtausalue ja sen elementtiverkko kävi läpi useampia versioita. Virtausalue sai lopullisen muotonsa alustavien analyysien perusteella kerätystä tiedosta. Alustavat testit osoittivat esimerkiksi, että rajoitetun virtausalueen pituus erityisesti roottorin jälkeisellä alueella aiheutti tuloksiin merkittäviä vaikutuksia, esimerkiksi virtauksen kääntymisen, mikä korjattiin virtausalueen ulostulon etäisyyttä roottoriin ja ulostulon halkaisijaa kasvattamalla.

Lavalle tehdyn virtausanalyysin tulokset ovat suuruudeltaan uskottavia ja siten ne todennäköisesti pitävät paikkansa. Analyysin tarkkuus jättää kuitenkin tarvetta lähempää tarkastelua varten, mutta ohjelman lisenssin rajoitusten vuoksi piti lavan lähempi tarkastelu sulkea pois tästä opinnäytetyöstä. Aihetta lavan lähemmälle tarkastelulle olisi esimerkiksi kuvion 2 perusteella liittyen roottorin etu- ja jättöpuolen välisen paine-eroon.



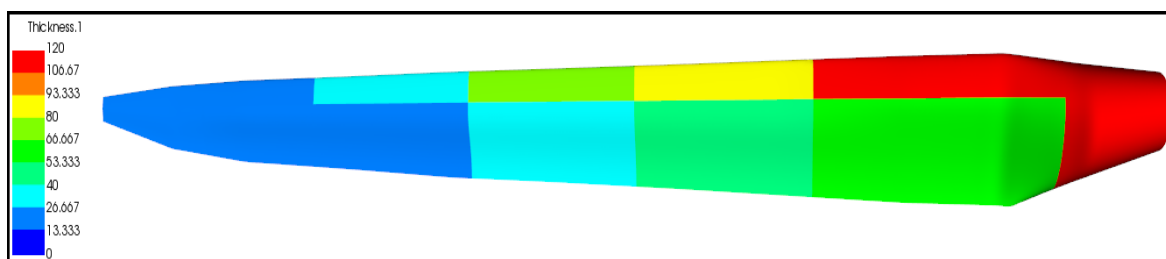
Kuvio 2. Virtausalueen paine-ero roottorin molemmin puolin

Kuviossa 2 nähdään selkeästi, miten ilmanpaine muuttuu roottorin etu- ja takapuolella. Kuvio 2 mukaisesti kuvassa 6: roottoria edeltävät alueet ovat sekä kuviossa 2 että kuvassa 6 lähes yhdenmukaiset. Vastaavasti kuviossa 2 nähdään roottorin jättöpuolella esiintyvää äkillistä muutosta vallitsevassa paineessa virtausalueen rajapinnassa, jossa elementtiverkon tiheys muuttuu huomattavasti ja siten edellyttäisi tarkennuksia analyyseissä.

10.3 Lavan rakenneanalyysi

Opinnäytetyössä tehdyn FE-analyysin tulokset komposiittilavan taipumaan liittyen käyttäytyivät kuten analyysin alkuarvojen perustella muodostetut oletukset osoittivat. Komposiittirakenteessa esiintyvien vaurioiden tarkastelu osoittautui kuitenkin huomattavasti haastavammaksi. Haasteet lavan rakenneanalyysissä tulivat esille jo lavan jakamisessa osiin laminaattirakennetta varten. Lapageometria jaettiin kahdeksaan osaan poikittaissuunnassa ja kahteen osaan pituussuunnassa kuvan 31 mukaisesti, ja pituussuuntaisen leikkauksen tarkoituksena oli erottaa lavan etureuna sen jättöreunasta. Päätös etureunan erotuksesta perustui täysin siihen, ettei lapaan mallinnettu salkoa, jolloin etureunan oli tarkoitus toimia sen korvikkeena.

Yksi pituussuuntainen leikkaus osoittautui kuitenkin ongelmalliseksi myöhemmin laminaattirakenteen kokoamisessa sekä siinä ilmenevissä jännityksissä. Ongelman korjaamiseksi olisi lavan ylä- ja alapinta pitänyt erottaa toisistaan ja lapa jakaa useampaan osaan pituussuunnassa eritoten lavan jättöreunan lähetyvillä. Lavan puolittamista harkitsin työn alkupuolella, mutta lavalle asetettu aerodynaaminen kierto esti lavan puolittamisen yhden tason avulla, koska aerodynaaminen kierto asetettiin epälineaariseksi siipiprofiilien virtausanalyysistä saatujen tulosten perusteella. Edellä mainittujen leikkausten puutteen vuoksi kuvan 40 mukaisessa laminaattirakenteessa havaittiin jännityskonsentraatioita alueiden välisten rajapintojen juuressa, jossa laminaatin paksuus muuttui äkillisesti. Rajapinnoilla esiintyvät jännityskonsentraatiot sekä niiden vaikutus laminaatin kestävyyspiti siten sulkea pois, koska ne eivät vastanneet todellisuutta.



Kuva 40. Lavan rakenne

Kuvassa 40 nähdään laminaattirakenteen paksuus kullakin jaetulla osalla. Analyysissä havaitun lovivaikutuksen johdosta tulokset rakenteessa ilmeneviin vaurioihin kerättiin lavan kriittisimmältä alueelta juuren lähetyviltä, jossa puristus- ja vetojännitys saivat suurimmat arvonsa. Vaurioiden tarkastelu lavan juuressa keskittyi yhteen alueeseen kerrallaan, ja siksi toisistaan erotettujen alueiden väliset jännitykset ja alueiden rajapinnoilla esiintyvien potentiaalisten vaurioiden tarkastelu jäivät työn ulkopuolelle.

Rakenneanalyysissä ilmenneistä haasteista riippumatta kuitujen orientaation vaikutusten analysointi tuuliturbiinin lavan taipumaan onnistui riittävällä tasolla todistamaan, ettei kuitujen orientaatiolla ole merkitystä rakenteen pääjännityksiin. Rakenteessa vaikuttavat pääjännitykset ovat riippuvaisia vain ja ainoastaan sen poikkileikkauksesta ja vaikuttavan voiman suuruudesta. Samaa ei voi sanoa kuitujen orientaation roolista laminaatin makroskooppiseen käyttäytymiseen, vaan analyysien tuloksista todettiin, että lasikuitu-epoksilaminaatti oli rakenteellisesti jäykin kuitujen pääsuunnassa. Tämän seurauksena myös komposiittilavan taipuma todettiin pienimmäksi edellä mainitussa tilanteessa.

Jatkotutkimusmahdollisuuksia opinnäytetyölle olisi useampia. Tämä opinnäytetyö keskittyi täysin yhdensuuntaiseen kuitulaminaattiin ja siinä ilmeneviin vaikutuksiin. Todellisuudessa tuuliturbiinin lavoissa käytetyt laminaattirakenteet koostuvat useammasta kerroksesta kuitua, ja niiden orientaatio vaihtelee jopa jokaisessa kuitukerroksessa. Tämä opinnäytetyö on osoittanut, että kuitujen orientaatiolla on merkittävä vaikutus rakenteen käyttäytymiseen ja kestävyYTEEN, ja tästä syystä jatkotutkimuksen aiheeksi sopisi epäsymmetrisen laminaattirakenteen analysointi väsyttävän kuormituksen alaisena. Mallick (2007, 291–292) esittää, että kuitulujitteisen komposiittirakenteen väsymiskestävyys veto–veto-kuormitusta vastaan on erinomainen kuitujen orientaation ollessa 0 astetta. Laminaatin väsymiskestävyys riippuu suuresti myös kuitujen pinoamisjärjestyksestä, kuormitus syklien tyypistä sekä siitä, kuinka suuri osa kuiduista on suunnattuna kuormitus akselin suuntaisesti. Tutkimus kuitulujitteisen komposiittilaminaatin väsymiskestävydestä edellyttäisi kuitenkin fyysisiä koekappaleita elementtimenetelmien rajoitteista komposiittimateriaalien väsymiseen liittyen.

