

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Samuli Kankkunen

Pystyakselituulivoimalan suunnittelu

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2014



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Kesäkuu 2014**  
**Kone- ja tuotantotekniikan koulutus-**  
**ohjelma**

Karjalankatu 3  
80100 JOENSUU  
+358 50 260 6800

Tekijä  
Samuli Kankkunen

Nimike  
Pystyakselitiulivoimalan suunnittelu  
Toimeksiantaja  
Suhmuran Metalli Ky

#### Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella pystyakselitiulivoimala, jota käytetään apuna Suhmuran Metalli Ky:n hallin lämmityksessä. Voimala pystytetään tehtaan takana olevien peltojen keskelle myöhemmin tänä vuonna. Voimala pyörittää ilmalämpöpumppua mikä sijoitetaan Suhmuran Metalli Ky:n hallin seinään.

Tämä työ on prototyyppi mahdollisesti myöhemmin vuoden aikana valmistettavasta tuotteesta. Voimala suunniteltiin käyttäen Creo Parametric 2.0 -ohjelmistoa. Lujuuslaskennat suoritettiin Creo simulate -ohjelmistolla. Ohjelmisto käyttää laskennoissa hyödyksi alkioita. Laskettava kapale jaetaan pienin alkiioihin joiden avulla laskutoimitus toteutetaan.

Mahdolliset koneistukset sekä kasaaminen suoritettiin Suhmuran Metalli Ky:n tiloissa Joensuun Suhmurassa. Lopullisen voimalan pyyhkäisyypinta-alaksi valikoitui  $3.75 m^2$ . Generaattorin teho on suuruudeltaan 2.2 kW ja latausvirta on 9.5 A.

Kieli  
suomi

Sivuja 56  
Liitteet 0  
Liitesivumäärä 0

Asiasanat  
tuulivoima, VAWT, energia, pientuulivoimala, vihreä energia



**THESIS**  
**June 2014**  
**Degree Programme in Mechanical and  
Production engineering**  
Karjalankatu 3  
FI 80200 JOENSUU  
FINLAND  
+358 50 260 6800

Author(s)  
Samuli Kankkunen

Title  
Vertical Axis Windmill Design

Commissioned by  
Suhmuran Metalli Ky

#### Abstract

The purpose of this thesis was to design a small vertical axis wind turbine. The turbine is be used as an extra heater in Suhmuran Metalli factory area. The plant is designed to be located in the fields behind the factory later this year. The wind turbine is powering an air source heat pump which will be placed inside the factory.

This is a prototype of a wind turbine that may be built later this year. The structural analyses and 3D-designing were carried out by using Creo parametric 2.0 -software. The structural analyses were made by using Creo simulate software. The program divides the part into smaller areas which then are calculated by the program. This eases the program calculations and speeds up the process.

The prototype machining and assembling were implemented in Suhmuran Metalli factory in Su-hmura, Joensuu. In the final design in the wind turbine the land swept area is  $3.75 m^2$  and the size of the generator is 2.2 kW. The generator can produce a 9.5 A charging current.

Language  
Finnish

Pages 56  
Appendices 0  
Pages of Appendices 0

#### Keywords

wind power, VAWT, energy, small vertical wind turbine, green energy

# Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

Symbolit .....	5
1 Johdanto .....	6
1.1 Työn tarkoitus .....	6
1.2 Kohdeyritys .....	6
1.3 Työn rajaus .....	7
2 Tuulivoimalan perusteet .....	8
2.1 Pientuulivoimala .....	10
2.2 Kaavastot .....	10
2.3 Tuulivoima Suomessa .....	13
2.4 Tuuli .....	14
2.5 Luvat ja ympäristöhaitat .....	18
2.5.1 Luvat .....	18
2.5.2 Ympäristöhaitat .....	18
3 Toteutus .....	19
3.1 Työssä käytetyt ohjelmistot .....	19
3.1.1 Creo parametric 2.0 .....	19
3.1.2 Creo simulate .....	19
3.2 Keskiakseli .....	20
3.3 Siivet .....	26
3.3.1 Siipien profiili .....	26
3.3.2 Siipien toteutus .....	27
3.3.3 Siiven muodon testaus .....	28
3.3.4 Muotti .....	30
3.3.5 Laminointi .....	31
3.4 Magneettilevy .....	32
3.5 Akusto ja vaihtosuuntaaja .....	34
3.5.1 Akusto .....	34
3.5.2 Vaihtosuuntaaja .....	36
3.6 Johdotus .....	38
3.7 Generaattori .....	39
3.8 Masto .....	41
3.9 Vaihdelaatikko .....	43
3.9.1 Kaavastot .....	43
3.9.2 Toteutus .....	44
3.10 Ilmalämpöpumppu .....	45
3.11 Kokoonpano .....	48
3.12 Kustannusarvio .....	52
3.12.1 Omavalmisteiset kappaleet .....	52
3.12.2 Tilattavat kappaleet .....	53
4 Pohdinta .....	54
Lähteet .....	55

## Symbolit

$P$  = Teho (W)

$\rho$  = Ilman tiheys ( $kg/m^3$ )

$v$  = Nopeus (m/s)

$v_{yht}$  = Keskinopeus (m/s)

$A$  = Pinta-ala ( $m^2$ )

$C_p$  = Tehokerroin

$C_t$  = Työntövoimakkeroin

$l$  = Pituus (mm)

$r$  = Säde (mm)

$\omega$  = Kulmanopeus (rad/s)

$M$  = Vääntömomentti (Nmm)

$T_{sall}$  = Sallittu leikkausmomentti (MPa)

$d$  = Halkaisija (mm)

$f$  = Taipuma (mm)

$F$  = Voima (N)

$I$  = Neliömomentti ( $mm^4$ )

$U$  = Jännite (V)

$I$  = Virta (A)

$R$  = Resistanssi ( $\Omega$ )

$R_\rho$  = Resistiivisyys ( $\Omega mm^2/m$ )

$n$  = Pyörimisnopeus (1/m)

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tarkoitus

Tämän työn tarkoituksena on suunnitella toimiva ja taloudellisesti kannattava pientuuli-voimala jota käytetään apuna hallin lämmityksessä. Ajatuksena olisi että voimala pyörittäisi ilmalämpöpumppua, mikäli voimalasta saadaan tarpeeksi energiaa. Tällä hetkellä hallia lämmitetään pelkästään öljyllä.

Tähän työhön valittiin pystyakselituuli-voimala sen takia, kun niihin ei tarvitse tehdä erikseen myrskynsuojausta, koska pyörimisnopeudet jäävät kovin alhaisiksi pois lukien Darrieus-tyypin voimala. Tämän tyyppisiin voimaloihin tarvitsee yleensä tehdä jonkin näköinen vaihteisto, että saadaan tarpeeksi suuri pyörimisnopeus generaattorin akselille.

Tavoitteena on suunnitella ja valmistaa toimiva järjestelmä, joka voisi toimia omatoimisesti ilman ulkoista sähköntuottoa. Koko hallin lämmitys vaatisi suuren lämmittimen, joten koko hallia ei tarvitse voimalan ilmalämpöpumpulla lämmittää.

## 1.2 Kohdeyritys

Suhmuran Metalli Ky on perheyritys, joka on perustettu vuonna 1986. Yritys toimi aluksi sivutulona maataloudelle, mutta kun maatilatoiminta kävi kannattamattomaksi niin päätuloksi tuli metallialihankinta. Yrityksen perustaja ja nykyinen johtaja on Jouko Kankkunen. Yrityksellä ei tällä hetkellä ole muita työntekijöitä. Liikevaihto on noin 500 000 € vuodessa.

Suhmuran Metalli Ky on pääsääntöisesti alihankintayritys, päämiehiä ovat tällä hetkellä esimerkiksi Alsiva Oy, Hydraulic Piippo Oy sekä Outotec Turula oy. Konekantaan kuuluu kuusi CNC-koneistuskeskusta sekä kaksi CNC-sorvia (Suhmuran Metalli Ky 2014.)

### 1.3 Työn raja

Tämän työn tavoitteena on suunnitella pysty akselituulivoimala, jolla pyritään pyörittämään käytettyä ilmalämpöpumppua. Ilmalämpöpumppu liitetään osaksi Suhmuran Metalli KY:n hallin lämmitystä. Hallissa on jo ennestään öljylämmitys mikä hoitaa lämmityksen kun tuulta ei ole tarpeeksi. Kustannuskatoksi on määritelty 10 000 €. Tähän pitää sisältyä voimala tarvittavilla komponenteilla, sekä ilmalämpöpumppu asennettuna.

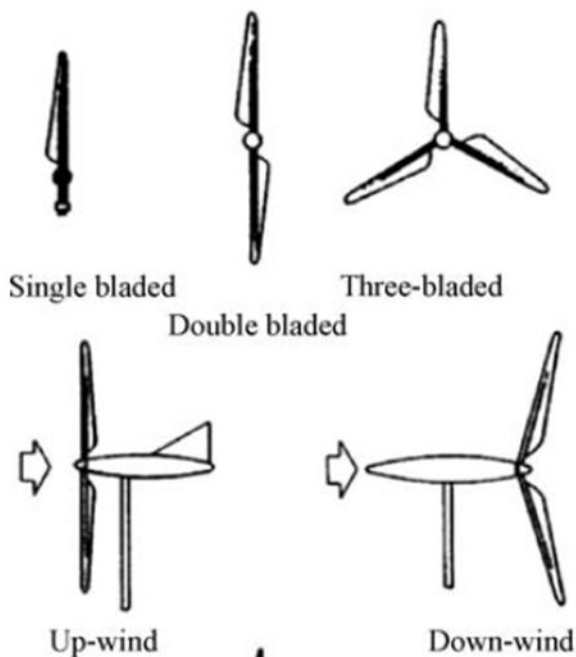
Huomioitavia asioita liittyen tähän työhön:

- tuotto (onko enemmän hyötyä vai haittaa)
- kustannukset
- meluhaitat
- ympäristö haitat (linnut, lepakot, maisema)
- tarvittavat luvat.

## 2 Tuulivoimalan perusteet

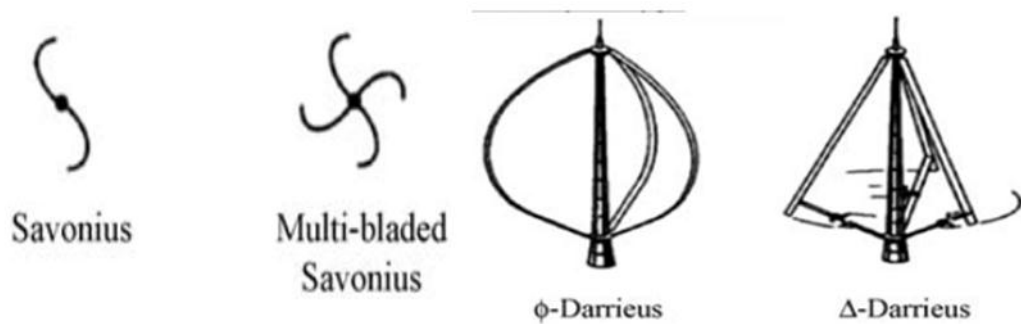
Tuulivoimala on laite, joka muuttaa tuulienergian sähköiseksi energiaksi. Tuulimylly on kone, joka muuttaa tuulienergian mekaaniseksi energiaksi. Tuulivoimaa on käytetty jo useiden vuosisatojen ajan erityisesti maaseudulla viljan jauhamiseen sekä veden pump-paukseen. Nykypäivänä tuulivoiman käyttö on yleistymässä, kun etsitään vaihtoehtoisia energian keräysmuotoja.

Tuulivoimalan perusidea on muuttaa tuulesta saatava voima energiaksi siipien avulla. Tuuli pyörittää siipiä, jotka ovat kiinni akselissa, joka johtaa generaattorille joko suoraan tai vaihteiston kautta. Generaattori sitten muuttaa tuulesta saadun energian sähköenergiaksi.

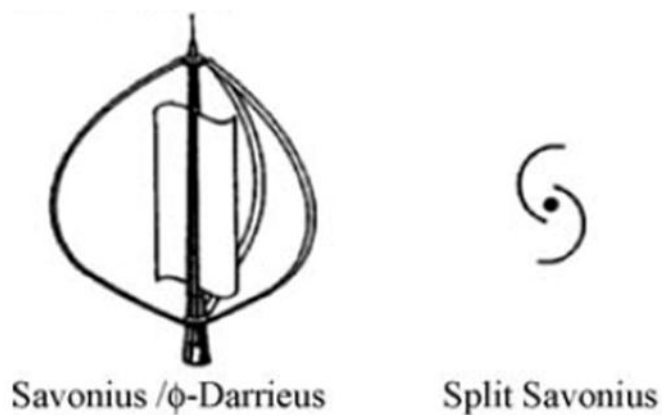


Kuva 1. Yleisimmät vaaka-akselivoimalat (Manwell J., McGovan J. & Rogers A 2009, 9).





Kuva 2. Pystyakselivoimaloita (Manwell, McGovan & Rogers 2009, 9).



Kuva 3. Yhdistelmä pystyakselivoimaloita (Manwell, McGovan & Rogers 2009, 10).

Kuvissa 1, 2 ja 3 on esitetty joitain yleisimpiä ja erikoisia voimalamalleja. Pienikokoiset voimalat ovat nykyisin yleistymässä, kun komponenttien hinnat ovat laskeneet sekä laitosten valmistajien määrät ovat kasvaneet. Tuulivoimalat jaetaan pääsääntöisesti kahteen eri lajiin vaaka-akseli ja pystyakselisiin voimaloihin, näistä jälkimmäinen eli vaaka-akselituulivoimala on käytetyin tyyppi moderneissa suurissa tuulivoimaloissa.

Ensimmäiset merkinnät historiassa pystyakselituulimyllyistä löytyy jo entisajan Persian ajoilta vuodelta 644 jaa. Seistan alueella joka on nykyisin Iran, näitä Seistan aikaisia myllyjä käytetään joissain määriin vielä nykyäänkin. (Manwell J., McGovan J. & Rogers A. 2009, 12.)

Sähkön tuotossa käytetään yleensä kolmilapaista etutuulipotkuria. tällä voimala tyypillä saavutetaan suuri pyörimisnopeus jota tarvitaan generaattorilla sähkön tuottoon. pyörimisnopeutta rajoittavia tekijöitä on mm. kärkinopeus, melu, generaattorin koko. Potkuri voi olla kapeampi, jos se pyörii nopeasti. Tästä syystä suurin osa nykypäiväisistä kolmilapaisen voimalan generaattoreista on pitkiä ja ohuita (Haapanen 2010, 6.)

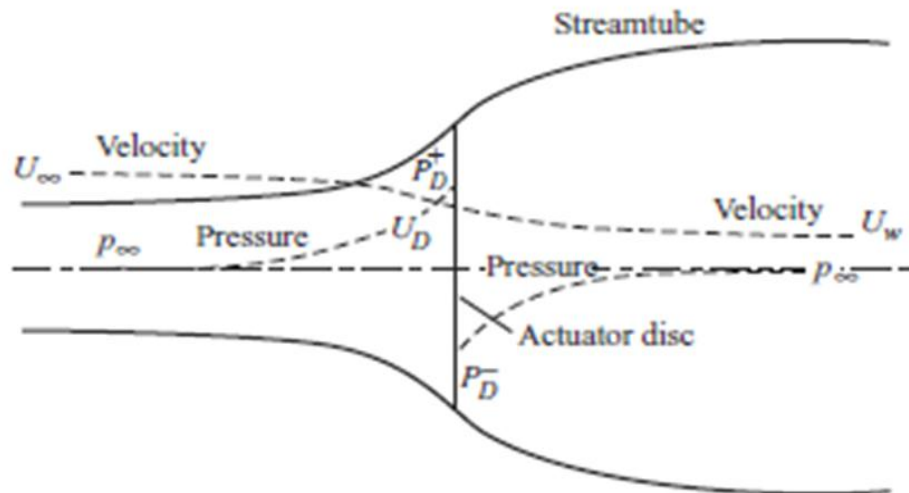
## 2.1 Pientuulivoimala

Tuulivoimala määritellään pientuulivoimalaksi silloin, kun siipien pyyhkäisyypinta-ala jää alle  $200 \text{ m}^2$  tarkoittaen että voimalan nimellisteho jää alle 50 kWh. Suunnitellessa pientuulivoimalaa kannattaa lähteä liikkeelle, miettimällä minkälaiseen tarkoitukseen on voimalaa rakentamassa, vedenpumpppaukseen, lämmitykseen, sähköntuottoon tai johonkin muuhun. Seuraava mietittävä asia on, minkälaisen voimalatyypin valitsee, pysty vai vaaka-akselivoimalan. Tässä työssä keskitytään pelkästään pystyakselivoimalatyypisiin voimaloihin, mutta suuri osa kaavoista toimii myös silloin, kun suunnitellaan vaaka-akselivoimalaa (Motiva 2014.)

Voimalan suunnittelussa kannattaa aina selvittää oman kunnan lupa-asiat ennen kun alkaa edes suunnitella konetta. Naapurisovun ylläpitämiseksi on myös suotavaa ottaa asia puheeksi naapureiden kanssa.

## 2.2 Kaavastot

Tuulivoimalan suunnittelussa on hyvä lähteä liikkeelle tarvittavan tehon laskemisesta. Seuraavassa osiossa käydään läpi peruslaskuja joilla mitoitetaan voimalasta saatavaa tehoa. Alapuolella olevasta kuviosta nähdään hyvin ilmavirtauksen muutos kun se osuu roottoriin. Roottorin etupuolella ilmavirtauksen poikkileikkaus on pinta-alaltaan pienempi kuin roottorin jälkeisellä puolella, tämä johtuu siitä että ilmassa virtaus määrä pysyy samana mutta ilman nopeus pienenee tämän osuessa roottoriin.



Kuva 4. Tuulen virtaus tuulivoimalan läpi (Burton T., Jenkins N., Sharpe D. & Bossanyi E. 2011, 75).

$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_D U_D = \rho A_W U_W \quad (\text{Burton T., Jenkins N., Sharpe D. \& Bossanyi E. 2011, 76}).$$

$U$  = Tuulen nopeus (m/s)

$\infty$  = Tilanne roottorin etupuolella.

$D$  = Tilanne roottorissa.

$W$  = Tilanne roottorinjälkeen.

Kuvassa 4 esitetään tuulenvirtaus roottorin läpi. Tästä kuvasta nähdään, kuinka nopeus pienenee mutta paine pysyy samana. Kuvan 4 symbolit poikkeavat muista symboleista johtuen kuvan symboleista. Voimalasta saatava teho voidaan laskea näiden kaavojen avulla. Tuulesta saatava teho:

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) * \rho * v^3 * A * C_p \quad (\text{Erkki Haapanen Tuulivoimatekniikka 2004, 23}).$$

$P$  = teho (W)

$\rho$  = ilman tiheys ( $kg/m^3$ )

$v$  = tuulen nopeus (m/s) vapaassa virtauksessa. Tuulen nopeus hidastuu ennen potkuria ja vielä sen jälkeenkin riippuen miten paljon energiaa otetaan tuulesta.

$A$  = potkurin pyyhkäisyypinta-ala ( $m^2$ )

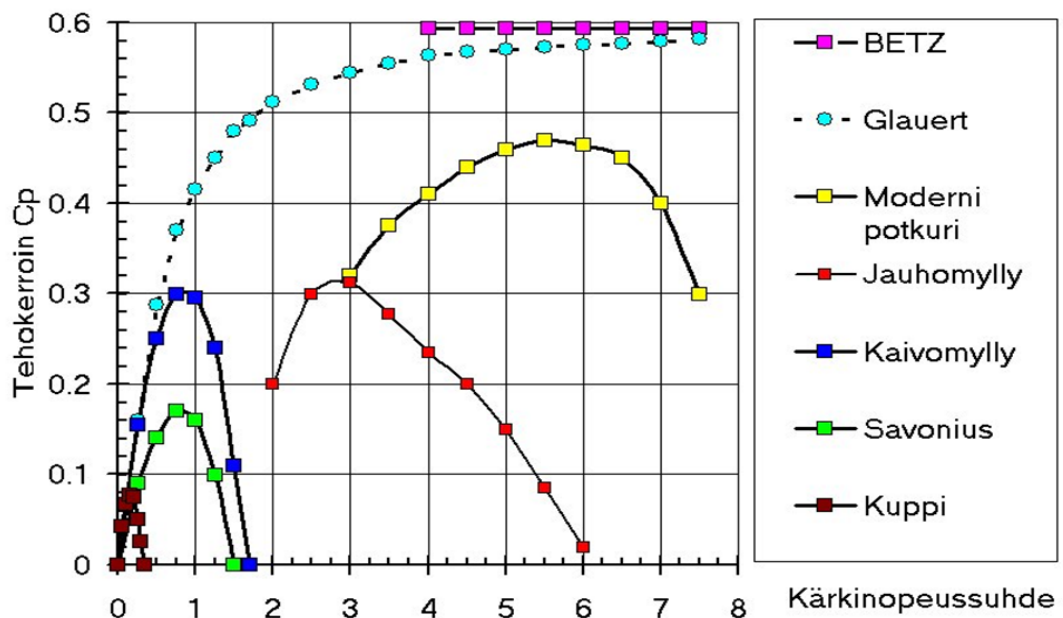
$C_p$  = tehokerroin, vaihtelee eri voimalatyypeillä johtuen kärkinopeudesta (Haapanen 2004, 23.)

Ihanteellinen tuulivoimala hidastaa tuulen yhteen kolmasosaan vapaasta nopeudesta.

Tästä saadaan laskettua tehonkerroin jota kutsutaan myös Bentz:in tehokertoimeksi.

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593 \text{ (Haapanen 2004).}$$

Benzin tehokerroin on teoreettinen arvo joka on käytännössä lähes mahdotonta saavuttaa, koska se vaatisi kitkatonta hidastusta ilman kiertymää (Haapanen 2004, 24.)



Kuvio 1. Tehokertoimen riippuvuus kärkinopeussuhteesta (Haapanen 2004, 25).

Suunnitellun voimalan  $C_p$ -arvo sijoittuu taulukossa todennäköisesti 0.2–0.25 välille. Lopullisen tehonkertoimen arvon saa selville vasta, kun saa itse voimalan pystytettyä. Tehonkertoimesta nähdään tuulivoimalan siivenkärjen tangentiaalinen nopeus verrattuna rajoittamattomaan tuulen nopeuteen. Kolmisiipisen vaaka-akselivoimalan optimiarvo on suurin piirtein 0.4~0.45 huolella suunnitellun voimalan siiven tehonkerroin voi olla jopa 25–30 % suurempi kuin optimiarvo. Optimiarvon saa laskettua alla olevalla kaavalla (Tong W. 2010, 50.)

$$\lambda = \frac{(l+r)\omega}{v} \text{ (Tong 2010,49).}$$

$l$ = siiven pituus (m)

$r$ = keskiakselin säde (m)

$\omega$ = siipien kulmanopeus (rad/s)

$v$ = tuulen nopeus (m/s).

siipien kulmanopeudelle on oma optimiarvonsa. Siipien kulmanopeuden ollessa liian pieni, tuuli pääsee kulkemaan siipien välistä hidastumatta, jolloin ei myöskään energiaa saada kerättyä talteen. Toisaalta jos siivet pyörivät liian nopeasti, niin siivet voivat estää ilman virtausta hidastaen energian talteen keräystä.

### 2.3 Tuulivoima Suomessa

Suomi on metsien täyttämä maa jossa ei ole paljon isoja tasankoja tai suuria peltomaita. Kaikista kannattavinta on sijoittaa suuret voimalat lähinnä rannikon tuntumaan tai sisämaassa korkeiden tunturien päälle. Parhaimmat tuulen nopeudet saadaan Ahvenanmaalla sekä Varsinais-Suomen saariston seuduilla. Merellä tuulen nopeus on varsin navakka, kun ei ole esteitä. (Huittinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen. Voimalaitos tekniikka 2008, 280.)

Suomalaiset ovat hyvin myötämielisiä tuulivoiman suhteen. Vuoden 2013 lopussa Suomessa oli 211 voimalaa, näiden yhteen laskettu teho oli 448 MW. Tuulivoima kattaa silti vielä vain noin prosentin osuuden koko Suomen sähkön tuotannosta. Yleisimmät

laituskoot Suomessa ovat 2–3 MW ja suurimmat voimalat ovat jo jopa 5 MW. Tulevaisuudessa laitoskoot voivat vielä kasvaa, kun niitä aletaan pystyttää merelle. (Motiva 2014.)

Suomi on sitoutunut Kioton sopimuksessa vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Tämä onnistuu lisäämällä uusiutuvien energiamuotojen käyttämistä, kuten tuulienergiaa. Sopimuksessa on asetettu tavoitteeksi lisätä uusiutuvia energiamuotoja 38 % vuoteen 2020 mennessä. Suomi on jo hyvässä vauhdissa, vuonna 2013 osuus oli jo 33 % joten tällä vauhdilla tavoite tullaan täyttämään suurella todennäköisyydellä. Valtakunnallisen tavoitteen mukaan 6 % sähköstä yritetään tuottaa tuulivoimalla vuoteen 2020 mennessä (Saarinen 2013, 33.)

## **2.4 Tuuli**

Tuuli on ilmakehässä maanpinnan mukaisesti kulkeva ilmavirtaus. Tuuli on aurinkoenergiaa joka on muuttunut tuuleksi johtuen maapallon vaihtelevista lämpötilaeroista. Maapallolle tulevasta aurinkoenergiasta noin 1–3 % muuttuu tuuleksi (Suomen tuuliatlas 2014.)

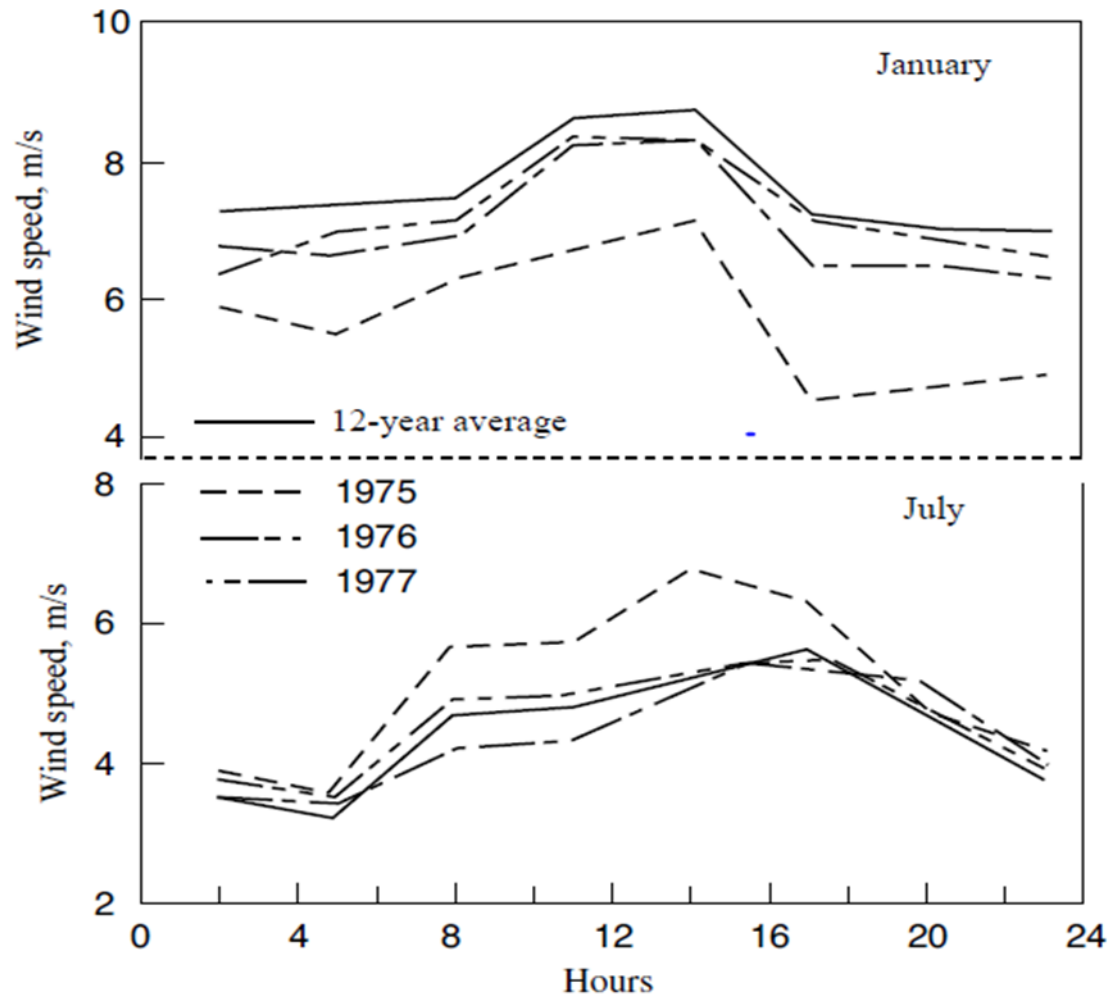
Suomessa tuulisin aika on talvikausina. Atlantin valtamereltä Suomeen suuntautuvat matalapaineet vaikuttavat suuresti Suomen tuuliolosuhteisiin. Tämä työ aiotaan toteuttaa sisämaassa Joensuun lähetyvillä. Sisämaassa on huomattavasti huonompi tuulen nopeus verrattuna rannikkoseutuun (Suomen tuuliatlas 2014.)

Tuulen nopeus vaihtelee kovasti pitkin päivää. Tuulisin ajankohta on kolmelta iltapäivällä ja vähiten tuulta on yö aikaan. Pystyakseli voimalan etu on ominaisuus pystyä tuottamaan sähköä pienillä ja suurilla tuulen nopeuksilla.

Myrskynsuojaus tulee ottaa huomioon jos suunnittelee vaaka-akseli tuulivoimalaa, mutta asia on hyvin erilainen, kun käytetään pystyakselivoimalaa. Pois lukien Darrieus -tyyppin voimala. Pystyakselivoimaloissa siipien kulmanopeus pysyy suurin piirtein samana kuin tuulen nopeus joten kierrosnopeudet eivät kasva liian suuriksi. Kuvassa 5 on esitetty sää tiedotuksissa käytetyt tuulen nopeuden kuvausta. Kuvioissa 2 ja 3 on kuvattu tuulen nopeuden vaihtelevuutta kellonajasta sekä kuukaudesta riippuen.

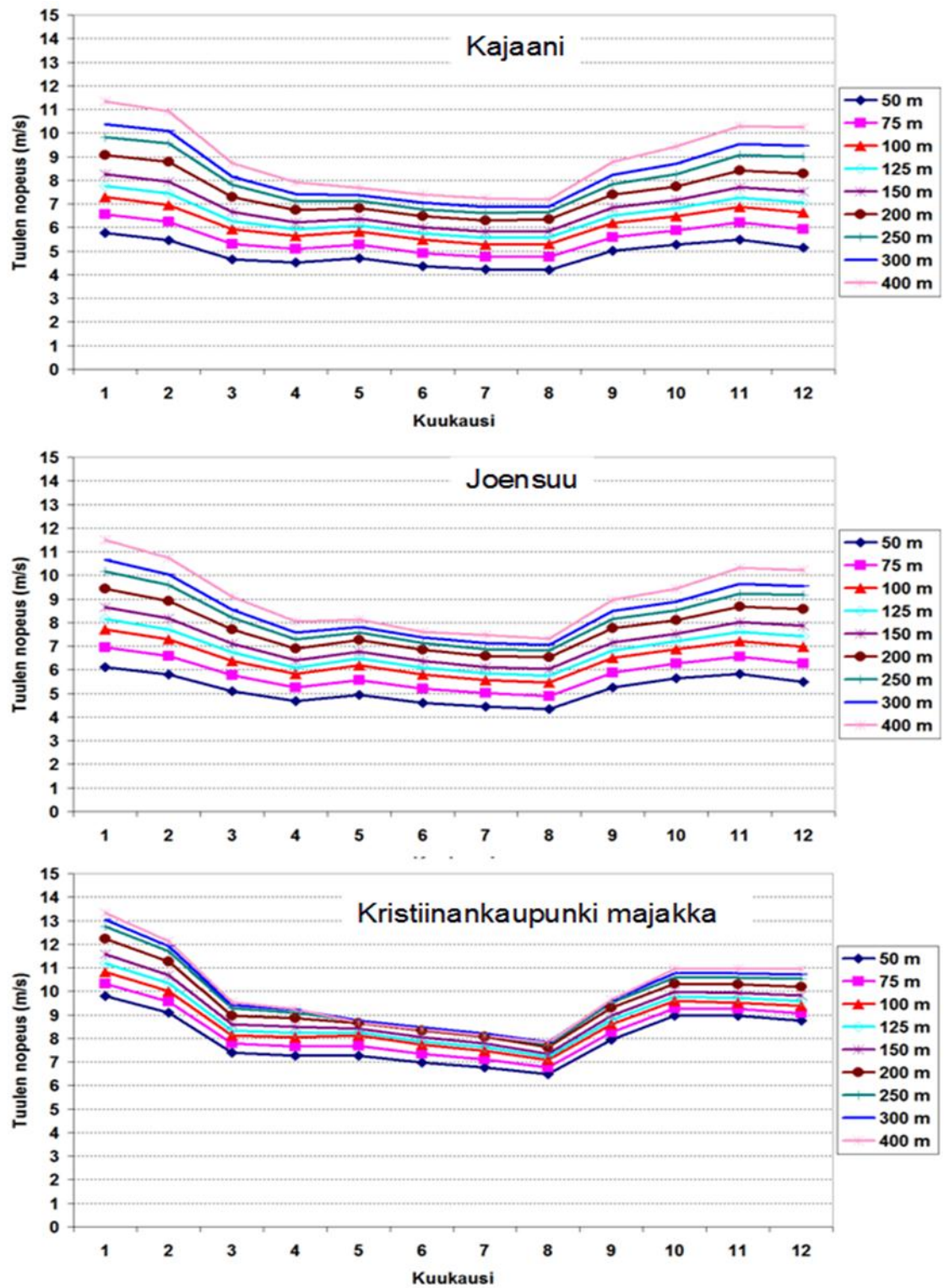
Sää tiedotuksen tuulen nopeudet		
m/s	Kuvaus	Tuulen vaikutukset maalla ja avomerellä
0–3	Heikko tuuli	1 m/s: savu menee tuulen suuntaan 3 m/s: puiden lehdet kahisevat; lyhyitä aaltoja
4–7	Kohtalainen tuuli	Lippu oikenee; aallon harjat murtuvat
8–13	Navakka tuuli	8–10 m/s: pienet lehtipuut heiluvat; meri kohisee 11–13 m/s: suuret oksat heiluvat; meri kumisee
14–20	Kova tuuli	14–17 m/s: puut heiluvat; aaltojen huiput murtuvat 18–20 m/s: katkoo puiden oksia
21–24	Myrsky	Katkoo puita; aallot korkeita, meri pauhaa
25–28	Kova myrsky	Kiskoo puita juurineen; merellä aaltovuoria
29–32	Ankara myrsky	Kaataa metsää; merenpinta täysin valkoisena
>32	Hirmumyrsky	

Kuva 5. Sää tiedotuksen tuulen nopeudet (Suomen tuuliatlas 2014).