11 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tehtiin tuuliturbiinin lavalle virtaus- ja rakenneanalyysit elementtimenetelmiä hyödyntäen. Opinnäytetyön päätavoitteeksi muodostui komposiittilaminaatissa ilmenevien makroskooppisten vaikutusten analysointi kuitujen orientaation muuttuessa. Työhön sisältyvät numeerisen virtausdynamiikan ja komposiittirakenteiden analyysit suoritettiin Ansys 2021 R2 -simulaatio-ohjelman opiskelijaversiolla, ja analyyseissä käytetty lapa mallinnettiin SolidWorks-suunnitteluohjelmalla. Työn toiminnallinen osuus jaettiin kolmeen osaan, joista ensimmäisessä mallinnettiin tuuliturbiinin lapa. Opinnäytetyötä varten mallinnettu lapa oli kooltaan 25 metriä pitkä ja se muodostui kolmesta eri siipiprofiilista. Siipiprofiileihin ja lavan pituuteen liittyvät päätökset perustuivat National Renewable Energy Laboratoryn (NREL) esittämiin vaihtoehtoihin, kun tavoitteena oli luoda roottori, jonka tehon tuotto saavuttaisi 1 MW.

Lavan mallinnuksen jälkeen oli vuorossa sen virtausanalyysi. Numeerisen virtausdynamiikan analyysin tulokset osoittautuivat realistisiksi. Lavan virtausanalyysissä todettiin ensinnäkin, että mallinnettu lapa toimi aerodynaamisten peruseriaatteiden mukaisesti: siipiprofiilin yläpinnalla liikkuva ilma kiersi pidemmän matkan kuin profiilin alapinnalla, mistä seurasi, että paine siiven yläpinnalla oli pienempi. Tämä viittaa siihen, että myös lavan kehittämä nostovoima on yläpinnan suuntainen ja vaikuttaa kohtisuoraan vapaaseen virtaukseen nähden. Tämän seurauksena lapa taipui z-akselin suuntaisesti nostovoiman suuntaan, jolloin lapaan vaikuttava momentti määriteltiin päinvastaisesta suunnasta ja se oli suuruudeltaan hieman yli 110 kNm. Roottorin tehokerroin sai siten arvon 0.414 ja tuotetuksi tehoksi laskettiin noin 930 kW. Fyysisten peruseriaatteiden varmistamisen lisäksi lavan virtausanalyysillä muodostettiin lavan rakenteisiin kohdistuvat kuormitukset. Suurimman kuormituksen aiheuttajaksi muodostui kuvassa 30 esitetty lavan pinnalla vallitseva painejakama, lavan pyörimisestä aiheutuva keskihakuiskiikkyvyys sekä coriolisvoima. Painejakama tuotiin rakenneanalyysiin ja lavan pyörimisestä aiheutuvat vaikutukset asetettiin erikseen.

Simulaatioista viimeisenä oli lavalle asetetun komposiittirakenteen analyysi, jossa analysoitiin kuitujen orientaation vaikutuksia tuuliturbiinin lavan taipumaan ja laminaatissa esiintyviin vaurioihin. Analysoitu laparakenne muodostui ortotrooppisesta lasikuitu-epoksilaminaatista ja hunajakennoytimestä. Klassisen laminaatioteorian mukaan tehtyjen laskemien perusteella laminaatin todettiin olevan jäykin kuitujen orientaation ollessa 0 astetta ja joustavin kuitujen ollessa 90 asteen kulmassa lavan pituussuuntaan nähden.

Alustavien testien perusteella tehdyt oletukset todettiin paikkansa pitäviksi lavalle tehdyssä rakenneanalyysissä, jossa analysoitiin tuuliturbiinilavan taipumaa. Lavan taipuma

osoittautui pienimmäksi kuitujen orientaation ollessa 0 astetta, eli kun ne olivat yhdensuuntaisia lavan pituussuunnassa, jolloin lavan kokonaistaipuma saavutti arvon 252,22 mm. Rakenneanalyysi tehtiin yhteensä 9 kertaa, ja kuitujen orientaatiota muutettiin 15 astetta kerrallaan 120 asteeseen saakka.

Kuvio 1 esittää lavan taipumaa kuitujen orientaation funktiona, ja se osoittaa, että lavan taipuma oli suurimmillaan 805,87 mm silloin, kun kuidut olivat orientoituneena niiden toiseen pääsuuntaan, eli lavan jänteen suuntaisesti. Ortotrooppisen materiaalin oletettiin käyttäytyvän tällä tavoin taulukossa 8 esitettyjen arvojen perusteella. Taulukosta 8 nähdään, että Laminate Flexural Stiffness E2 ja Laminate Stiffness E2 -arvot, jotka viittaavat laminaatin jäykkyyteen kuitujen toisessa pääsuunnassa, vahvistavat FE-analyysistä saadut tulokset liittyen lavan taipumaan.

Myös komposiittilaminaatissa esiintyvien vaurioiden todettiin olevan riippuvaisia kuitujen orientaatiosta. Analyysin tulokset osoittivat, että laminaattirakenteessa havaittiin vaurioita kuitujen orientaation ollessa 90 astetta, mikä vahvisti alkuperäiset oletukset oikeiksi. Tulokset osoittivat myös, että vaurioiden kannalta kestävimmäksi ratkaisuksi osoittautui se, että kuidut ovat 45 asteen kulmassa lavan pituussuuntaan nähden. Tuloksista oli siten mahdollista vetää johtopäätös, että kuitujen orientaatio vaikuttaa laminaatin kestävyys. Edellistäkin tärkeämpi johtopäätös oli se, että laminaatin kestävyys riippuu siitä, kuinka suuri osa kuiduista on orientoituneena materiaalin pääsuuntaan. Laminaatin kestävyys todettiin siis riippuvaiseksi siihen kohdistuvien jännitysten magnitudista siten, että kuitujen orientaatio määritteli vaurioon johtavan rajajännityksen.

Lähteet

Airfoil Tools a. NREL's S818 Airfoil (s818-nr). Viitattu 27.2.2022. Saatavissa: <http://airfoil-tools.com/airfoil/details?airfoil=s818-nr>

Airfoil Tools b. NREL's S830 Airfoil (s830-nr). Viitattu 27.2.2022. Saatavissa: <http://airfoil-tools.com/airfoil/details?airfoil=s830-nr>

Airfoil Tools c. NREL's S831 Airfoil (s831-nr). Viitattu 27.2.2022. Saatavissa: <http://airfoil-tools.com/airfoil/details?airfoil=s831-nr>

Anderson, J. A. 1995. Computational Fluid Dynamics the Basics with Applications. E-kirja. New York: McGraw-Hill.

Anderson, J. 2017. Fundamentals of Aerodynamics. Sixth Edition. E-kirja. New York: McGraw-Hill Education.