Kuvio 2. Tuulen nopeuksia eri kellonaikoina tammikuussa ja kesäkuussa Casper Wyomingissa (Manwell & McGovan 2009, 31).





Kuvio 3. Tuulen nopeuksia Kajaanissa, Joensuussa ja Kristiinankaupungissa (Suomen Tuuliatlas 2014).

## **2.5 Luvat ja ympäristöhaitat**

### **2.5.1 Luvat**

Tuulivoimaloiden pystytystä käsittelevät luvat vaihtelevat kuntakohtaisesti. Joensuun alueella enintään 10 m. Pituisen tuulivoimalan pystytys haja-asutusalueelle ei vaadi valvontatoimenpiteitä, toimenpidelupa vaaditaan silloin kun voimalan korkeus ylittää 20 m (Joensuun kaupunki 2010, 6.)

### **2.5.2 Ympäristöhaitat**

Vaikka tuulivoimalat ovatkin hyvin ympäristöystävällisiä, niin niillä silti on joitakin ympäristöä haittaavia ominaisuuksia. Ehkä suurimpana haittana ihmiselle tuulivoimaloista, (etenkin vaaka-akselivoimaloista) tulee ”välkkeestä” jota syntyy voimalan siipien varjosta. Pienistä tuulivoimaloista ei lähde kovin kovaa ääntä, jos vaihdelaatikko on suunniteltu hyvin. Useissa pienvoimaloissa ei vaihdelaatikkoa edes tarvita. Talviaikana voimalan siipiin voi muodostua jäätä, joka voi singota siipien pyöriessä yllättävänkin kauas.

Voimalan suunnittelussa pitää myös ottaa huomioon eläimistölle aiheutuvat vaarat. Linnut ja lepakot voivat lentää voimalaan ja saada osumia siivistä. Pystyakselivoimaloiden haittavaikutuksia ei ole tutkittu yhtä paljon kuin vaaka-akselivoimaloiden, mutta uskoisin pystyakselivoimalan aiheuttavan ainakin vähemmän välkettä, joka on usein noussut puheenaiheeksi uutta voimalaa suunnitellessa.

### **3 Toteutus**

Suurin osa tässä työssä käytetyistä osista valmistetaan Suhmuran Metalli Ky:n tiloissa, apuna käyttäen CNC-koneistoa. Kappaleet joita ei voida valmistaa itse, tilataan Joensuu kaupungin lähialueelta. Suunnittelussa sekä FEM-laskennoissa käytetään apuna Creo 2.0 -ohjelmistoa. Tästä työstä toteutetaan vain osa nyt opinnäytetyön aikana, loput valmistetaan sitten myöhemmin kesällä jos aikaa riittää.

#### **3.1 Työssä käytetyt ohjelmistot**

##### **3.1.1 Creo parametric 2.0**

Karelia-ammattikorkeakoulussa käytetään Creo 2.0 -ohjelmistoa, tästä johtuen käytin tässä työssä tätä ohjelmaa FEM-laskujen laskemiseen sekä mallintamiseen. Creo-ohjelmisto julkaistiin lokakuussa 2010 PTC:n toimesta (Creo ptc 2014.)

Creo ohjelmistolla voidaan mallintaa 3D-kuvia, laskea lujuuslaskuja sekä tehdä koneistusohjelmia. Pääsääntöisesti ohjelmisto on tarkoitettu mallintamiseen. Koneistusratoja laskettaessa ohjelmisto on hyvin kömpelö. Tässä työssä tehdyt kappaleet ovat sen verran yksinkertaisia että niissä ei välttämättä tarvita CAM-ohjelmistoa kappaleen valmistamisen avuksi.

##### **3.1.2 Creo simulate**

Creo parametric 2.0 -ohjelmistossa lujuuslaskennat eli FEM-laskennat suoritetaan ohjelmiston lisä osalla Creo simulate -ohjelmistolla. Tällä ohjelmistolla voidaan laskea hyvinkin hankalia lujuuslaskelmia, jotka ovat olennainen osa nykypäiväistä koneen suunnittelua. Creo simulate -ohjelmistolla voidaan määrittää materiaalien ominaisuudet. Niiden avulla voidaan määrittää kappaleiden paino ja laskea myös tuotteen kestävyys.

Creo simulate -ohjelmistolla voidaan myös tarkastella kappaleen lämpöominaisuuksia. Ohjelma suorittaa laskutoiminnot käyttämällä avuksi eräänlaisia alkioita. Ohjelma jakaa laskettavan kappaleen pieniin alkioihin jonka koon ja muodon pystyy määrittämään erikseen. Laskusuoritusta tehdessä pitää ottaa huomioon, ettei rajaa alkioita liian pieniksi. Tietokone pystyy suoriutumaan tällöin lasku tehtävästä helpommin. Liian suuret alkiot taas aiheuttaa epätarkemman laskentatuloksen (Creo ptc 2014.)

### 3.2 Keskiakseli

Keskiakselia suunniteltaessa kannattaa lähteä liikkeelle materiaalin valinnasta. Tässä työssä käytettiin Alumiini EN AW 6082 -laatua. Tarvittavan akselin halkaisijan saatiin laskettua sallitun leikkausmomentin avulla. Ensin lasketaan voimalaan vaikuttavan tuulen työntövoima:

$$T_n = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * c_t \text{ (Haapanen 2004, 75).}$$

$\rho$  = ilman tiheys ( $kg/m^3$ )

$v$  = tuulen nopeus (m/s)

$A$  = potkurin pyyhkäisyypinta-ala ( $m^2$ )

$c_t$  = työntövoima kerroin.

$$\frac{1}{2} * 1,225 \frac{kg}{m^3} * 17,5^2 \frac{m}{s} * 3,75 m^2 * 0,55 = 386,88 N$$

$$386,88 N * 750 mm = 290 160 N/mm$$

Tuulen työntövoima laskettiin Joensuun suurimman tuulennopeuden mukaan. Tällä tavalla saadaan varmistettua, ettei akseli katkea kovillakaan tuulilla. Työntövoiman avulla voidaan laskea momentti mikä lähtee voimalasta. Materiaalin murtolujuuden avulla saadaan selville myös sallittu leikkausjännitys:

$$T_{sall} = \frac{16 * M}{\pi * d^3} \text{ (Valtanen 2010, 468).}$$

$M$  = vääntömomentti (N/mm)

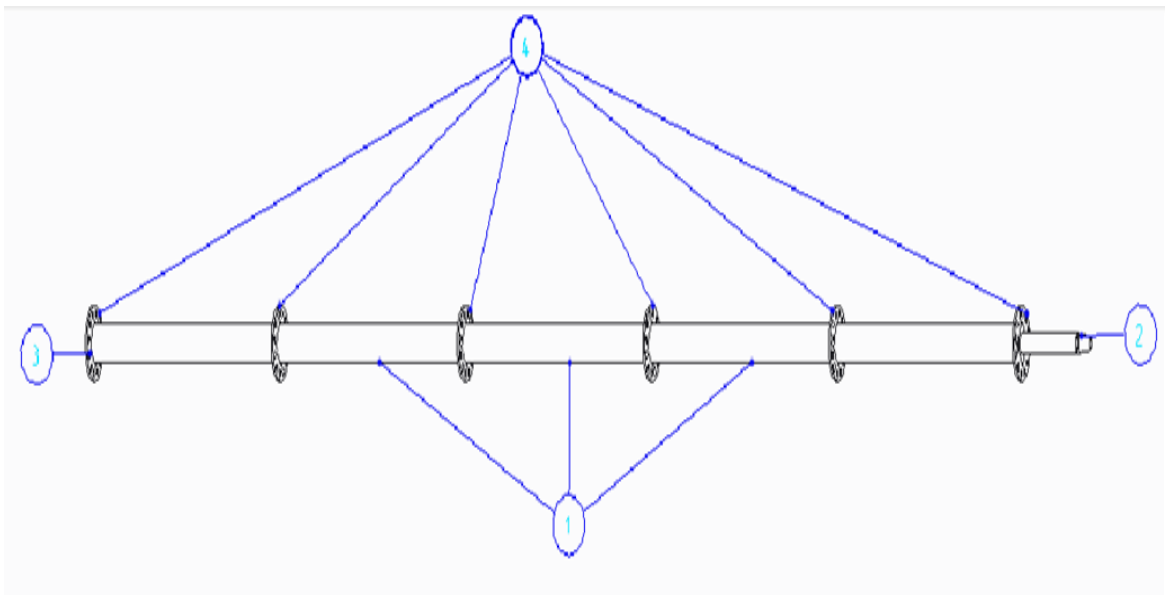
$T_{sall}$  = sallittu leikkausmomentti (MPa)

$d$  = akselin halkaisija (mm).

$$106,667 \text{ mPa} = \frac{16 \cdot 290\,160 \text{ N/mm}}{\pi \cdot d^3}$$

$$d = 24,017 \text{ mm} \approx 25 \text{ mm}.$$

Keskiakseli koostuu viidestä eri akselistä, jotka liitetään yhteen. Ensin laskettiin akselin leikkaus aiemmin mainitulla kaavalla. Kaavasta saatiin, että leikkauksen kannalta riittäisi 25 mm akseli, päädyttiin kuitenkin 50 mm akseliin taipuman vähentämiseksi. Kuvassa 6 on esitetty kokoonpanokuva keskiakselista kiinnityslaippojen kanssa.



Kuva 6. Keskiakselin kokoonpanokuva (Kuva: Kankkunen 2014.)

Osaluettelo:

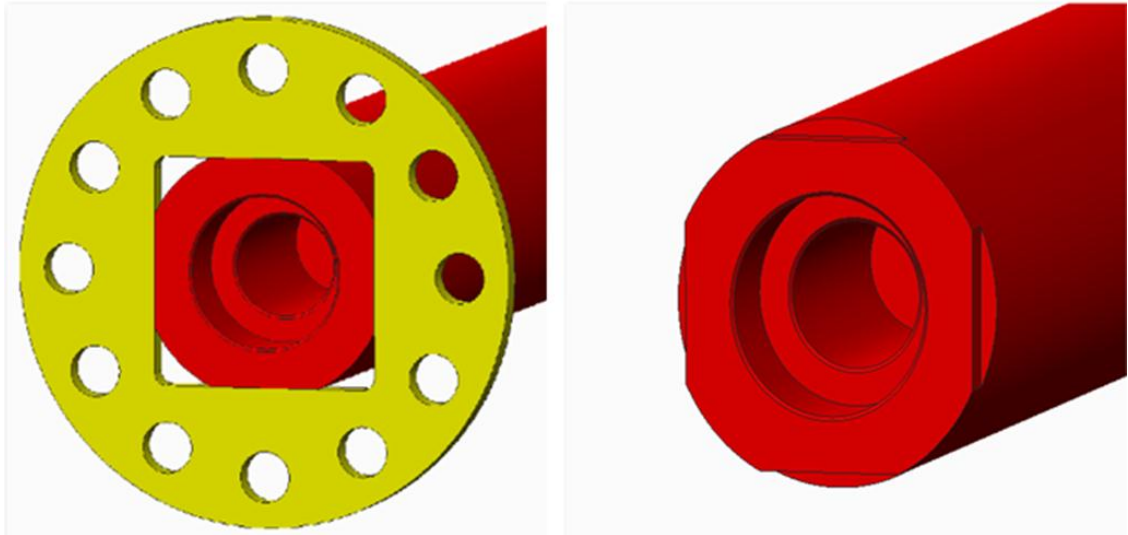
1: keskiakseli 1

2: keskiakseli alaosa

3: keskiakseli yläosa

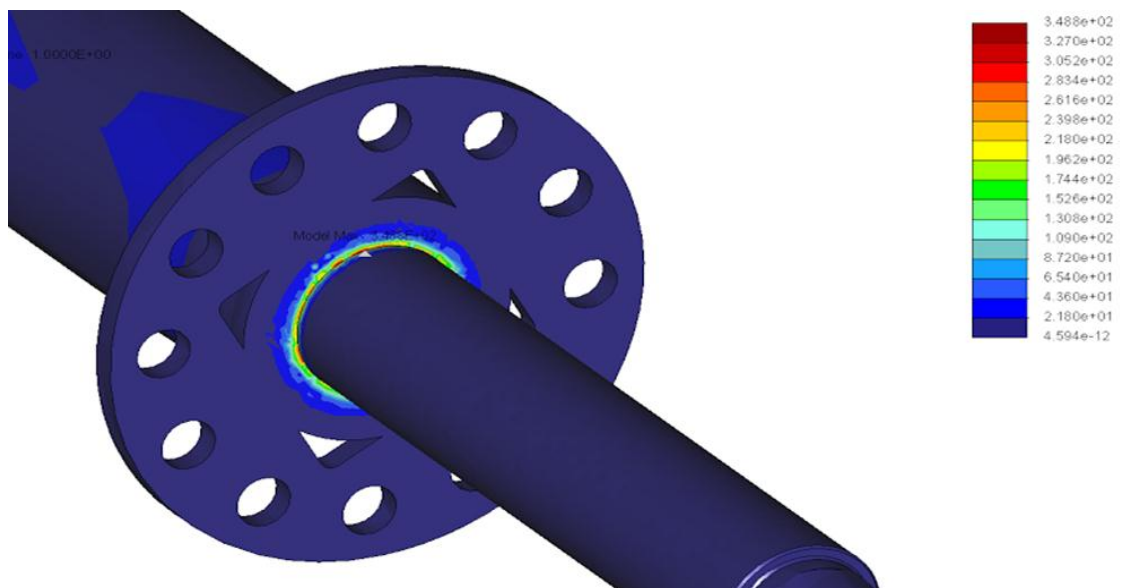
4: kiinnityslaippa.

Kuvassa 7 esitetään miten kiinnityslaipat kiinnitetään akseliin. Siivet kiinnitetään keskiakseliin kiinnityslaippojen avulla. laipat ovat kiinnitetty akseliin puristeella akselissa olevaan uraan. Kosketuspintoja on neljä jokaista akselia kohden, joten vääntövoimat jäävät kovin pieniksi eivätkä ne haittaa mitoitus.

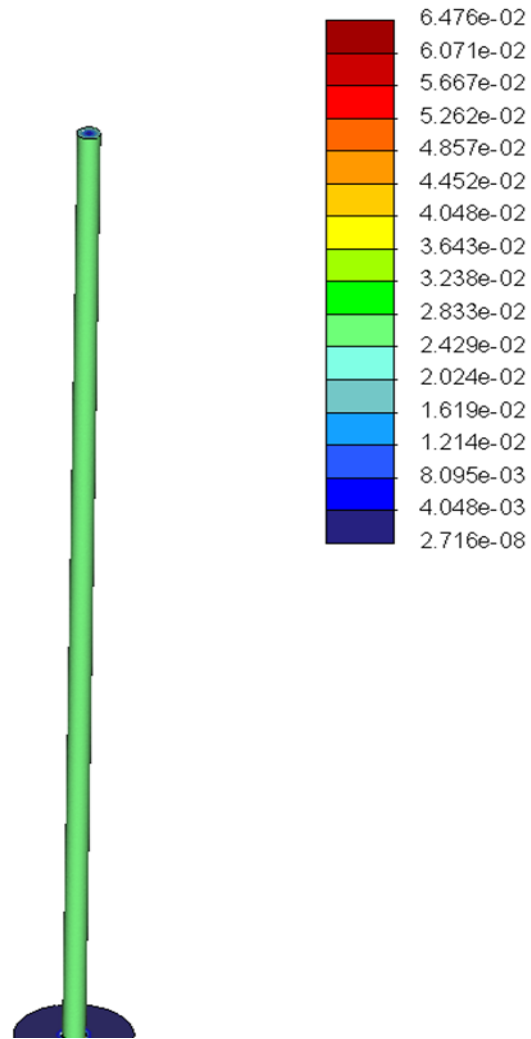


Kuva 7. Kiinnityslaipan asentaminen (Kuva: Kankkunen 2014.)

Akselit liitetään toisiinsa kierteen avulla. Akselit jaettiin pienempiin osiin, jotta niiden valmistaminen olisi helpompaa. Materiaaliksi valittiin alumiini keveyden takia. Helpon saatavuuden takia valittiin EN-AW 6082 -laatu.

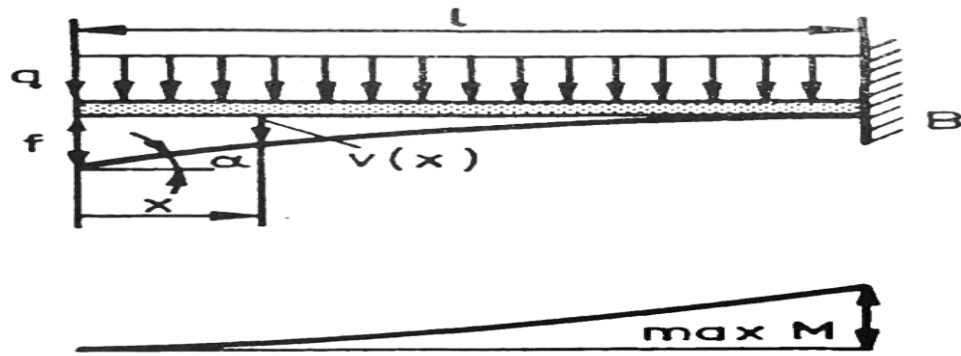


Kuva 8. Keskiakselin leikkausjännitys (Kuva: Kankkunen 2014.)



Kuva 9. Leikkausjännitys (Kuva: Kankkunen 2014.)

Voimalan voimansiirto tapahtuu keskiakselin avulla, jolloin tärkeää on vaaditun voiman kestävyys. Kuvassa 8 nähdään alimmaisen keskiakselin leikkausjännitys. Kuvassa 9 on esitetty koko akselin leikkautuminen. Kuvasta huomataan, että se jää hyvin pieneksi ollen vain 0.0648 MPa. Akselin rasitus laskettiin Creo parametric -ohjelmiston avulla ja siitä määritettiin suurin rasituskeskittymä. Alimmaisen keskiakselin magneettilevyn ja siipien liitoskohdassa, jossa akselin halkaisija pienenee, todettiin olevan suurin rasituskeskittymä. Leikkausjännitys jää pieneksi, ollen vain 348.8 kPa. Tämä saadaan vielä pienemmäksi lisäämällä pyöristys nurkkakohtaan. Ohjelmiston laskujen perusteella keskiakseli ja kiinnityslaivat painavat yhteensä 14 kg.



Kuva 10. Keskiakselin taipuma (Valtanen 2010, 409.)

$$f = \frac{ql^4}{8EI} \text{ (Valtanen 2010, 409.)}$$

$E$  = kimmokerroin (MPa)

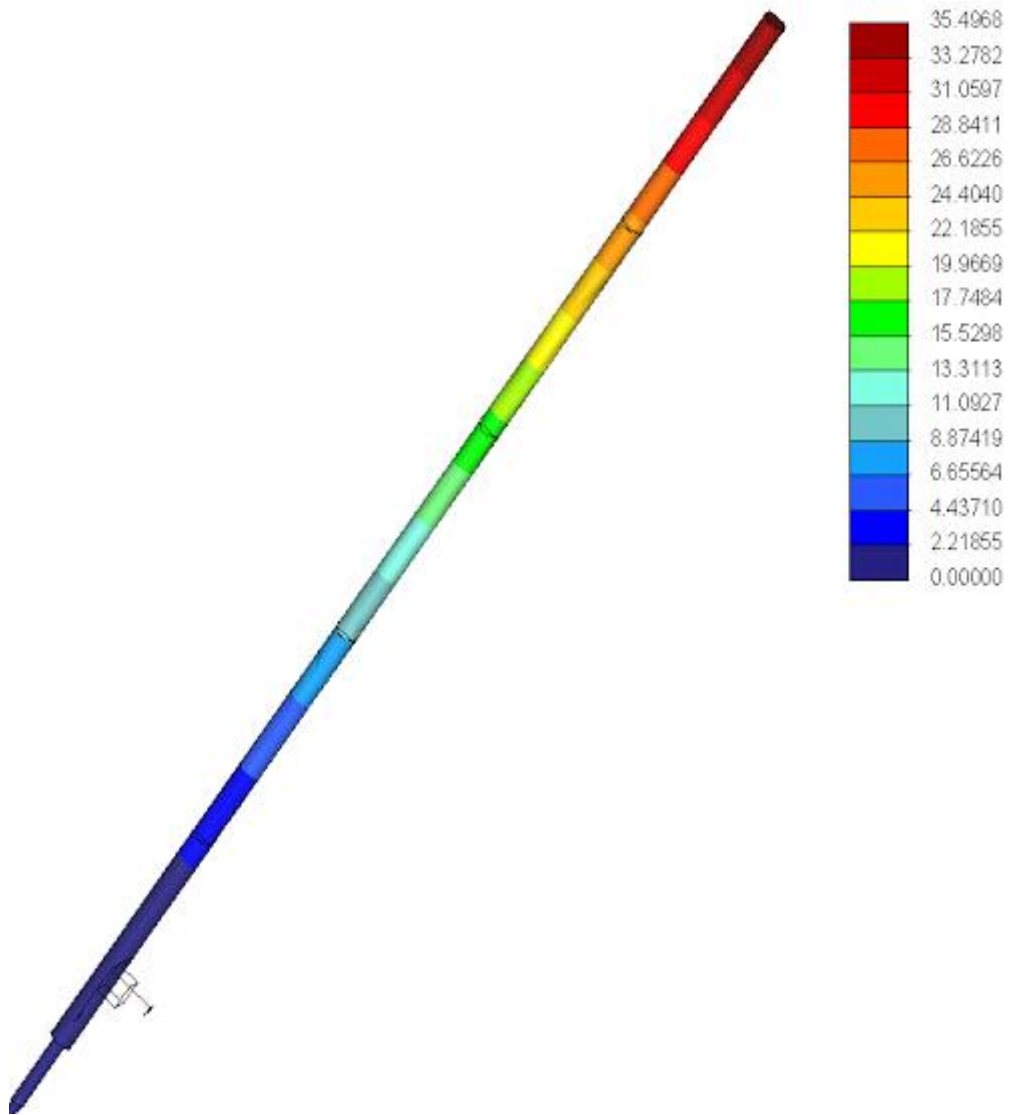
$I$  = neliömomentti ( $mm^4$ )

$l$  = akselin pituus (mm).

$$\frac{\left(\frac{386,88 \text{ N}}{2500 \text{ mm}}\right)2500^4 \text{ mm}}{8 \cdot 70000 \text{ MPa} \cdot \left(\pi \cdot \frac{50^4 \text{ mm}}{64}\right)} = 35,18 \text{ mm}$$

Akselin taipuma on 35,18 mm yläpuolella esitetyn kaavan mukaan. Taipuma on todellisessa tilanteessa pienempi koska siipien rakenne toimii samalla tukirunkona akselille. Tarkistin laskun myös Creon parametric -ohjelmiston avulla. Ohjelmalla laskettuna taipuma oli hieman suurempi. Ohjelman laskennallinen taipuma on esitetty kuvassa 11 (35,49 mm).



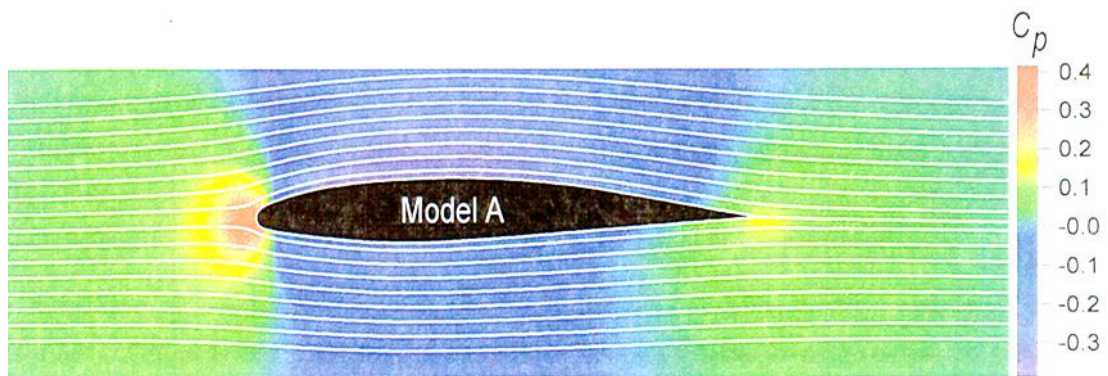


Kuva 11. Keskiakselin taipuma (Kuva: Kankkunen 2014.)

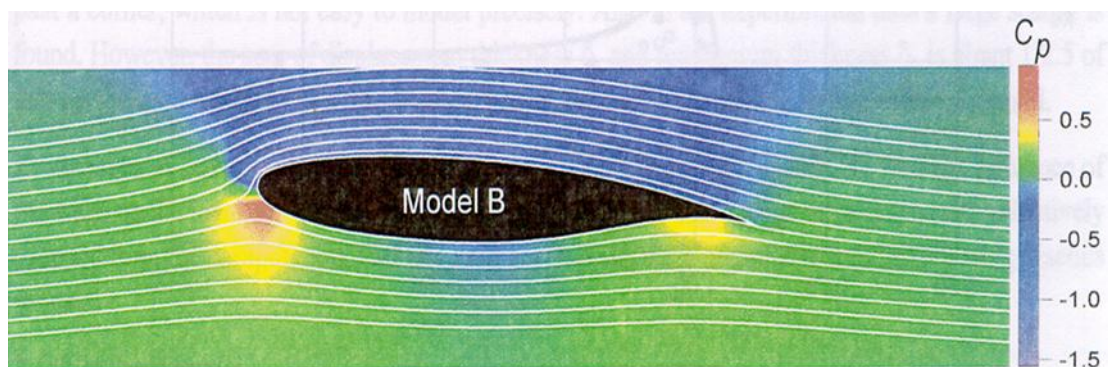
### 3.3 Siivet

#### 3.3.1 Siipien profiili

Tässä työssä ei tarkemmin keskitytä siipien profiilin suunnitteluun, vaikka se on hyvin olennainen osa tuulivoimalan suunnittelua. Siipien tarkka suunnittelu vaatii vankkaa tuntemusta aerodynamiikkaan. vaaka-akselisentuulivoimalan siivet toimivat samalla tavalla kuin lentokoneen siivet. Tuuli matkaa pitemmän matkan siiven yläpuolelta kun alapuolelta tuottaen nostetta joka pyörittää voimalan siipiä. Pystyakselisilla voimaloilla asia on taas hiukan erilainen. Siivet ottavat mahdollisimman paljon tuulta vastaan mikä tuottaa niin sanottua työntöä, joka sitten pyörittää voimalan siipiä. Pyörimiseen tarvitaan paine eroa siipien puoliskoiden välillä, muuten voimala ei pyöri.



Kuvio 4. Ilmanvirtaus esimerkki (Haapanen 2004, 40).



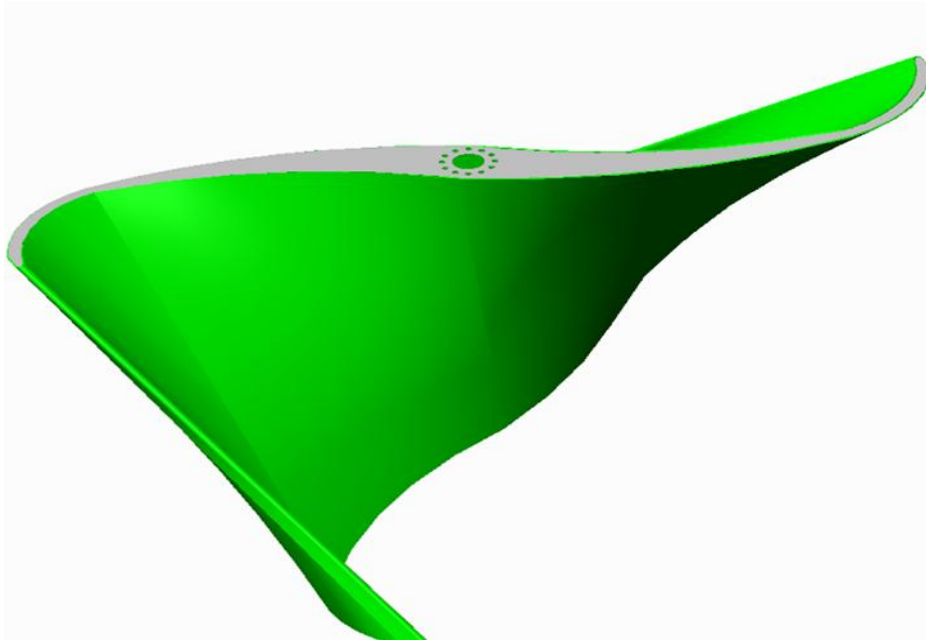
Kuvio 5. Ilmanvirtaus esimerkki (Haapanen 2004, 40).

Kuvioista 4 ja 5 nähdään virtaukset kahdelle eri profiilille. Kuvassa punainen väri on suuresti ylipaineen puolella ja sininen kuvastaa alipainetta. Ylemmässä kuvassa ei juuri ole nostovoimaa, toisin kuin alemmassa kuvassa. Alemmasta kuvasta nähdään miten virtaus kaartuu alaspäin nosteen syntyessä. Painejakaumasta nähdään että profiilin ylä- ja alapinnalla on lähes vakiopaine, kun taas etu- ja jättöreunan alla on ylipainetta. Nämä esimerkki kuvat ovat lähinnä vain vaaka-akselivoimaloille, pystyakselilla asia on hie- man erilainen (Haapanen 2004, 40.)

Siipien materiaalina tässä työssä käytettiin alumiinia ja lujitemuovia. Siipien materiaali kannattaa olla mahdollisimman kevyt, jotta ne pyörisivät mahdollisimman pienellä tuu- lella. Nykyaikaisissa suurissa kolmilapaisissa voimaloissa käytetään materiaalina useimmiten komposiitteja kuten lasikuita ja hiilikuitu (Haapanen 2004.)

### **3.3.2 Siipien toteutus**

Yksi siipikomponentti koostuu kahdesta alumiinilevystä ja lujitemuovista. Siipien päädyt tehdään alumiinista joiden avulla saadaan siipien muoto laminoitua oikein. Alumii- nisten päätylevyjen ympärille laminoidaan siiven lopullinen muoto lujitemuovista muot- tia apuna käyttäen. Alumiiniset siiven päädyt valmistetaan vesileikkaamalla. Lopullinen siipi kokoonpano koostuu viidestä siipikomponentista jotka kootaan päällekkäin kes- kiakselin ympärille. Kuvassa 12 on esitetty yksi siipikomponentti.



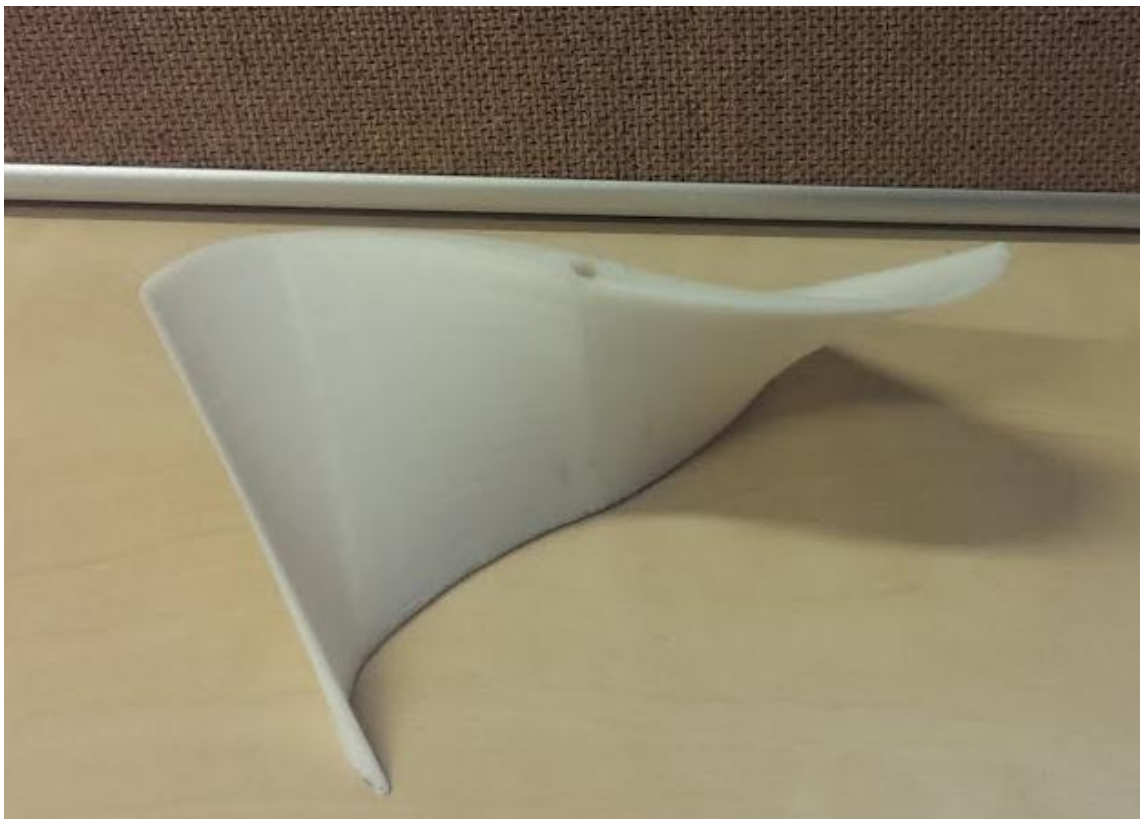
Kuva 12. Siipi (Kuva: Kankkunen 2014.)