ANSYS. 2010. ANSYS Meshing User's Guide. E-kirja. Canonsburg: ANSYS. ResearchGate.

ANSYS. 2013. ANSYS Fluent Theory Guide. E-kirja. Canonsburg: ANSYS. FDocuments.

Arias, F. 2016. Assessment of Present/Future Decommissioned Wind Blade Fiber-Reinforced Composite Material in the United States. City College of New York. Tutkielma. Viitattu 8.11.2021. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/338430512_Assessment_of_PresentFuture_Decommissioned_Wind_Blade_Fiber-Reinforced_Composite_Material_in_the_United_States

Bajaro, D. C. M. 2012. Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines. Raportti. Viitattu 4.11.2021. Saatavissa: <https://colortheearthturquoise.files.wordpress.com/2012/03/horizontal-and-vertical-axis-wind-turbines-1.pdf>

BP. 2021. Statistical Review of World Energy 2021 70th edition. Raportti. Viitattu 18.10.2021. Saatavissa: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

Bredberg, J. 2001. On Two-equation Eddy-Viscosity Models. Chalmers University of Technology. Sisäinen raportti. Viitattu 19.3.2022. Saatavissa: http://www.tfd.chalmers.se/~lada/postscript_files/jonas_report_lowre.pdf

Brøndsted, P., Lilholt, H. & Lystrup, A. 2005. Composite Materials for Wind Power Turbine Blades. Annual Review of Materials Research. Vol. 35 (1), 505–538. Viitattu 9.11.2021.

Saatavissa: http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Pressure_vessels/FRP_Hutter_flange.pdf

Cable, M. 2009. An Evaluation of Turbulence Models for the Numerical Study of Forced and Natural Convective Flow in Atria. Queen's University. Maisterintutkielma. Viitattu 23.11.2021. Saatavissa: <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/thesescanada/vol2/OKQ/TC-OKQ-1884.pdf>

CFD Online. 2013. Introduction to turbulence/Turbulence kinetic energy. Viitattu 17.3.2022. Saatavissa: https://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction_to_turbulence/Turbulence_kinetic_energy

Chung, T. J. 2002. Computational Fluid Dynamics. E-kirja. Cambridge: Cambridge University Press.

DNVGL-ST-0376. 2015. Rotor blades for wind turbines. Høvik: DNV GL.

Dowling, N. E., Katakam, S. & Narayanasamy, R. 2013. Mechanical Behaviour of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. E-kirja. Harlow: Pearson Education.

DS/IEC/TS 61400-23. 2001. Wind turbine generator systems – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades. International Electrotechnical Commission.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001 uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä

Hansen, M. O. L. 2015. Aerodynamics of Wind Turbines. Third Edition. E-kirja. London: Routledge.

Hutton, D. V. 2004. Fundamentals of Finite Element Analysis. E-kirja. New York: McGraw-Hill.

Jalonsom. 2016. Functional schematic of the structure of a wind turbine. Viitattu 2.11.2021. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_schematic.svg

Johnson, G. L. 2006. Wind Energy Systems Electronic Edition. E-kirja. Duke Wiki.

Koutromanos, I. 2018. Fundamentals of Finite Element Analysis. Linear Finite Element Analysis. E-kirja. Hoboken: John Wiley & Sons.

Letcher, T. M. 2017. Wind Energy Engineering. A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. E-kirja. London: Academic Press.

Mallick, P. K. 2007. Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design. E-kirja. Boca Raton: CRC-Press.

Malvern, L. E. 1969. Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium. E-kirja. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Mamadanimov, U. M. 2013. Review of Airfoil Structures for Wind Turbine Blades. Oregon Institute of Technology. Katsaus. Viitattu 22.12.2021. Saatavissa: <https://cyberleninka.org/article/n/191430.pdf>

Mazumder, S. 2016. Numerical Methods for Partial Differential Equations. Finite Difference and Finite Volume Methods. E-kirja. London: Academic Press.

Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, N. H., Beauson, J., McGugan, M. & Sørensen, B. F. 2017. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. Materials 10 (11), 1285. Viitattu 8.11.2021. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1285>

Mohd, H. A. 2012. Wind Energy Systems Solutions for Power Quality and Stabilization. E-kirja. Boca Raton: CRC Press.

Nieuwstadt, F. T. M., Boersma, B. J. & Westerweel, J. 2016. Turbulence Introduction to Theory and Applications of Turbulent Flows. E-kirja. Cham: Springer International Publishing

Nijssen, R. P. L. 2006. Fatigue Life Prediction and Strength Degradation of Wind Turbine Rotor Blade Composites. Wieringerwerf: Knowledge Centre Wind Turbine Materials and Construction (KC-WMC). Opinnäytetyö. Viitattu 19.11.2021. Saatavissa: <https://www.montana.edu/composites/documents/Rogier%20Nijssen%20067810P.pdf>

NREL. 2012. Wind Turbine Airfoil List. Viitattu 22.12.2021. Saatavissa: <https://wind.nrel.gov/airfoils/AirfoilList.html>

Nuala. 2005. Wind Turbines. Viitattu 4.11.2021. Saatavissa: <https://www.flickr.com/photos/8815481@N03/753268371>

Sayma, A. 2009. Computational Fluid Dynamics. E-kirja. Ventus Publishing.

Singh, M. & Santoso, S. 2011. Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants. National Renewable Energy Laboratory. Alihankintaraportti. Viitattu 5.11.2021. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52780.pdf>

Thresher, R., Robinson, M. & Veers, P. 2008. Wind Energy Technology Current Status and R&D Future. National Renewable Energy Laboratory. Konferenssijulkaisu. Viitattu 18.10.2021. Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/253677103_Wind_Energy_Technology_Current_Status_and_RD_Future/link/545d49090cf2c1a63bfa629b/download

U.S Department of Energy. 2021. 2020 Wind Energy Research and Development Highlights. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Vuosikatsaus. Viitattu 18.10.2021. Saatavissa: <https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/2020-wind-energy-research-and-development-highlights>

Vassilopoulos, A. P. 2010. Fatigue life prediction of composites and composite structures. E-kirja. Cambridge: Woodhead Publishing.

Verksteeg, H. K., Malalasekera, W. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Second Edition. E-kirja. New York: Pearson Education.

Wacker, W. 2010. Darrieus rotor near Heroldstatt in Germany. Viitattu 4.11.2021. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus_rotor002.jpg