### 3.3.3 Siiven muodon testaus

Siivestä valmistettiin malli 3D-tulostamalla. Mallilla testattiin voisiko siipi profiili toimia ollenkaan oikeassa koossa. Materiaalina oli ABS-muovi. Siiven 3D-malli syötettiin tulostimelle tulostimen oman ohjelmiston avulla. Tulostuksessa meni vajaat kaksi tuntia. Kuvassa 14 on esitetty 3D-tulostettu mallikappale. Alapuolella on kuva 3D-tulostimesta jolla tulostus suoritettiin.



Kuva 13. 3D tulostus suoritettiin Minifactory 3 laitteella. (Minifactory 2014.)

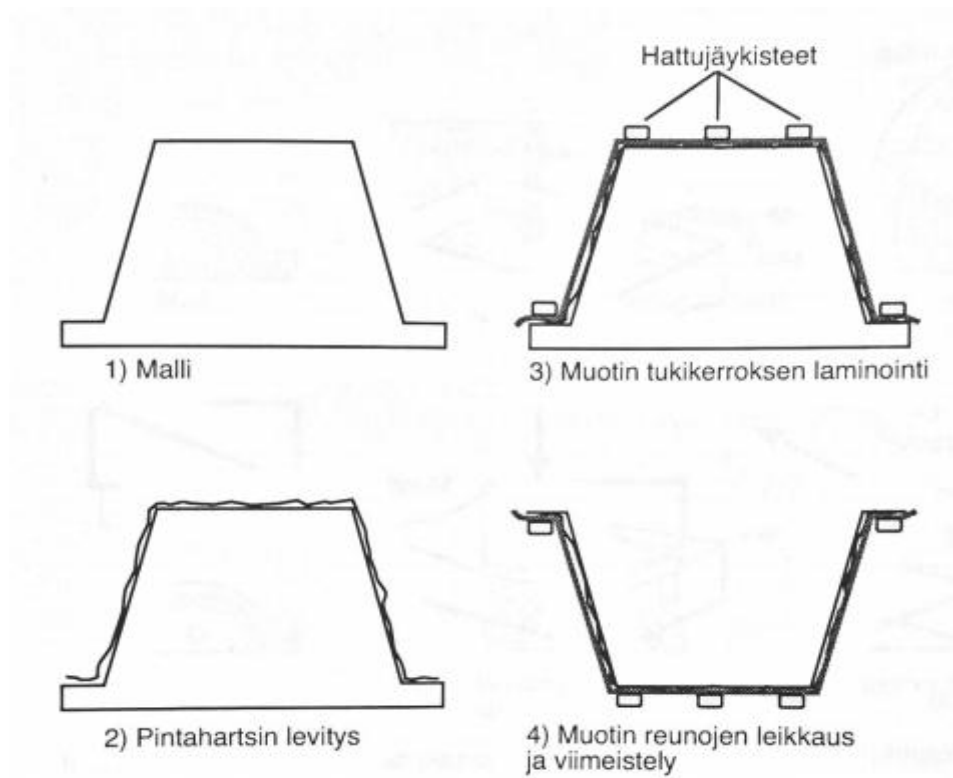


Kuva 14. 3D-tulostettu siiven malli (Kuva: Kankkunen 2014.)

Siiven pyörimistä testattiin rakentamalla sille tukirunko ja sen jälkeen siihen puhallettiin paineilmaa, jonka nopeus mitattiin anemoetrilla. Tällä tavalla saatiin selville lähteekö malli pyörimään keskimääräisellä ilmannopeudella. Tulostettu mallikappale on riittävän lähellä lopullista siipiprofilia, että testiin voidaan luottaa.

### 3.3.4 Muotti

Laminointia varten täytyy valmistaa muotti. Se voidaan valmistaa tekemällä ensiksi, malli kappaleesta joka laminoidaan. Tässä tilanteessa voidaan käyttää lasikuitulujitettu kertamuovimuottia, sillä on hyvät lujuusominaisuudet sekä se on halvempi kuin muilla menetelmillä tehdyt muotit. Muottia varten pitää ensiksi valmistaa malli kappaleesta, tämä voidaan tehdä koneistamalla 3D-malli kappaleesta. Kuvassa 15 on esitetty muotinrakentamisen vaiheet. (Saarela O., Airasmaa I., Kokko J., Skrifvars M. & Komppa V. *Komposiittirakenteet* 2003, 199.)



Kuva 15. Lujitemuovimuotin valmistusvaiheet (Saarela ym. 2003, 201).

### 3.3.5 Laminointi

Siivet laminoitiin märkä laminointi menetelmällä koska muotti on isokokoinen ja avoin. Menetelmässä lasikuitulujitteet asetellaan kerroksittain avoimeen muottiin joko käsin tai työkalujen avulla. Hartsit levitetään lastoilla ja siveltimillä, tai se voidaan myös ruiskuttaa jolloin saataisiin hyvin helposti laminoitua suuri pinta-ala. (Saarela ym. 2003, 201.)

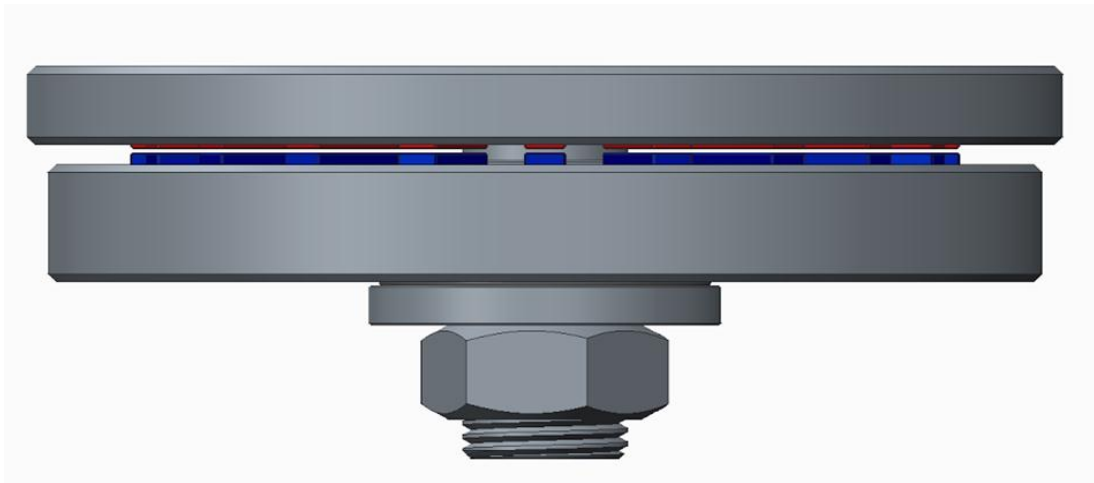
Ennen laminointia muotti vahataan jotta valmis kappale saadaan irrotettua helposti muotista. Vahaus suoritetaan useita kertoja. Tämän jälkeen levitetään geelipinnoite eli niin sanottu gelcoat, se voidaan levittää joko ruiskuttamalla tai siveltimellä. Gelcoat on valmiin tuotteen näkyvä pinta, siihen ei saa jäädä roskia. Gelcoat antaa tuotteelle värin sekä suojaa säältä, kosteudelta ja kemikaaleilta. Gelcoat pohjahartsilaatu määrätty käyttökohteen mukaan. Tavallisimmat pohjahartsit ovat isoftaalihappo-, neopentyyliq-lykoli- ja bisfenoli-A-pohjaiset hartsit. Säänkestäviin gelcoateihin käytetään metyyli-imehtakrylaatin ja styreenimonomeeri seoksia.

Gelcoattia levitettäessä pitää huomioida että sitä ei saa levittää alikovettuneelle muottipinnalle, kylmälle muottipinnalle eikä muottipinnalle jossa on koloja ja halkeamia. Suositeltava lämpötila levitystä varten on (18–22 °C). Kovettuneena sen paksuus on tavallisesti (0,4–0,7 mm). Kalvon kovuuteen vaikuttaa sen paksuus (normaalisti 35 °C). Liian ohuessa kalvossa on myös se vaara että lujitekudoksen sidoskuviot peilautuu gelcoat pintaan. Liianpaksu kalvo voi myös johtaa eriaikaiseen kovettumiseen sekä pinnan liianhelppoon vaurioitumiseen iskusta. (Saarela ym. 2003, 101.)

Vahauksen ja gelcoat jälkeen voidaan alkaa laminoimaan. Siipien molemmat puolet laminoidaan yhteen samalla kun ne laminoidaan kiinni alumiini pätyihin. Materiaaliksi märkälaminointiin soveltuu lähes kaikki lujitemuovit ja tyypit. Siipien materiaalina käytettiin lasikuitua tämän halvanhinnan ja hyvän kestävyys takia, sitä voi käyttää joko katkokuitumattomana tai rovinkikudoksena. Siiven tulee kestää ulkotiloja sekä kovia lämpötila vaihteluita, tästä syystä käytetään lujitteena ohuita lasikuitukudoksia ja hartsina tavallista epoksia. (Saarinen ym. 2003, 154.)

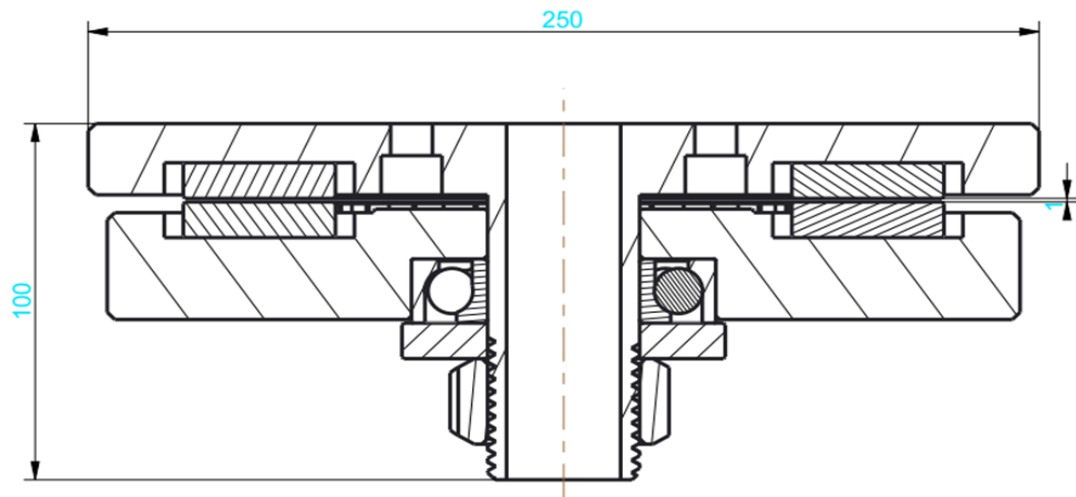
### 3.4 Magneettilevy

Siipien painon aiheuttamaa kitkaa pienentämään suunniteltiin tehdä magneettilevyn joka kiinnitetään siipien alapuolelle siipien ja rungon väliin. Magneetteina käytetään kestmagneetteja jotka tilataan netistä. Kestomagneetin materiaali on neodyymi, se on voimakkain tällä hetkellä tunnettu magneetti materiaali. Käytettävissä neodyymimagneeteissa tarkka kemiallinen kaava on  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (neodyymi, rauta, boori). Neodyymimagneetit eroaa perinteisistä ferriittimagneeteista paremmalla jäännösmagnetismiarvolla. Neodyymimagneetit kestää pitempään ja ovat voimakkaampia. Magneettilevy on esitetty kuvassa 16 ja 17 (Supermagnete 2014.)



Kuva 16. Magneettilevy kokoonpantuna (Kuva: Kankkunen 2014.)





Kuva 17. Leikkauskuva magneettilevystä (Kuva: Kankkunen 2014.)

Levyt tehtiin alumiinista (EN-AW 6082 -laadusta) jotta ne eivät vaikuta magneettien toimintaan. Magneetit itse kiinnitettiin levyihin koneistettuihin uriin liiman avulla. Liimana on käytössä Loctite 415, se soveltuu metalleille ja on koostumukseltaan keski-juokseva. Liimaa ei tule laittaa liikaa, jotta magneetit saa vielä vaihdettua, kun niistä loppuu teho (Loctite 2014.)

Magneettilevyn kokoonpanoon tarvitaan yksilaakeri pitämään levyjä kasassa ja pyörimässä. Magneetit toimivat toisena laakerina ja samalla auttavat voimaa pysymään pystysuorassa asennossa. Laakeriksi valittiin SKF:n 7208 BEP -mallin laakerin, se ottaa voimia vastaan molemmista akselinsuunnista. Laakeri mitoittamisessa rasiukset eivät olleet olennainen osa. Voimalan kierrosnopeudet sekä fyysiset rasiukset jäävät sen verran mataliksi että niistä ei tarvitse kovinkaan paljon huolestua. Käytettävän mallin maksimi kierrosnopeus on 10 000 rpm ja se kestää 34,5 kN. voiman. Tuulivoimalan kierrosnopeus 4 m/s tuulen nopeudella on 38 rpm. ja siipien paino on suurin piirtein 50 kg.

Levyjen koneistus onnistuu CNC-sorvilla jossa on pyörivät työkalut. Koneistus aika suurin piirtein olisi koko kokoonpanolle 8h. Magneettilevy kasataan kiinnittämällä ensin magneetit levyihin sen jälkeen, yläpuoli kiinnitetään siipien ja keskiakselin kokoonpanoon. Alapuoleinen levy kiinnitetään mastoon välilevyn ja tukijalkojen avulla, ennen tätä pitää laakeri laittaa paikalleen levyyn.

## 3.5 Akusto ja vaihtosuuntaaja

### 3.5.1 Akusto

Voimala tarvitsee akkuja jotta voidaan tuottaa sähköä tasaisesti. Akusto toimii myös varastona mitä voidaan käyttää hyödyksi tuulettomina ajanjaksoina. Tuulivoimalan akuston akkuna käy parhaiten niin sanotut syväpurkausakut. Syväpurkausakut on suunniteltu kestämään useita syviä purkaukertoja. Yleisimmät syväpurkausakut on avoimet lyijyhappo akut paksummilla kennoilla, geeliakut sekä AGM-akut.

Lyijyhappo akuissa etuna on halvempi hinta verrattuna muihin syväpurkausakkuihin. Huonoja puolia on lähinnä kaksi, tämän mallin akkuja joutuu huoltamaan jatkuvasti lisäämällä vettä, sekä akkuhappoa. Happohöyryt aiheuttavat myös tulipalovaaran sekä syövyttävät laitteistoa. Tämän tyyppin akkuja ei pitäisi säilyttää sisätiloissa. Nykyisin on myös kehitetty niin sanottuja ”puoliavoimia akkuja” joiden korkki on suunniteltu suodattamaan osa vedestä takaisin joka muuten haihtuisi vedyn ja hapen mukana.

Geeliakuissa elektrolyytti on sidottu geeliin, eikä se pääse tällöin vuotamaan. Geeliakut sopivat hyvin käytettäväksi sisätiloissa ja ne voi asentaa vaikka ylösalaisin. Huono puoli niissä on rajoittuneisuus ottamaan vastaan tai antamaan ulos suuria virtamääriä kerralla. Nopeissa latauksissa akkuun muodostuu kaasuja jotka sitten rikkovat akun kanavia ja estää näin sähköä liikuttamisen akussa.

AGM-akku (Absorbent Glass Mat.) on kehittyneempi versio perinteisestä lyijyakusta, siinä on käytetty lasikuitumattoa joka sitoo nesteen isojen lyijykennojen väliin. AGM-akku yhdistää lyijyakun ja geeliakun. Tämän tyyppin akku kestää hyvin pitkäaikaista latausta ja purkautumista. AGM-akun purkauksien kestossa on suuria eroja erivalmistajien välillä (Reps 2014.)

Akkuina akustossa suunniteltiin käytettävän AGM-akkuja, tämän tyyppin akut kestävät parhaiten sää olosuhteita sekä useita purkauskertoja. Akuston mitoitus lähtee liikkeelle määrittämällä kulutuksen määrä. Voimalan on tarkoitus pyörittää ilmalämpöpumppua, valmistajan sivuilta saatavasta laitteiston esitteestä löytyy omateho. Tähän työhön valittiin Online Professional N09L merkkisen ilmalämpöpumpun halvan hinnan ja hyvän lämmitystehon takia. Virrankulutus lämmitystoiminnassa laitteella on 0.75 kW jännite 230/50 Hz sekä virta jäähdytyksessä ja lämmityksessä 2.9/3.0 A. (Ek-automatic 2013.)

$$P = U * I \text{ (Eurosolar 2014).}$$

$P$ = voima (watti)

$U$ = jännite (voltti)

$I$ = virta (ampeeri).