Liite 1. S818-siipiprofiilin koordinaatit

	X	Y	Z
1	100.000	0.000	0.000
2	99.628	0.117	0.000
3	98.575	0.504	0.000
4	96.973	1.157	0.000
5	94.933	1.993	0.000
6	92.501	2.904	0.000
7	89.660	3.796	0.000
8	86.363	4.664	0.000
9	82.642	5.539	0.000
10	78.553	6.422	0.000
11	74.154	7.304	0.000
12	69.504	8.175	0.000
13	64.667	9.017	0.000
14	59.709	9.814	0.000
15	54.693	10.544	0.000
16	49.683	11.184	0.000
17	44.741	11.711	0.000
18	39.925	12.098	0.000
19	35.293	12.315	0.000
20	30.896	12.325	0.000
21	26.765	12.048	0.000
22	22.803	11.478	0.000
23	19.029	10.705	0.000
24	15.488	9.769	0.000
25	12.219	8.703	0.000
26	9.262	7.538	0.000
27	6.652	6.303	0.000
28	4.428	5.028	0.000
29	2.623	3.735	0.000
30	1.261	2.453	0.000
31	0.376	1.222	0.000
32	0.067	0.456	0.000
33	0.013	0.184	0.000
34	0.004	0.089	0.000
35	0.003	-0.074	0.000
36	0.050	-0.328	0.000
37	0.143	-0.595	0.000
38	0.329	-0.973	0.000
39	1.237	-2.146	0.000
40	2.639	-3.381	0.000
41	4.493	-4.640	0.000
42	6.775	-5.908	0.000
43	9.426	-7.191	0.000
44	12.352	-8.438	0.000
45	15.515	-9.599	0.000
46	18.850	-10.623	0.000
47	22.288	-11.477	0.000
48	25.703	-11.943	0.000
49	29.310	-11.888	0.000
50	33.200	-11.360	0.000
51	37.452	-10.428	0.000
52	42.064	-9.207	0.000
53	47.005	-7.785	0.000
54	52.228	-6.249	0.000
55	57.672	-4.689	0.000
56	63.254	-3.192	0.000
57	68.874	-1.841	0.000
58	74.414	-0.705	0.000
59	79.742	0.166	0.000
60	84.717	0.743	0.000
61	89.199	1.022	0.000
62	93.052	1.029	0.000
63	96.156	0.811	0.000
64	98.373	0.434	0.000
65	99.614	0.111	0.000
66	100.000	100.000	0.000

Liite 2. S830-siipiprofiilin koordinaatit

	X	Y	Z
1	100.000	0.000	0.000
2	99.621	0.120	0.000
3	98.554	0.533	0.000
4	96.943	1.245	0.000
5	94.908	2.179	0.000
6	92.504	3.222	0.000
7	89.719	4.283	0.000
8	86.518	5.352	0.000
9	82.943	6.449	0.000
10	79.053	7.559	0.000
11	74.904	8.657	0.000
12	70.550	9.715	0.000
13	66.042	10.704	0.000
14	61.431	11.592	0.000
15	56.764	12.354	0.000
16	52.084	12.962	0.000
17	47.434	13.395	0.000
18	42.854	13.632	0.000
19	38.383	13.653	0.000
20	34.048	13.417	0.000
21	29.810	12.934	0.000
22	25.699	12.262	0.000
23	21.762	11.434	0.000
24	18.042	10.474	0.000
25	14.580	9.406	0.000
26	11.413	8.253	0.000
27	8.576	7.041	0.000
28	6.101	5.794	0.000
29	4.015	4.540	0.000
30	2.343	3.307	0.000
31	1.104	2.127	0.000
32	0.321	1.040	0.000
33	0.006	0.112	0.000
34	0.004	-0.084	0.000
35	0.041	-0.254	0.000
36	0.138	-0.406	0.000
37	0.288	-0.560	0.000
38	1.318	-1.192	0.000
39	2.942	-1.794	0.000
40	5.165	-2.385	0.000
41	7.932	-3.013	0.000
42	11.146	-3.674	0.000
43	14.756	-4.351	0.000
44	18.687	-5.030	0.000
45	22.887	-5.701	0.000
46	27.253	-6.393	0.000
47	31.589	-7.002	0.000
48	35.873	-7.334	0.000
49	40.193	-7.288	0.000
50	44.627	-6.859	0.000
51	49.216	-6.086	0.000
52	53.971	-4.984	0.000
53	59.018	-3.645	0.000
54	64.307	-2.282	0.000
55	69.724	-1.029	0.000
56	75.132	0.013	0.000
57	80.381	0.775	0.000
58	85.314	1.212	0.000
59	89.755	1.296	0.000
60	93.491	1.083	0.000
61	96.391	0.721	0.000
62	98.422	0.357	0.000
63	99.611	0.097	0.000
64	100.000	0.000	0.000

Liite 3. S831-siipiprofiilin koordinaatit

	X	Y	Z
1	100.000	0.000	0.000
2	99.614	0.106	0.000
3	98.514	0.481	0.000
4	96.834	1.157	0.000
5	94.699	2.083	0.000
6	92.180	3.167	0.000
7	89.294	4.327	0.000
8	86.035	5.544	0.000
9	82.460	6.818	0.000
10	78.632	8.116	0.000
11	74.610	9.394	0.000
12	70.445	10.608	0.000
13	66.185	11.707	0.000
14	61.871	12.640	0.000
15	57.522	13.349	0.000
16	53.137	13.799	0.000
17	48.707	13.978	0.000
18	44.223	13.917	0.000
19	39.728	13.659	0.000
20	35.269	13.226	0.000
21	30.899	12.638	0.000
22	26.663	11.912	0.000
23	22.608	11.064	0.000
24	18.777	10.113	0.000
25	15.212	9.077	0.000
26	11.951	7.975	0.000
27	9.031	6.828	0.000
28	6.483	5.655	0.000
29	4.333	4.479	0.000
30	2.606	3.319	0.000
31	1.308	2.201	0.000
32	0.449	1.168	0.000
33	0.036	0.277	0.000
34	0.004	0.088	0.000
35	0.004	-0.080	0.000
36	0.017	-0.155	0.000
37	0.041	-0.221	0.000
38	0.080	-0.281	0.000
39	0.134	-0.340	0.000
40	0.280	-0.458	0.000
41	0.966	-0.795	0.000
42	2.422	-1.170	0.000
43	4.525	-1.480	0.000
44	7.229	-1.796	0.000
45	10.441	-2.131	0.000
46	14.105	-2.479	0.000
47	18.146	-2.831	0.000
48	22.509	-3.171	0.000
49	27.122	-3.485	0.000
50	31.929	-3.752	0.000
51	36.859	-3.951	0.000
52	41.855	-4.054	0.000
53	46.850	-4.013	0.000
54	51.847	-3.767	0.000
55	56.861	-3.326	0.000
56	61.889	-2.718	0.000
57	66.924	-1.993	0.000
58	71.934	-1.226	0.000
59	76.865	-0.492	0.000
60	81.639	0.118	0.000
61	86.130	0.530	0.000
62	90.193	0.707	0.000
63	93.666	0.668	0.000
64	96.429	0.489	0.000
65	98.416	0.263	0.000
66	99.606	0.077	0.000
67	100.000	0.000	0.000

Liite 4. Lavan koordinaatit

X	Y	Z
-3.12500e-01	1.00000e+00	1.00971e-15
9.37500e-01	1.00000e+00	5.42101e-15
9.22110e-01	1.00000e+00	1.36436e-01
8.91710e-01	1.00000e+00	2.34469e-01
8.47048e-01	1.00000e+00	3.23321e-01
7.89223e-01	1.00000e+00	4.03888e-01
7.19660e-01	1.00000e+00	4.73839e-01
6.40071e-01	1.00000e+00	5.32034e-01
5.52417e-01	1.00000e+00	5.76853e-01
4.58855e-01	1.00000e+00	6.07393e-01
3.61689e-01	1.00000e+00	6.22827e-01
2.63311e-01	1.00000e+00	6.22827e-01
1.66145e-01	1.00000e+00	6.07393e-01
7.25833e-02	1.00000e+00	5.76853e-01
-1.50714e-02	1.00000e+00	5.32034e-01
-9.46602e-02	1.00000e+00	4.73839e-01
-1.64223e-01	1.00000e+00	4.03888e-01
-2.22048e-01	1.00000e+00	3.23321e-01
-2.66710e-01	1.00000e+00	2.34469e-01
-2.97110e-01	1.00000e+00	1.36436e-01
-3.12500e-01	1.00000e+00	1.00971e-15
-3.12500e-01	1.00000e+00	1.00971e-15
-2.97110e-01	1.00000e+00	-1.36436e-01
-2.66710e-01	1.00000e+00	-2.34469e-01
-2.22048e-01	1.00000e+00	-3.23321e-01
-1.64223e-01	1.00000e+00	-4.03888e-01
-9.46602e-02	1.00000e+00	-4.73839e-01
-1.50714e-02	1.00000e+00	-5.32034e-01
7.25833e-02	1.00000e+00	-5.76853e-01
1.66145e-01	1.00000e+00	-6.07393e-01
2.63311e-01	1.00000e+00	-6.22827e-01
3.61689e-01	1.00000e+00	-6.22827e-01
4.58855e-01	1.00000e+00	-6.07393e-01
5.52417e-01	1.00000e+00	-5.76853e-01
6.40071e-01	1.00000e+00	-5.32034e-01
7.19660e-01	1.00000e+00	-4.73839e-01
7.89223e-01	1.00000e+00	-4.03888e-01
8.47048e-01	1.00000e+00	-3.23321e-01
8.91710e-01	1.00000e+00	-2.34469e-01
9.22110e-01	1.00000e+00	-1.36436e-01
9.37500e-01	1.00000e+00	-7.30319e-15
-3.12500e-01	1.00000e+00	1.00971e-15
-5.98425e-01	3.27273e+00	-5.74583e-02
1.79577e+00	3.27273e+00	1.69234e-01
1.76532e+00	3.27273e+00	2.78464e-01
1.70486e+00	3.27273e+00	3.63056e-01
1.61618e+00	3.27273e+00	4.43690e-01
1.50228e+00	3.27273e+00	5.15571e-01
1.36597e+00	3.27273e+00	5.76615e-01
1.21050e+00	3.27273e+00	6.26467e-01
1.03958e+00	3.27273e+00	6.64447e-01
8.57512e-01	3.27273e+00	6.89256e-01
6.68801e-01	3.27273e+00	7.00044e-01
4.78263e-01	3.27273e+00	6.95528e-01
2.90779e-01	3.27273e+00	6.74626e-01
1.11234e-01	3.27273e+00	6.36111e-01
-5.50913e-02	3.27273e+00	5.75570e-01
-2.04521e-01	3.27273e+00	4.96977e-01
-3.33891e-01	3.27273e+00	4.05675e-01
-4.40179e-01	3.27273e+00	3.04487e-01
-5.20994e-01	3.27273e+00	1.97596e-01
-5.74563e-01	3.27273e+00	8.66261e-02
-5.98425e-01	3.27273e+00	-5.74583e-02

-5.98425e-01	3.27273e+00	-5.74583e-02
-5.64279e-01	3.27273e+00	-1.89992e-01
-5.01678e-01	3.27273e+00	-2.88141e-01
-4.11494e-01	3.27273e+00	-3.78265e-01
-2.95997e-01	3.27273e+00	-4.60220e-01
-1.58335e-01	3.27273e+00	-5.29798e-01
-2.50810e-03	3.27273e+00	-5.81887e-01
1.65398e-01	3.27273e+00	-6.00859e-01
3.41278e-01	3.27273e+00	-5.86591e-01
5.22546e-01	3.27273e+00	-5.50384e-01
7.05806e-01	3.27273e+00	-4.99921e-01
8.87069e-01	3.27273e+00	-4.39739e-01
1.06216e+00	3.27273e+00	-3.73075e-01
1.22698e+00	3.27273e+00	-3.03050e-01
1.37739e+00	3.27273e+00	-2.30630e-01
1.50959e+00	3.27273e+00	-1.57231e-01
1.62019e+00	3.27273e+00	-8.32591e-02
1.70630e+00	3.27273e+00	-9.80664e-03
1.76555e+00	3.27273e+00	6.53281e-02
1.79577e+00	3.27273e+00	1.69234e-01
-5.98425e-01	3.27273e+00	-5.74583e-02
-6.81524e-01	5.54545e+00	-1.09998e-01
2.04553e+00	5.54545e+00	3.23979e-01
2.01008e+00	5.54545e+00	3.30468e-01
1.93949e+00	5.54545e+00	3.46820e-01
1.83605e+00	5.54545e+00	3.69231e-01
1.70387e+00	5.54545e+00	3.87189e-01
1.54623e+00	5.54545e+00	4.00167e-01
1.36679e+00	5.54545e+00	4.09177e-01
1.16977e+00	5.54545e+00	4.15326e-01
9.60167e-01	5.54545e+00	4.17463e-01
7.43202e-01	5.54545e+00	4.15195e-01
5.24538e-01	5.54545e+00	4.06550e-01
3.09922e-01	5.54545e+00	3.89457e-01
1.05153e-01	5.54545e+00	3.61079e-01
-8.30838e-02	5.54545e+00	3.11739e-01
-2.50953e-01	5.54545e+00	2.47709e-01
-3.95310e-01	5.54545e+00	1.76806e-01
-5.12911e-01	5.54545e+00	1.02742e-01
-6.01293e-01	5.54545e+00	3.00654e-02
-6.58699e-01	5.54545e+00	-3.67853e-02
-6.81524e-01	5.54545e+00	-1.09998e-01
-6.81524e-01	5.54545e+00	-1.09998e-01
-6.39010e-01	5.54545e+00	-1.61097e-01
-5.64315e-01	5.54545e+00	-2.03404e-01
-4.57996e-01	5.54545e+00	-2.43982e-01
-3.22765e-01	5.54545e+00	-2.81224e-01
-1.62535e-01	5.54545e+00	-3.10541e-01
1.75811e-02	5.54545e+00	-3.23833e-01
2.08842e-01	5.54545e+00	-2.93594e-01
4.06596e-01	5.54545e+00	-2.20923e-01
6.09312e-01	5.54545e+00	-1.28688e-01
8.14044e-01	5.54545e+00	-3.20819e-02
1.01675e+00	5.54545e+00	6.02093e-02
1.21298e+00	5.54545e+00	1.42475e-01
1.39835e+00	5.54545e+00	2.09969e-01
1.56809e+00	5.54545e+00	2.62184e-01
1.71787e+00	5.54545e+00	2.98814e-01
1.84373e+00	5.54545e+00	3.20774e-01
1.94225e+00	5.54545e+00	3.29436e-01
2.01052e+00	5.54545e+00	3.27685e-01
2.04553e+00	5.54545e+00	3.23979e-01
-6.81524e-01	5.54545e+00	-1.09998e-01
-6.35014e-01	7.81818e+00	-9.46560e-02
1.90594e+00	7.81818e+00	2.77776e-01
1.87301e+00	7.81818e+00	2.84519e-01