Voimalassa käytetään 12 voltin akkuja, generaattori pystyy tuottamaan 8.3 ampeerin virran. Siirrettävän sähkötehon määrä voidaan laskea seuraavalla tavalla. Generaattori tuottaa 8.3 ampeerin latausvirran joten akkuja ladataan 8,3 Ah virralla. Tämä voidaan myös ilmoittaa watteina eli silloin se olisi 99,6 Wh.

$$12 \text{ v} * 8.3 \text{ A} = 99,6 \text{ W} \text{ (Eurosolar 2014).}$$

$$3.0\text{A} * 120 = 360 \text{ Ah}$$

Tuulivoimala pyörii koko ajan, mutta yleensä yöllä ei tuule tarpeeksi että sähköä voitaisiin tuottaa. Akkukapasiteetti suunnitellaan kestämään yhden työviikon eli 120 h ja jos lämpöpumppu kuluttaa 3 A tunnissa. Akkujen tarvittavamäärä on neljä 200 Ah kappaletta, jos lasketaan että akku saa maksimissaan purkautua vain 50 % koko ampeerituntimäärästään.

$$\frac{360 \text{ Ah}}{100 \text{ Ah}} = 3.6 \text{ akkua} \approx 4 \text{ akkua}$$

Akut liitetään rinnan liittämällä akkujen plus- ja miinusnavat toisiinsa kiinni (saman napaiset toisiinsa). Käyttämässäni yhdessä 200 Ah akussa on kuusikappaletta 2 V kennoa jotka on liitetty sarjaan, näin jännite kasvaa ja saadaan 12 V akku. 12 V on akun nimellisjännite, todellinen jännite vaihtelee tyypistä riippuen. Lataessa 12 V akkua laturilla tai generaattorilla lataus kohoaa asetettuun arvoon esimerkiksi 14,4 V. Kunnossa olevassa akussa jonka kennot ovat toiminnassa, tämä 14,4 V lataus jännite jakautuu tasaisesti jokaiselle kennolle, tässä tilanteessa 2,4 V/kenno.

Akun vioittumistilanteessa, jos esimerkiksi yksi kennoista vioittuu ja lopettaa toiminnan. Ehjät kennot jakavat silloin latausjännitteen (tässä tilanteessa 14.4 V) eli viidelle kennolle se olisi 2,88 V/kenno. Näiden kennojen elektrolyytit alkavat kiehua ja ajan myötä ne sitten kuivuvat. Silloin kun akkuja ei ladata ne hakevat lepojännitteen joka on tässä tilanteessa 12,6 V (2.1 V kennolle). Vioittumistilanteessa silloin kun akkuja ei ladata, ne pyrkivät 2,1 V lepojännitteeseen. Tässä tilanteessa yksi kennoista on vioittunut, silloin akun kokonaisjännite on 10,5 V. Rinnankytketty akku pyrkii tällöin syöttämään virtaa vioittuneeseen akkuun niin pitkään kunnes senkin jännite on 10,5 V (1,75 V kennolle) Tämä tarkoittaa sitä että lataamattomana aikana ehjä akku tyhjenee. (Reps 2014.)

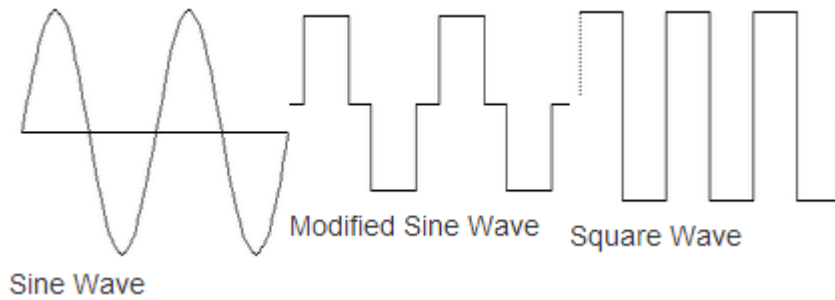
### 3.5.2 Vaihtosuuntaaja

Toisella nimellä invertteri. Tämän avulla muutetaan akuista saatava 12 V tasavirta 230 V vaihtovirraksi. Nämä osat ostetaan valmiina koska niitä ei ole järkevää valmistaa itse. Valmistajia löytyy monia. Invertterin laskemiseen ei puututa tässä työssä sen tarkemmin. On olemassa monia erilaisia vaihtosuuntaajamalleja. Esimerkiksi sellaisia missä on yhdistetty akkulaturia samaan nippuun.

Vaihtosuuntaajaa valitessa pitää huomioida tarvittavan tehon määrää (w). Markkinoilla on useita erikokoisia malleja, 50 w aina jopa 50 000 w. Yli 11 000 w vaihtosuuntaajia ei

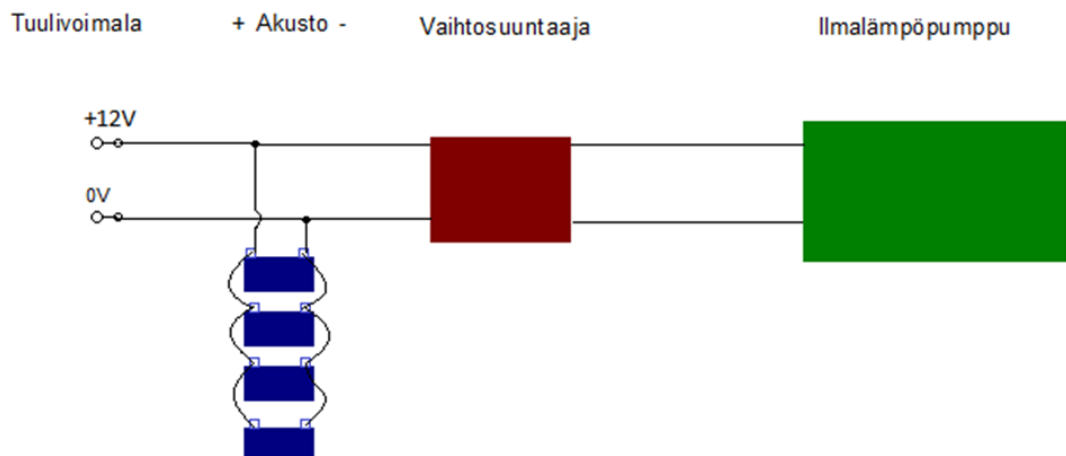
yleensä käytetään kotiolosuhteissa. Kaikilla vaihtosuuntaajilla on määritelty jatkuvan tehon määrä sekä hetkellisen tehon määrä, ne siis kestävät hetkellisesti ylikuormitusta.

Yleisimmin käytetyt vaihtosuuntaajamallit ovat siniaalto-, muokattu- ja kanttiaaltovaihtosuuntaaja. Suurin eroavaisuus näissä malleissa on sähkön syöttötavassa, jota kuva 18 esittää. (Solar electric 2014.)



Kuva 18. Eri vaihtosuuntaajamallien lähettämät sähköaaltomuodot (Solar electric 2014).

Puretussa generaattorissa oli jo valmiiksi vaihtosuuntaaja, mitä pystyttiin hyödyntämään tässä työssä. Vaihtosuuntaajalta saadaan ulos 230 V ja 9.5 A. Vaihtosuuntaaja liitetään järjestelmään akkujen perään, näin saadaan turvattu tasainen sähkön tuotto. Kuvassa 19 esitetään voimalan sähköjärjestelmän kytkentäjärjestys.



Kuva 19. Voimalan kytkentäjärjestys (Kuva: Kankkunen 2014).

Akustoa ennen voidaan myös kytkeä latauksensäädin. Tämä laite valvoo akuston varau-  
usta ja rajoittaa laitteiden käyttöä jos jännite laskee liian alhaiseksi. Liian korkean vara-  
uksen tilanteessa laite voi syöttää ylimenevän energia määrän keinokuormasäätimen  
avulla esimerkiksi lämmöksi (Reps 2014.)

### 3.6 Johdotus

Johtoina generaattorista akuille voidaan käyttää samanlaista johtoa kun mitä käytetään  
2.2kW sähkömoottorille eli MCMK 3x2,5+2,5 kaapelia. Tämä väli kannattaa pitää  
mahdollisimman lyhyenä jotta jännitehäviö jäisi mahdollisimman pieneksi (Valtanen  
2010, 1000.)

$$R = \frac{R_{\rho}l}{A} \text{ (Valtanen 2010).}$$

$R$  = resistanssi ( $\Omega$ )

$R_{\rho}$  = johdinaineen resistiivisyys ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )

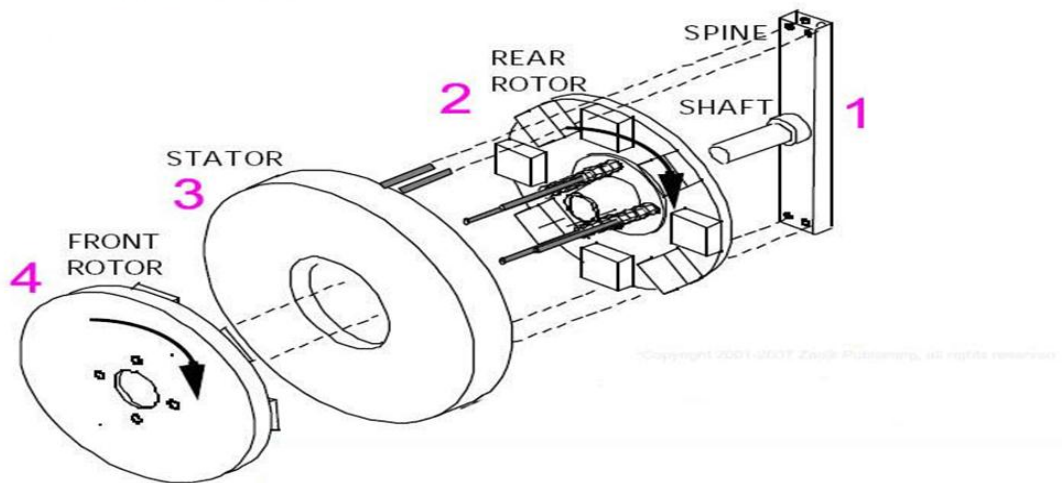
$l$  = johtimen pituus (m)

$A$  = johtimen poikkipinta-ala ( $\text{mm}^2$ ).

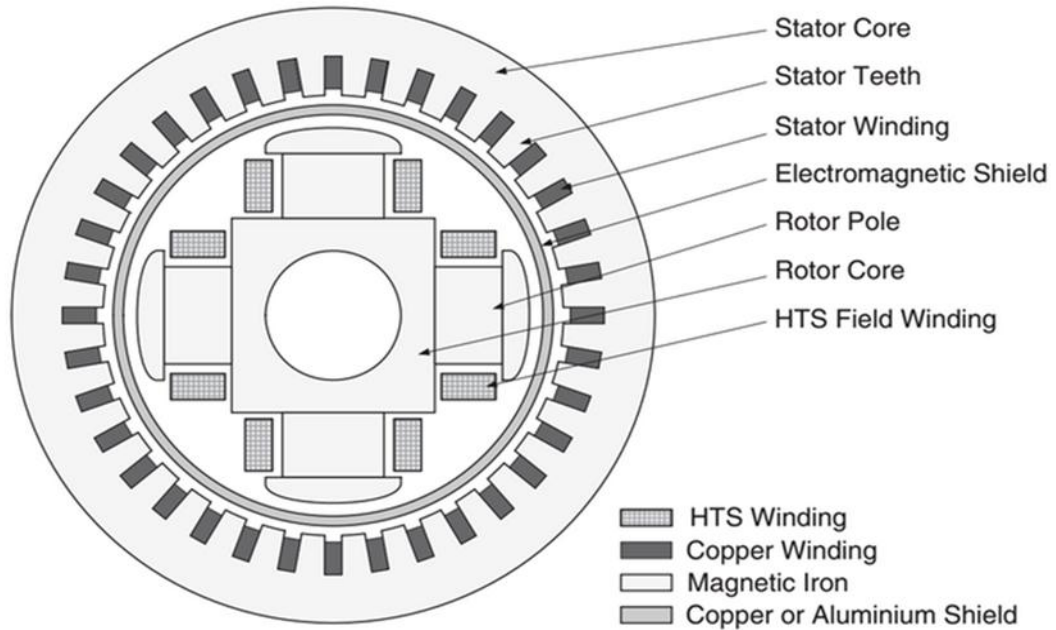
Akuilta vaihtosuuntaaja sijoitettiin akkujen läheisyyteen jotta johtojen vetäminen hel-  
pottuisi. Laskelmien mukaan tässä voidaan käyttää samaa johtoa kuin generaattorista  
akuille. Käyttämällä samaa johtoa säästää hieman aikaa ja vaivaa, sekä varastot eivät  
täyty turhista johdon pätkistä. Matka mastolta sisätiloihin on n. 5 m. Laskussa pitää ot-  
taa huomioon vaihteleva ulkolämpötila (talvi/kesä). Johtimen paksuus laskettiin interne-  
tissä olevan laskenta ohjelmiston avulla (Harraste elektroniikka 2014.)

### 3.7 Generaattori

Generaattori on laite jolla tuotetaan sähköä mekaanista energiaa hyväksikäyttäen. Generaattori koostuu pääsääntöisesti kahdesta osasta, staattorista ja roottorista. Sähkön johtimen liike magneettikentässä muodostaa sähköä. Tuulivoimaloissa käytetään ainakin kahta erilaista generaattori tyyppiä, aksiaalivuogeneraattori sekä radiaalivuogeneraattori. Harrastelija piireissä käytetään enemmän aksiaalivuogeneraattori mallia, koska tämä on helpompi valmistaa autotalli välineillä. Nämä mallit on esitetty kuvissa 20 ja 21. (Huittinen ym. 2003, 297.)



Kuva 20. Aksiaalivuogeneraattori (Free Wind Generator Plans 2013).



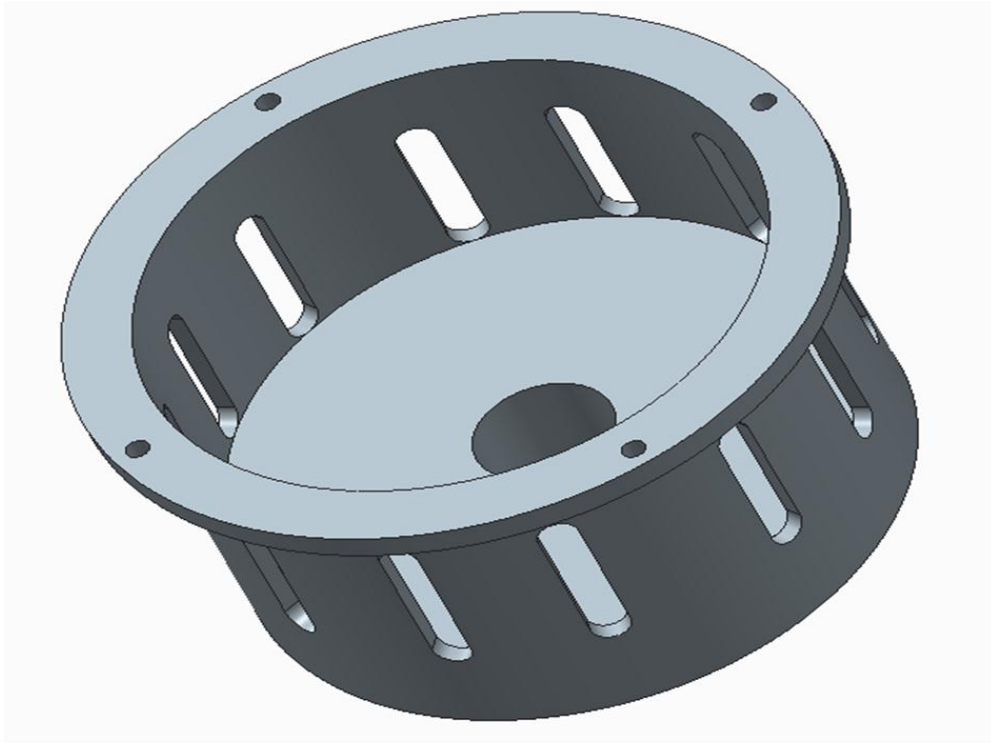
Kuva 21. Nelinapainenradiaalivuogeneraattori (Tong 2010, 318.)

Nykyiset isot voimalat (3 MW.) Pyörivät noin 16- 20 kierrosta minuutissa. Tulevaisuudessa voimaloiden koon kasvaessa kierrosnopeudet pienevät noin 10:neen kierrokseen minuutissa. Yleisesti voimaloihin on jouduttu suunnittelemaan myös vaihdelaatikko jolla saadaan nostettua kierrosnopeudet suuremmiksi, että nämä sopisivat paremmin generaattoreille. Vaihteisto tuo taas yhden huollettavan osan sekä lisää voimalan painoa, joka on huono asia varsinkin vaaka- akseli voimaloissa. (Huittinen ym. 2003, 285.)

Vertaillen generaattoreiden hintoja, tuli ilmi että on halvempi irrottaa generaattori halvasta Kiinalaisesta aggregaatista kun tilata se erikseen valmistajalta. Generaattori vaatii täydentehon saavuttamiseksi kierrosnopeuden 1500 rpm joten tarvitaan vaihdelaatikko voimalan ja generaattorin väliin. Parhaan hyödyn tosin olisi voinut saada jos olisi itse tehnyt generaattorin kestopagneeteilla.

Generaattoriin piti valmistaa uusikansi sorvaamalla sekä laakerit täytyi vaihtaa että ne kestävät pystysuuntaisenrasituksen. Generaattori asennetaan maston sisälle heti vaihdelaatikon perään. Tällä tavalla se saadaan suojattua hyvin. Kansi valmistetaan alumiinista. Generaattori on kaksinapainen. Alapuolella on kuva uudelleen suunnitellusta generaattorin kannesta.





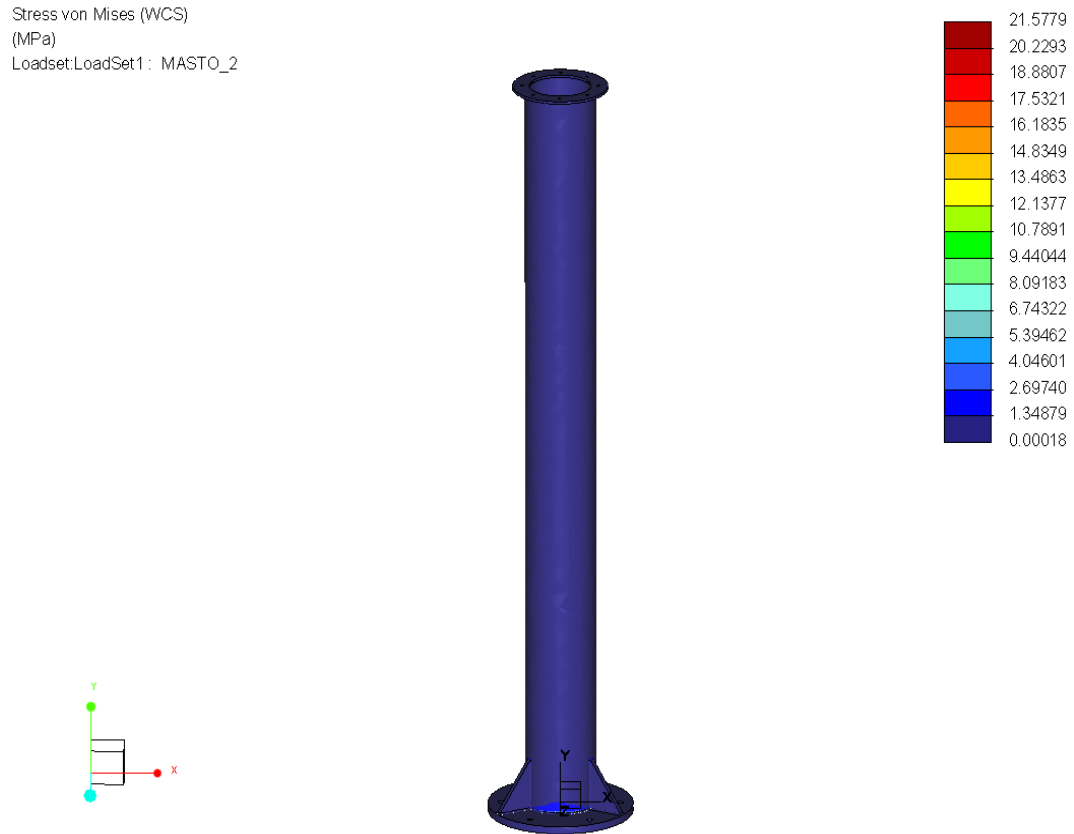
Kuva 22. Uudelleen suunniteltu generaattorinkansi (Kuva: Kankkunen 2014.)

### 3.8 Masto

Masto tehtiin S355J2G3 -teräsputkesta esitetty kuvassa 23. Putken ulkohalkaisija sekä seinämänpaksuus ovat 298,5x12. Maston mitoittamisessa voimat eivät olleet rajoittava tekijä, vaan mitoitus tehtiin generaattorin halkaisijan mukaan. Mastoon kohdistuvat voimat jäävät pieniksi, kuten näkyy kuvasta 24. Mastolle pitää valaa betoninen antura jotta se saadaan pysymään pystyssä. Anturan mitoituksen suorittaa vielä rakennuspuolen insinööri, mutta antura on suurinpiiretein kokoa metri kertaa metri ja syvyys puoli metriä.



Kuva 23. Voimala varten suunniteltu masto (Kuva: Kankkunen 2014.)



Kuva 24. Maston rasitus (Kuva: Kankkunen 2014.)

### 3.9 Vaihdelaatikko

#### 3.9.1 Kaavastot

Pysty akselituulivoimalan matalasta pyörintänopeudesta johtuen, voimalaan jouduttiin lisäämään vaihdelaatikko. Vaihdelaatikkomalliksi valittiin planeettavaihteisto. Tämän tyyppinen vaihdelaatikko on helppo lisätä voimalan ja generaattorin väliin. Vaihdelaatikon mitoittaminen lähtee liikkeelle välityksen laskennasta. Aikaa ja hermoja säästääkseni valitsin valmiin planeettavaihteiston. Vaihdelaatikko on tuulivoimalassa ehkä se äänekkäin komponentti joten kannattaa yrittää alun perin suunnitella voimala ilman vaihteistoa.

Pystyakselitiulivoimalla siipiennopeus on lähes sama kuin tuulennopeus. Voidaan siis laskea voimalan pyörimisnopeus tuulennopeuden avulla. Näissä laskennoissa käytetään tuulen nopeutena 4 m/s koska laitos sijaitsee Joensuun lähistöllä.

$$V = r\omega \text{ (Valtanen 2010, 200.)}$$

$v$  = nopeus (m/s)

$r$  = ympyrän säde (m)

$\omega$  = kulmanopeus (rad/s)

Tästä ratkaistaan kulmanopeus ja sen avulla lasketaan laitoksen pyörimisnopeus (rpm.)

$$n = \frac{\omega}{2\pi} * 60 \text{ (Valtanen 2010, 200.)}$$

Suurin osa generaattoreista vaatii 1500 rpm. Kierrosnopeuden toimiakseen kunnolla, nyt kun tiedetään voimalan pyörimisnopeus, niin voidaan laskea miten kovan välityksen tarvitsemme vaihdelaatikolle.

$$\eta = \frac{n_2}{n_1} \text{ (Valtanen 2010, 876.)}$$

$n_2$  = ulos lähtevä pyörimisnopeus (1/s)

$n_1$  = sisään tuleva pyörimisnopeus (1/s.)

Välityksen selvittämisen jälkeen pitää katsoa että vaihteisto kestää voimalasta syntyvän väännön sekä sisään tulevan, että ulos lähtevän. Sääolosuhteet sekä voitelu kannattaa myös ottaa huomioon vaihteistoa valittaessa.

### 3.9.2 Toteutus

Planeettavaihteisto tilataan Mekanex Oy:ltä. Mitoitus aloitettiin laskemalla ensiksi generaattorin tarvittavan väännön määrän. Sekä voimalan tuottaman väännön. Laskusta huomattiin että vääntömomentti on suurin piirtein sama kuin 2.2 kW -sähkömoottorilla.

Laskukaavalla laskettuna vääntö on pienempi kuin oikeassa tilanteessa, koska pitää ottaa huomioon hukkatehot sekä kitkat. Laskettuna vääntömomentti on 14 Nm. Taulukon perusteella vääntömomentti on 14.5 Nm. Siipien tuottama vääntömomentti on yksinkertaisesti laskettu voima kertaa varsi.

$$386,88 \text{ N} * 0,75 \text{ m} = 290,16 \text{ Nm}$$

$$M = T = 9550 * \frac{P_2}{n} \text{ (Valtanen 2010, 981).}$$

$$M = T = W_s = Nm = J$$

$W_s$ = wattisekunti

$Nm$ = newtonmetri

$J$ = joule

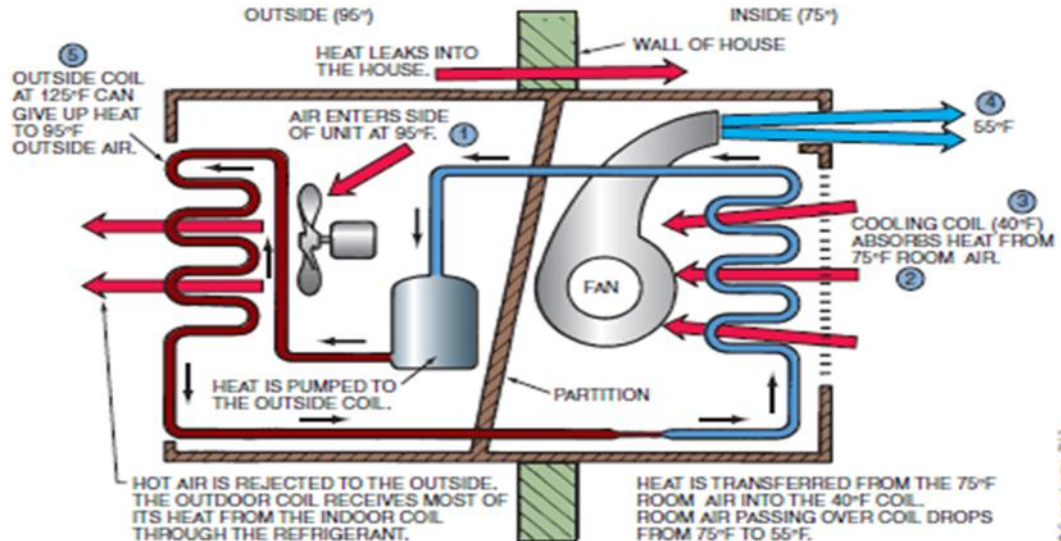
$n$ = pyörimisnopeus (1/min)

$P_2$ = mekaaninen teho (W.)

Mekanex Oy:ltä tilattavasta Planetroll planetdrive PD155 välityssuhteella 40. Ulostuleva vääntömomentti on 270 Nm tämä riittää hyvin generaattorin pyörytykseen. Vaihdelaatikko on aika iso investointi, joten se kannattaa tilata vasta kun on varma että se tarvitaan.

### 3.10 Ilmalämpöpumppu

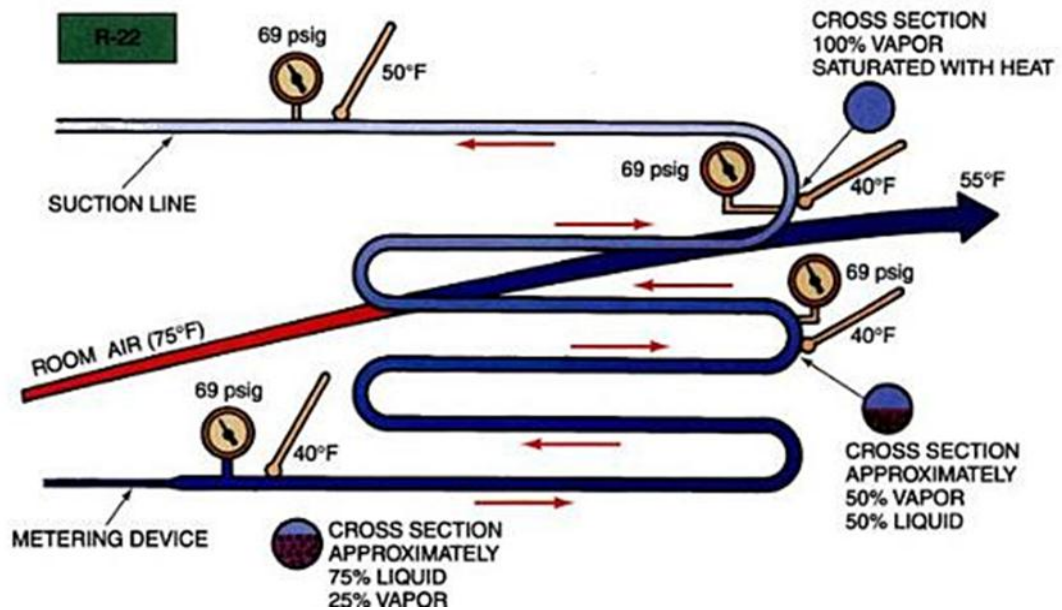
Ilmalämpöpumpulla siirretään lämpöenergiaa ulkoyksikön sekä sisäyksikön välillä tarpeesta riippuen. Samalla tavalla toimii myös jääkaappi. Ilmalämpöpumpuilla voi myös usein kosteuttaa tai muuten parantaa sisäilmaa. (Withman, B., Tomczyk, J., Johnson B & Silberstein, E. 2009. Refrigeration & Air Conditioning Technology, 39.)



Kuva 25. Ilmalämpöpumpun peruseriaate (Whitman ym. 2009, 39).

Ilmalämpöpumpun sisällä kiertää kylmäaine. Sen olomuotoja muuttamalla paine-erojen avulla saadaan siirrettyä lämpöä. Kuvassa 25 kohdassa yksi kerrotaan ulkoilman olevan 95 °F (35 °C). Kohdassa kaksi sisäilman kerrotaan olevan 75 °F (23.8 °C). Kohdassa kolme kylmäaine höyrystetään, jolloin se sitoo lämpöä. Kennon läpi virtaava ilma viilenee ja se viilennetty ilma puhalletaan takaisin huoneistoon (kohta 4). Viimeisessä kohdassa kylmäaine muuttuu jälleen nesteeksi ja luovuttaa lämpöä. Lämmin ilma puhalletaan sen jälkeen takaisin ulkoilmaan puhaltimen avulla. Lämmitys tilanteessa virtaus käännetään, jolloin höyrystyminen tapahtuu ulkona ja tiivistyminen sisällä (Whitman ym. 2009, 39.)

Vesi höyrystyessään sitoo lämpöä, tätä ilmiötä hyödynnetään ilmalämpöpumpuissa. Höyrystyslämpötilaa säädellään paineen avulla ja painetta säädetään koneistossa olevan kompressorin avulla. Vesi alkaa kiehua alhaisemmassa lämpötilassa, kun ilmanpainetta lasketaan. Esimerkiksi Yhdysvalloissa Coloradossa joka on noin 1.5 km merenpinnan yläpuolella. Perunoiden keittäminen vie pitemmän ajan, koska ilman paine on 855 hPa. Tässä paineessa vesi kiehuu jo 95 °C. Painetta nostettaessa veden kiehumislämpötilakin kasvaa (Whitman ym. 2009, 40.)



Kuva 26. Ilmastointilaitteen toimintaperiaate (Whitman ym. 2009, 32).

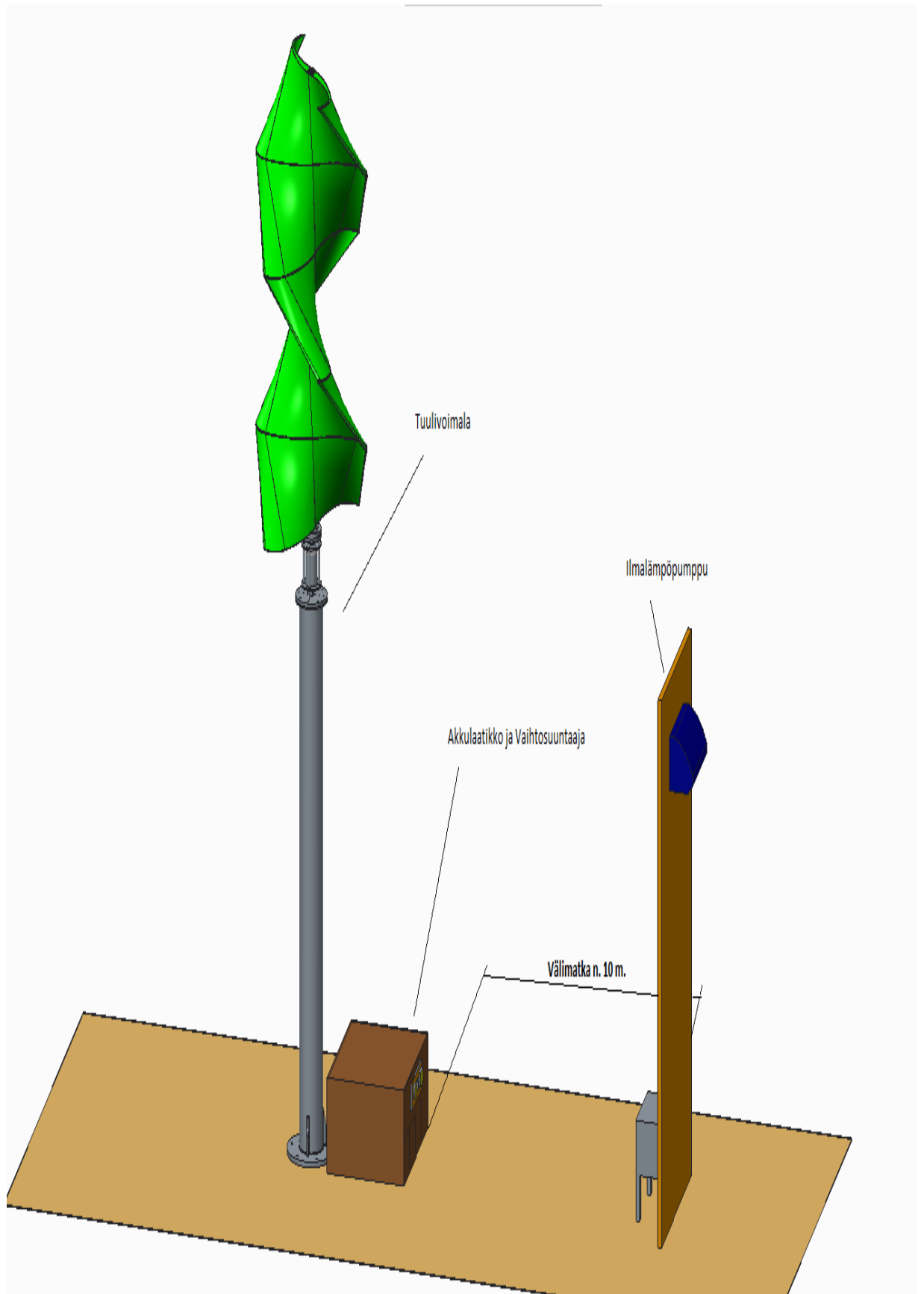
Kuvassa 26 selitetään vielä tarkemmin ilmalämpöpumpun toimintaa. Ilmastointilaitteen höyrystin viilentää ilmaa höyrystämällä veden huoneen lämpötilaa alemmassa lämpötilassa. Järjestelmään pumpataan nestettä, jonka kiehumispistettä säädellään alipaineen avulla alemmaksi kuin huoneen lämpötila. Putkisto ottaa lämpöä sen ohi virtaavasta ilmasta viilentäen huoneiston lämpötilaa.