1.80733e+00	7.81818e+00	3.02130e-01
1.71089e+00	7.81818e+00	3.27740e-01
1.58740e+00	7.81818e+00	3.51551e-01
1.43997e+00	7.81818e+00	3.72387e-01
1.27215e+00	7.81818e+00	3.90373e-01
1.08807e+00	7.81818e+00	4.04905e-01
8.92518e-01	7.81818e+00	4.14022e-01
6.90640e-01	7.81818e+00	4.15029e-01
4.87664e-01	7.81818e+00	4.06177e-01
2.88955e-01	7.81818e+00	3.85143e-01
1.00092e-01	7.81818e+00	3.47684e-01
-7.42908e-02	7.81818e+00	2.95195e-01
-2.30533e-01	7.81818e+00	2.33295e-01
-3.65214e-01	7.81818e+00	1.66337e-01
-4.75258e-01	7.81818e+00	9.76057e-02
-5.58320e-01	7.81818e+00	3.12992e-02
-6.12558e-01	7.81818e+00	-2.95954e-02
-6.35014e-01	7.81818e+00	-9.46560e-02
-6.35014e-01	7.81818e+00	-9.46560e-02
-5.98626e-01	7.81818e+00	-1.24441e-01
-5.32410e-01	7.81818e+00	-1.45008e-01
-4.37002e-01	7.81818e+00	-1.62644e-01
-3.14572e-01	7.81818e+00	-1.78205e-01
-1.68313e-01	7.81818e+00	-1.90167e-01
-2.14300e-03	7.81818e+00	-1.96246e-01
1.78712e-01	7.81818e+00	-1.89148e-01
3.68240e-01	7.81818e+00	-1.57951e-01
5.61505e-01	7.81818e+00	-1.00773e-01
7.54701e-01	7.81818e+00	-2.53666e-02
9.44552e-01	7.81818e+00	5.61019e-02
1.12806e+00	7.81818e+00	1.29791e-01
1.30132e+00	7.81818e+00	1.89646e-01
1.46004e+00	7.81818e+00	2.34338e-01
1.60017e+00	7.81818e+00	2.63702e-01
1.71800e+00	7.81818e+00	2.78839e-01
1.81009e+00	7.81818e+00	2.83091e-01
1.87355e+00	7.81818e+00	2.80725e-01
1.90594e+00	7.81818e+00	2.77776e-01
-6.35014e-01	7.81818e+00	-9.46560e-02
-6.03111e-01	1.00909e+01	-8.51558e-02
1.81017e+00	1.00909e+01	2.49356e-01
1.77896e+00	1.00909e+01	2.56116e-01
1.71670e+00	1.00909e+01	2.73934e-01
1.62519e+00	1.00909e+01	3.00345e-01
1.50788e+00	1.00909e+01	3.26037e-01
1.36777e+00	1.00909e+01	3.49616e-01
1.20825e+00	1.00909e+01	3.70875e-01
1.03335e+00	1.00909e+01	3.88589e-01
8.47618e-01	1.00909e+01	4.00536e-01
6.56073e-01	1.00909e+01	4.03235e-01
4.63645e-01	1.00909e+01	3.95045e-01
2.75426e-01	1.00909e+01	3.73596e-01
9.67677e-02	1.00909e+01	3.34217e-01
-6.85392e-02	1.00909e+01	2.82291e-01
-2.16970e-01	1.00909e+01	2.23056e-01
-3.45078e-01	1.00909e+01	1.59487e-01
-4.49913e-01	1.00909e+01	9.46296e-02
-5.29220e-01	1.00909e+01	3.24462e-02
-5.81163e-01	1.00909e+01	-2.46803e-02
-6.03111e-01	1.00909e+01	-8.51558e-02
-6.03111e-01	1.00909e+01	-8.51558e-02
-5.69883e-01	1.00909e+01	-1.06561e-01
-5.08373e-01	1.00909e+01	-1.18892e-01
-4.19245e-01	1.00909e+01	-1.28000e-01
-3.04427e-01	1.00909e+01	-1.35611e-01
-1.66772e-01	1.00909e+01	-1.41346e-01
-9.66712e-03	1.00909e+01	-1.45084e-01

1.63064e-01	1.00909e+01	-1.47051e-01
3.45100e-01	1.00909e+01	-1.32193e-01
5.30413e-01	1.00909e+01	-8.96503e-02
7.14963e-01	1.00909e+01	-2.42707e-02
8.95793e-01	1.00909e+01	5.08132e-02
1.07046e+00	1.00909e+01	1.19139e-01
1.23532e+00	1.00909e+01	1.74328e-01
1.38634e+00	1.00909e+01	2.14800e-01
1.51967e+00	1.00909e+01	2.40451e-01
1.63179e+00	1.00909e+01	2.52435e-01
1.71934e+00	1.00909e+01	2.54741e-01
1.77953e+00	1.00909e+01	2.52043e-01
1.81017e+00	1.00909e+01	2.49356e-01
-6.03111e-01	1.00909e+01	-8.51558e-02
-5.83147e-01	1.23636e+01	-8.02174e-02
1.75023e+00	1.23636e+01	2.34743e-01
1.72009e+00	1.23636e+01	2.41383e-01
1.65998e+00	1.23636e+01	2.58817e-01
1.57163e+00	1.23636e+01	2.84657e-01
1.45835e+00	1.23636e+01	3.09890e-01
1.32303e+00	1.23636e+01	3.33160e-01
1.16894e+00	1.23636e+01	3.54255e-01
9.99977e-01	1.23636e+01	3.71976e-01
8.20528e-01	1.23636e+01	3.84162e-01
6.35426e-01	1.23636e+01	3.87430e-01
4.49433e-01	1.23636e+01	3.80179e-01
2.67462e-01	1.23636e+01	3.60099e-01
9.46690e-02	1.23636e+01	3.22658e-01
-6.52644e-02	1.23636e+01	2.73046e-01
-2.08913e-01	1.23636e+01	2.16311e-01
-3.32938e-01	1.23636e+01	1.55319e-01
-4.34475e-01	1.23636e+01	9.30014e-02
-5.11332e-01	1.23636e+01	3.31799e-02
-5.61727e-01	1.23636e+01	-2.18488e-02
-5.83147e-01	1.23636e+01	-8.02174e-02
-5.83147e-01	1.23636e+01	-8.02174e-02
-5.51109e-01	1.23636e+01	-1.01018e-01
-4.91707e-01	1.23636e+01	-1.13146e-01
-4.05605e-01	1.23636e+01	-1.22256e-01
-2.94669e-01	1.23636e+01	-1.30007e-01
-1.61658e-01	1.23636e+01	-1.36024e-01
-9.84234e-03	1.23636e+01	-1.40178e-01
1.57080e-01	1.23636e+01	-1.42674e-01
3.33053e-01	1.23636e+01	-1.28942e-01
5.12288e-01	1.23636e+01	-8.84668e-02
6.90865e-01	1.23636e+01	-2.59191e-02
8.65880e-01	1.23636e+01	4.60198e-02
1.03492e+00	1.23636e+01	1.11448e-01
1.19443e+00	1.23636e+01	1.64216e-01
1.34051e+00	1.23636e+01	2.02808e-01
1.46945e+00	1.23636e+01	2.27138e-01
1.57785e+00	1.23636e+01	2.38333e-01
1.66247e+00	1.23636e+01	2.40260e-01
1.72062e+00	1.23636e+01	2.37446e-01
1.75023e+00	1.23636e+01	2.34743e-01
-5.83147e-01	1.23636e+01	-8.02174e-02
-5.63601e-01	1.46364e+01	-7.55197e-02
1.69155e+00	1.46364e+01	2.20848e-01
1.66246e+00	1.46364e+01	2.27364e-01
1.60445e+00	1.46364e+01	2.44409e-01
1.51919e+00	1.46364e+01	2.69669e-01
1.40984e+00	1.46364e+01	2.94428e-01
1.27920e+00	1.46364e+01	3.17365e-01
1.13042e+00	1.46364e+01	3.38264e-01
9.67253e-01	1.46364e+01	3.55954e-01
7.93944e-01	1.46364e+01	3.68333e-01