Ilmalämpöpumppu ostetaan valmiina ja liitetään voimalaan normaalilla tavalla. Ajan säästämisen takia ei alettu erikseen suunnittelemaan erillistä järjestelmää. Hyötysuhteiden kannalta olisi saatu paremmat arvot jos olisi voitu kiinnittää voimala pyörittämään suoraan ilmalämpöpumpun kompressoria. Kuten jo aiemmin mainittiin, ilmalämpöpumpuksi valittiin Online Professional N09L. Valinta tapahtui tarvittavan tehon perusteella.

### 3.11 Kokoonpano

Tuulivoimalan kokoonpano tapahtuu useammassa vaiheessa. Ensin täyttyy kasata siivet ja keskiakseli. Seuraavaksi magneetit liimataan magneettilevyyn sekä laakeri sovitetaan paikalleen. Tämän jälkeen liitetään generaattori ja vaihdelaatikko toisiinsa. Kokonaisuus liitetään sitten generaattorin kiinnityslevyyn. Edellisen toimenpiteen jälkeen siipien ja keskiakselin paketti voidaan kiinnittää generaattoriin ja vaihdelaatikkoon. Lopuksi koko järjestelmä nostetaan nosturin avulla maston päälle. Maston sisällä on oltava johdotukset valmiina tässä vaiheessa. Tälle voimalatyypille ei tarvita vetää vaijereita lisätueksi, koska pystymallin voimala ei ota samalla tavalla tuulta vastaan.





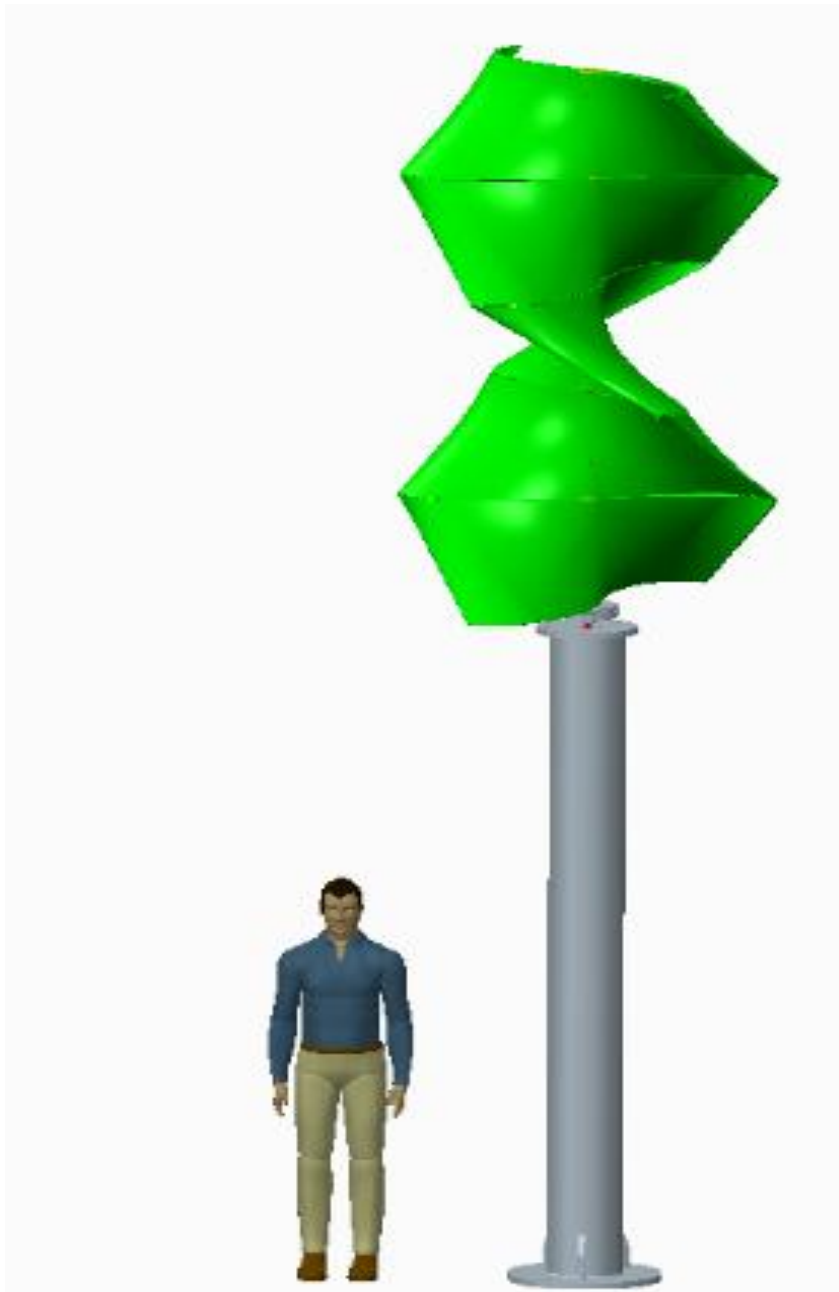
Kuva 27. Komponenttien paikoituskuva (Kuva: Kankkunen 2014.)

Kuvassa 27 on esitetty miten koko kokonaisuus on suunniteltu asennettavan. Akkulaa-  
tikko ja vaihtosuuntaaja sijoitetaan voimalan välittömään läheisyyteen, jotta saataisiin  
eliminoitua turhaa hukkasähköä. Ilmalämpöpumppu asennetaan hallin seinään ja voima-  
la tarvitsee avaran tilan, näin ollen niiden välimatka on noin 10 m.

Tuulesta saatava teho valmiilla voimalalla 4 m/s tuulella:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * A * C_p \text{ (Haapanen 2004.)}$$

$$\frac{1}{2} * 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 4^3 \text{ m/s} * (2,5 \text{ m} * 1,5 \text{ m}) * 0,25 = 36,75 \text{ W}$$



Kuva 28. Koottu voimala (Kuva: Kankkunen 2014.)

Kuvasta 28 nähdään kootun voimalan korkeus suhteessa aikuiseen mieheen (175 cm). Tuulesta saatavan tehon kaavan mukaan voimala tuottaisi vain 36,7 W. Tämä tuotto on todellisuudessa hieman erilainen ja riippuu generaattorista saatavasta tehosta. Voimalassa on vaihdelaatikko mikä nostaa generaattorin kierrosnopeudet 4 m/s tuulella 1500 rpm.

### 3.12 Kustannusarvio

Rajauksessa määriteltiin työn hintakatoksi 10 000 €. Tässä osiossa arvioidaan tehtävien sekä erikseen tilattavien osien hinnat. Hinnat eivät välttämättä täsmää aivan täydellisesti nykypäiväisiä hintoja. Tilattavien kappaleiden hinnat on kilpailutettu kolmella eri toimittajalla ja niistä on valittu halvin tarjous. Yhteenlaskettu hinta on 10 873,00 €. Oma- valmistusteisten osien hinta tosin on todellisuudessa halvempi. Kustannuksissa saataisiin säästöä kehittämällä siipiprofiilia hieman kevyemmäksi.

#### 3.12.1 Omavalmisteiset kappaleet

Suurin osa voimalaan tarvittavista kappaleista pyritään valmistamaan Suhmuran Metalli Ky:n tiloissa. Taulukossa 1 on esitetty arvio omavalmisteisten kappaleiden hinnoista. Materiaaleina pyrittiin pitämään sellaisia materiaaleja, joita löytyy Suhmuran Metalli Ky:n varastosta.

Taulukko 1. Omavalmisteiset kappaleet

Nimike	Materiaali	Kappalehinta	kpl	yht.
Keskiakselin alaosa	En Aw 6082	115	1	115
Keskiakselin Keskiosa	En Aw 6082	70	3	210
Keskiakselin yläosa	En Aw 6082	115	1	115
Kiinnityslevy 4	En Aw 6082	55	6	330
Magneettilevy yläpuoli	En Aw 6082	195	1	195
Magneettilevy alapuoli	En Aw 6082	195	1	195
Vaihdelaatikon sovitin	S355J2G0	110	1	110
Vaihdelaatikon sovitinlevyt	S355J2G0	105	2	210
Vaihdelaatikon tukijalat	S355J2G0	70	12	840
Generaattorin kiinnityslevy	S355J2G0	140	1	140
Generaattorin kansi	En Aw 6082	245	1	245
<b>Kokonaishinta €</b>				<b>2705</b>

### 3.12.2 Tilattavat kappaleet

Kaikkia kappaleita ei pysty tai kannata valmistaa itse. Taulukossa 2 esitetään lista tilattavista kappaleista. Listasta puuttuu siipiä varten tarvittava muotti. Se ei ole listalla, koska se koetetaan vielä korvata jollain muulla tavalla. Taulukosta huomaa että suurin osuus hintaan tulee lujitemuoveista. Tämä johtuu siitä, että joudutaan laminoimaan useampi kerros rasituksen keston takia.

Taulukko 2. Lista Tilattavista kappaleista

Nimike	Materiaali	Kappalehinta	kpl	yht.
Siipilevy	En Aw 6082	150	10	1500
Vaihdelaatikko		650	1	650
Lujitemuovit ja gelcoat		2600	1	2600
Ilmalämpöpumppu		1490	1	1490
Masto	S355J2G0	700	1	700
Magneetit	Nd2Fe14B	2,2	40	88
Akut	AMG	199	4	796
Generaattori		299	1	299
Laakeri	En Aw 6082	45	1	45
<b>Kokonaishinta €</b>				<b>8168</b>

## 4 Pohdinta

Tämä työ oli loppujenlopuksi paljon vaativampi kuin mitä ensin oletin. Siipien suunnittelusta varsinkin olisi voinut kirjoittaa jo oman erillisen opinnäytetyön, sen takia se jäi tässä työssä vähän pienemmälle huomiolle. Näin jälkeensä ajateltuna generaattorikin olisi kannattanut valmistaa itse. Tällä tavalla olisi voitu jättää vaihdelaatikko pois, kun generaattori oltaisi voitu mitoittaa vastaamaan pieniä kierrosnopeuksia. Tavoitteisiin päästiin sillä voimala pystyy tuottamaan tarvittavan määrän energiaa, jotta se pystyy pyörittämään ilmalämpöpumppua.

Sain ideoita tästä työstä joita lähdemme kehittämään eteenpäin Suhmuran Metallin Ky:llä. Itse voimalaa tuskin tulee rakennettua ainakaan aivan tässä kokonaisuudessa. Seuraava kehitys tälle voimalalle olisi voimalan painon pienentäminen sekä hyötysuhteen parantaminen. Siipien profiiliin pitää käyttää enemmän aikaa, että saataisiin suunniteltua kustannustehokkaampi malli. Tässä työssä oleva siipien profiili on hyvin hankala valmistaa ja on sen takia kovin kallis. Jatkossa saatetaan yrittää kehittää voimalaitosta mihin olisi jo itse laitteeseen yhdistetty ilmalämpöpumppu. Tällä tavalla saataisiin tehtyä laitoksesta hieman kustannustehokkaampi.

Työn aloitin vuoden alussa, tammikuussa ja sain sen valmiiksi kesäkuussa. Aikataulu ja tavoitteet eivät jossain määrin pitäneet, koska voimala ei valmistunut tämän työn aikana. Tämän työn avulla saatiin selvitettyä että se olisi mahdollista valmistaa näillä suunnitelmilla. Tämän työn aikana opin enemmän sähköpuolen asioista ja varsinkin generaattoreiden toiminta tuli paremmin selville. Työn aikana selvisi myös monta asiaa liittyen siipiprofiilin suunnitteluun ja niihin joudun palaamaan ehkä uudestaan kuluvan vuoden aikana, kun siipiprofiilia on tarkemmin tutkittu. Siipien materiaalin valinnassa tuli ilmi että useamman kerroksen laminoiminen koituu kovin kalliiksi. Jatkotutkimuksissa pitää selvittää mikä olisi maksimi kerroksenpaksuus lujitemuoville, sekä mikä olisi paras kuitusuuntaus lasikuitukankaalle.

## Lähteet

- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe D & Bossanyi E. 2011. Wind energy handbook second edition. John Wiley & Sons Ltd.
- Ek-automatic. 2013. Ilmalämpöpumppu. [http://www.ek-automatic.com/sahkotalo/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=eny\\_fly\\_default.tpl&product\\_id=110&category\\_id=1&option=com\\_virtuemart&Itemid=3&lang=fi](http://www.ek-automatic.com/sahkotalo/index.php?page=shop.product_details&flypage=eny_fly_default.tpl&product_id=110&category_id=1&option=com_virtuemart&Itemid=3&lang=fi) 3.4.2014.
- Eurosolar. 2008. Järjestelmän mitoitus ei ole vaikeaa. <http://www.eurosolar.fi/aurinkoenergiaopas/4s.pdf> 14.5.2014.
- Green Energy. 2013. Free Wind Generator Plans. <http://technologygreenenergy.blogspot.fi/2013/11/free-wind-generator-plans.html> 3.3.2014.
- Haapanen E. 2004. Tuulivoimatekniikka ja aerodynamiikka PDF. <http://www.tuulitaito.fi/> 22.2.2014.
- Harraste elektroniikka. 2014. Johtimien poikkipinta-alat ja resistanssit. <http://koti.mbnet.fi/~huhtama/ele/index.php?si=ml18.sis&pa=jaaa> 2.2.2014.
- Huittinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen S., 2008. Voimalaitos tekniikka. Opetushallitus.
- Joensuun kaupunki. 2010. Joensuun kaupungin rakennusjärjestys. <http://www.joensuu.fi/documents/11127/243976/Rakennusj%C3%A4rjestys.pdf/2ea25d3a-c688-45f8-ad8e-49d38c0f086f> 3.3.2014.
- Loctite. 2014. Loctite teolliset liimat ja tiivisteet. <http://www.loctite.fi/Loctite-4087.htm?countryCode=fi&BU=industrial&parentredDotUID=productfinder&redDotUID=000001FNQB> 12.5.2014
- Manwell, J., McGovan, J., & Rogers A. 2009. Wind energy explained, theory, design and application. John Wiley & Sons Ltd.
- Minifactory. 2014. 3D-tulostin. <http://www.minifactory.fi/3d-tulostin/> 10.5.2014.
- Motiva. 2014. Pientuulivoima. [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/tuulivoima/pientuulivoima](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima/pientuulivoima) 10.5.2014.
- Reps. 2014. Tuotteet. <http://www.reps.fi/fi/frames-prod-regulators-fi.htm> 6.4.2014.
- Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M., & Komppa V. Komposiittirakenteet 2003.
- Sanna Saarinen, 2013. Totuus Tuulivoimasta. Mividata Oy.
- Solar electric 2014. Inverter basics and selecting the right model. <http://www.solar-electric.com/inverter-basics-selection.html> 1.5.2014.
- Suhmuran Metalli Ky. 2014. Yritys. <http://www.suhmuranmetalli.fi/yritys/index.php> 10.6.2014.
- Suomen tuuliatlas 2014. Mitä tuuli on? [http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus\\_2.html](http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_2.html) 5.4.2014.
- Supermagnete. 2014. Frequently asked questions. <http://www.supermagnete.de/eng/faq/What-material-are-your-magnets-sheets-and-tapes-made-of#pu574> 16.3.2014.
- Tong W. 2010. Wind power generation and wind turbine design. WIT press. 2010.
- Tuulivoimatieto. 2014. Tuulivoimaloiden rakenne. <http://www.tuulivoimatieto.fi/rakenne> 16.3.2014.
- Valtanen E. 2010 Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy

Whitman, B., Tomczyk, J., Jhonson B & Silberstein, E. 2009. Refrigeration & Air Conditioning Technology.