6.15143e-01	1.46364e+01	3.72116e-01
4.35446e-01	1.46364e+01	3.65740e-01
2.59591e-01	1.46364e+01	3.46957e-01
9.25430e-02	1.46364e+01	3.11374e-01
-6.21233e-02	1.46364e+01	2.63988e-01
-2.01083e-01	1.46364e+01	2.09667e-01
-3.21099e-01	1.46364e+01	1.51167e-01
-4.19396e-01	1.46364e+01	9.13101e-02
-4.93844e-01	1.46364e+01	3.37813e-02
-5.42713e-01	1.46364e+01	-1.92070e-02
-5.63601e-01	1.46364e+01	-7.55197e-02
-5.63601e-01	1.46364e+01	-7.55197e-02
-5.32723e-01	1.46364e+01	-9.57218e-02
-4.75380e-01	1.46364e+01	-1.07639e-01
-3.92235e-01	1.46364e+01	-1.16730e-01
-2.85096e-01	1.46364e+01	-1.24593e-01
-1.56624e-01	1.46364e+01	-1.30855e-01
-9.98186e-03	1.46364e+01	-1.35381e-01
1.51260e-01	1.46364e+01	-1.38357e-01
3.21299e-01	1.46364e+01	-1.25687e-01
4.94580e-01	1.46364e+01	-8.71926e-02
6.67300e-01	1.46364e+01	-2.73743e-02
8.36611e-01	1.46364e+01	4.15282e-02
1.00013e+00	1.46364e+01	1.04162e-01
1.15440e+00	1.46364e+01	1.54597e-01
1.29564e+00	1.46364e+01	1.91383e-01
1.42029e+00	1.46364e+01	2.14451e-01
1.52503e+00	1.46364e+01	2.24899e-01
1.60679e+00	1.46364e+01	2.26474e-01
1.66296e+00	1.46364e+01	2.23559e-01
1.69155e+00	1.46364e+01	2.20848e-01
-5.63601e-01	1.46364e+01	-7.55197e-02
-5.37301e-01	1.69091e+01	-6.98374e-02
1.61259e+00	1.69091e+01	2.04068e-01
1.58490e+00	1.69091e+01	2.10386e-01
1.52969e+00	1.69091e+01	2.26845e-01
1.44855e+00	1.69091e+01	2.51234e-01
1.34445e+00	1.69091e+01	2.75237e-01
1.22005e+00	1.69091e+01	2.97584e-01
1.07837e+00	1.69091e+01	3.18056e-01
9.22968e-01	1.69091e+01	3.35526e-01
7.57879e-01	1.69091e+01	3.47972e-01
5.87527e-01	1.69091e+01	3.52250e-01
4.16282e-01	1.69091e+01	3.46850e-01
2.48651e-01	1.69091e+01	3.29615e-01
8.93491e-02	1.69091e+01	2.96338e-01
-5.82000e-02	1.69091e+01	2.51769e-01
-1.90809e-01	1.69091e+01	2.00533e-01
-3.05384e-01	1.69091e+01	1.45245e-01
-3.99270e-01	1.69091e+01	8.85807e-02
-4.70423e-01	1.69091e+01	3.40456e-02
-5.17186e-01	1.69091e+01	-1.62594e-02
-5.37301e-01	1.69091e+01	-6.98374e-02
-5.37301e-01	1.69091e+01	-6.98374e-02
-5.07955e-01	1.69091e+01	-8.92027e-02
-4.53362e-01	1.69091e+01	-1.00773e-01
-3.74172e-01	1.69091e+01	-1.09748e-01
-2.72116e-01	1.69091e+01	-1.17643e-01
-1.49729e-01	1.69091e+01	-1.24094e-01
-1.00203e-02	1.69091e+01	-1.28958e-01
1.43604e-01	1.69091e+01	-1.32400e-01
3.05671e-01	1.69091e+01	-1.20967e-01
4.70923e-01	1.69091e+01	-8.49403e-02
6.35721e-01	1.69091e+01	-2.85933e-02
7.97305e-01	1.69091e+01	3.64222e-02
9.53344e-01	1.69091e+01	9.54863e-02
1.10053e+00	1.69091e+01	1.42962e-01

1.23525e+00	1.69091e+01	1.77482e-01
1.35410e+00	1.69091e+01	1.98993e-01
1.45395e+00	1.69091e+01	2.08554e-01
1.53185e+00	1.69091e+01	2.09747e-01
1.58536e+00	1.69091e+01	2.06758e-01
1.61259e+00	1.69091e+01	2.04068e-01
-5.37301e-01	1.69091e+01	-6.98374e-02
-4.93813e-01	1.91818e+01	-6.23255e-02
1.48205e+00	1.91818e+01	1.81973e-01
1.45663e+00	1.91818e+01	1.87871e-01
1.40597e+00	1.91818e+01	2.03179e-01
1.33152e+00	1.91818e+01	2.25859e-01
1.23597e+00	1.91818e+01	2.48263e-01
1.12177e+00	1.91818e+01	2.69214e-01
9.91691e-01	1.91818e+01	2.88503e-01
8.48998e-01	1.91818e+01	3.05079e-01
6.97387e-01	1.91818e+01	3.17075e-01
5.40912e-01	1.91818e+01	3.21584e-01
3.83585e-01	1.91818e+01	3.17206e-01
2.29538e-01	1.91818e+01	3.01945e-01
8.30862e-02	1.91818e+01	2.71918e-01
-5.26068e-02	1.91818e+01	2.31478e-01
-1.74598e-01	1.91818e+01	1.84863e-01
-2.80037e-01	1.91818e+01	1.34464e-01
-3.66476e-01	1.91818e+01	8.27306e-02
-4.32023e-01	1.91818e+01	3.28758e-02
-4.75152e-01	1.91818e+01	-1.31763e-02
-4.93813e-01	1.91818e+01	-6.23255e-02
-4.93813e-01	1.91818e+01	-6.23255e-02
-4.66921e-01	1.91818e+01	-8.02148e-02
-4.16810e-01	1.91818e+01	-9.10296e-02
-3.44095e-01	1.91818e+01	-9.95434e-02
-2.50372e-01	1.91818e+01	-1.07143e-01
-1.37966e-01	1.91818e+01	-1.13485e-01
-9.64367e-03	1.91818e+01	-1.18429e-01
1.31467e-01	1.91818e+01	-1.22114e-01
2.80384e-01	1.91818e+01	-1.12163e-01
4.32310e-01	1.91818e+01	-7.96303e-02
5.83888e-01	1.91818e+01	-2.84297e-02
7.32544e-01	1.91818e+01	3.07449e-02
8.76085e-01	1.91818e+01	8.44714e-02
1.01145e+00	1.91818e+01	1.27583e-01
1.13533e+00	1.91818e+01	1.58835e-01
1.24458e+00	1.91818e+01	1.78190e-01
1.33633e+00	1.91818e+01	1.86634e-01
1.40790e+00	1.91818e+01	1.87465e-01
1.45704e+00	1.91818e+01	1.84537e-01
1.48205e+00	1.91818e+01	1.81973e-01
-4.93813e-01	1.91818e+01	-6.23255e-02
-4.65627e-01	2.14545e+01	-5.87681e-02
1.39746e+00	2.14545e+01	1.71586e-01
1.37349e+00	2.14545e+01	1.77148e-01
1.32572e+00	2.14545e+01	1.91582e-01
1.25552e+00	2.14545e+01	2.12968e-01
1.16543e+00	2.14545e+01	2.34093e-01
1.05775e+00	2.14545e+01	2.53848e-01
9.35088e-01	2.14545e+01	2.72036e-01
8.00539e-01	2.14545e+01	2.87666e-01
6.57581e-01	2.14545e+01	2.98977e-01
5.10038e-01	2.14545e+01	3.03229e-01
3.61691e-01	2.14545e+01	2.99101e-01
2.16436e-01	2.14545e+01	2.84710e-01
7.83439e-02	2.14545e+01	2.56397e-01
-4.96042e-02	2.14545e+01	2.18266e-01
-1.64633e-01	2.14545e+01	1.74312e-01
-2.64053e-01	2.14545e+01	1.26789e-01

-3.45558e-01	2.14545e+01	7.80086e-02
-4.07365e-01	2.14545e+01	3.09993e-02
-4.48031e-01	2.14545e+01	-1.24242e-02
-4.65627e-01	2.14545e+01	-5.87681e-02
-4.65627e-01	2.14545e+01	-5.87681e-02
-4.40270e-01	2.14545e+01	-7.56363e-02
-3.93019e-01	2.14545e+01	-8.58338e-02
-3.24455e-01	2.14545e+01	-9.38617e-02
-2.36081e-01	2.14545e+01	-1.01028e-01
-1.30091e-01	2.14545e+01	-1.07008e-01
-9.09323e-03	2.14545e+01	-1.11669e-01
1.23963e-01	2.14545e+01	-1.15144e-01
2.64380e-01	2.14545e+01	-1.05761e-01
4.07635e-01	2.14545e+01	-7.50852e-02
5.50561e-01	2.14545e+01	-2.68070e-02
6.90732e-01	2.14545e+01	2.89901e-02
8.26080e-01	2.14545e+01	7.96499e-02
9.53719e-01	2.14545e+01	1.20301e-01
1.07053e+00	2.14545e+01	1.49769e-01
1.17354e+00	2.14545e+01	1.68020e-01
1.26006e+00	2.14545e+01	1.75981e-01
1.32754e+00	2.14545e+01	1.76765e-01
1.37388e+00	2.14545e+01	1.74004e-01
1.39746e+00	2.14545e+01	1.71586e-01
-4.65627e-01	2.14545e+01	-5.87681e-02
-3.85113e-01	2.37273e+01	-3.71577e-02
1.15569e+00	2.37273e+01	1.07738e-01
1.13613e+00	2.37273e+01	1.12182e-01
1.09722e+00	2.37273e+01	1.24004e-01
1.03994e+00	2.37273e+01	1.42750e-01
9.66051e-01	2.37273e+01	1.64154e-01
8.77482e-01	2.37273e+01	1.86585e-01
7.76448e-01	2.37273e+01	2.09057e-01
6.65563e-01	2.37273e+01	2.29614e-01
5.47797e-01	2.37273e+01	2.45088e-01
4.26467e-01	2.37273e+01	2.50438e-01
3.04712e-01	2.37273e+01	2.43902e-01
1.85353e-01	2.37273e+01	2.27741e-01
7.12123e-02	2.37273e+01	2.03915e-01
-3.49991e-02	2.37273e+01	1.73967e-01
-1.30830e-01	2.37273e+01	1.40340e-01
-2.13998e-01	2.37273e+01	1.04696e-01
-2.82462e-01	2.37273e+01	6.79059e-02
-3.34651e-01	2.37273e+01	3.20996e-02
-3.69337e-01	2.37273e+01	-1.22698e-03
-3.85113e-01	2.37273e+01	-3.71577e-02
-3.85113e-01	2.37273e+01	-3.71577e-02
-3.64931e-01	2.37273e+01	-4.81565e-02
-3.26644e-01	2.37273e+01	-5.30900e-02
-2.70819e-01	2.37273e+01	-5.58639e-02
-1.98713e-01	2.37273e+01	-5.76630e-02
-1.12085e-01	2.37273e+01	-5.86607e-02
-1.31024e-02	2.37273e+01	-5.84256e-02
9.57610e-02	2.37273e+01	-5.65360e-02
2.11554e-01	2.37273e+01	-5.05752e-02
3.31165e-01	2.37273e+01	-3.81752e-02
4.51446e-01	2.37273e+01	-1.71756e-02
5.69646e-01	2.37273e+01	9.98536e-03
6.83195e-01	2.37273e+01	3.93655e-02
7.89652e-01	2.37273e+01	6.63674e-02
8.86621e-01	2.37273e+01	8.77600e-02
9.71816e-01	2.37273e+01	1.01840e-01
1.04307e+00	2.37273e+01	1.08911e-01
1.09846e+00	2.37273e+01	1.10685e-01
1.13640e+00	2.37273e+01	1.09358e-01
1.15569e+00	2.37273e+01	1.07738e-01
-3.85113e-01	2.37273e+01	-3.71577e-02

-1.86734e-01	2.60000e+01	-1.69402e-02
5.60360e-01	2.60000e+01	4.90251e-02
5.50903e-01	2.60000e+01	5.11654e-02
5.32093e-01	2.60000e+01	5.68868e-02
5.04389e-01	2.60000e+01	6.60756e-02
4.68622e-01	2.60000e+01	7.68240e-02
4.25723e-01	2.60000e+01	8.82733e-02
3.76772e-01	2.60000e+01	9.98683e-02
3.23044e-01	2.60000e+01	1.10554e-01
2.65985e-01	2.60000e+01	1.18633e-01
2.07221e-01	2.60000e+01	1.21399e-01
1.48272e-01	2.60000e+01	1.17936e-01
9.04706e-02	2.60000e+01	1.09699e-01
3.51330e-02	2.60000e+01	9.81081e-02
-1.64034e-02	2.60000e+01	8.37368e-02
-6.29350e-02	2.60000e+01	6.76880e-02
-1.03350e-01	2.60000e+01	5.07491e-02
-1.36646e-01	2.60000e+01	3.32448e-02
-1.62052e-01	2.60000e+01	1.61722e-02
-1.78970e-01	2.60000e+01	2.56248e-04
-1.86734e-01	2.60000e+01	-1.69402e-02
-1.86734e-01	2.60000e+01	-1.69402e-02
-1.77023e-01	2.60000e+01	-2.19955e-02
-1.58533e-01	2.60000e+01	-2.40584e-02
-1.31547e-01	2.60000e+01	-2.50398e-02
-9.66773e-02	2.60000e+01	-2.55239e-02
-5.47702e-02	2.60000e+01	-2.56362e-02
-6.87814e-03	2.60000e+01	-2.51374e-02
4.57962e-02	2.60000e+01	-2.37732e-02
1.01910e-01	2.60000e+01	-2.10521e-02
1.60013e-01	2.60000e+01	-1.62598e-02
2.18530e-01	2.60000e+01	-7.85820e-03
2.76056e-01	2.60000e+01	3.52556e-03
3.31264e-01	2.60000e+01	1.65938e-02
3.82967e-01	2.60000e+01	2.90638e-02
4.30020e-01	2.60000e+01	3.91564e-02
4.71328e-01	2.60000e+01	4.58877e-02
5.05851e-01	2.60000e+01	4.93624e-02
5.32667e-01	2.60000e+01	5.03286e-02
5.51025e-01	2.60000e+01	4.97752e-02
5.60360e-01	2.60000e+01	4.90251e-02
-1.86734e-01	2.60000e+01	-1.69402e-02

Liite 5. Suorituskyvyn kerroin TSR:n funktiona

