

Tommi Rantala

**PASSIIVINEN LAPAKULMANSÄÄTÖ VAAKA-AKSELISESSA  
PIENTUULIVOIMALAITOKSESSA**

Tommi Rantala

**PASSIIVINEN LAPAKULMAN SÄÄTÖ VAAKA-AKSELISESSA  
PIENTUULIVOIMALAITOKSESSA**

Tommi Rantala  
Opinnäytetyö  
Kevät 2018  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

---

Tekijä: Tommi Rantala

Opinnäytetyön nimi: Passiivinen lapakulman säätö vaaka-akselisessa pientuuli-voimalaitoksessa

Työn ohjaaja: Esa Kontio

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2018

Sivumäärä: 37 + 4

liitettä

---

Pientuulivoimalaitoksen myrskysuojaus on koettu haastavaksi. Erilaiset suo-jaustavat vaativat joko paljon huoltoa tai ovat tehottomia, kun lähestytään korkeita tuulennopeuksia. Työn tilaajalla oli idea, miten myrskysuojaus voidaan tehdä turvallisesti, pienillä huoltotoimilla ja tehokkaasti. Näin saadaan tuote, joka sopisi esimerkiksi mökkikäyttöön, jolloin omistajalla ei ole mahdollisuuksia valvoa tuulivoimalaa aktiivisesti.

Opinnäytetyössä tutkittiin idean toteutusmahdollisuuksia. Työn tavoitteena oli suunnitella passiivinen lapakulman säätö käyttäen tuulenpainetta ja keskeisvoimaa käynnistävänä tekijänä. Voimien vastavoimaksi tutkittiin mahdollisuutta käyttää polyuretaanipuristusjoustusta. Suunnittelun tavoitteena oli saada valmiiksi malli, josta voidaan tehdä prototyyppi.

Työssä selvitettiin tuulivoimalan rakennetta, tuulienergian syntymekanismia, erilaisia mahdollisuuksia pientuulivoimalan myrskysuojaukseen ja suunniteltiin 3D-mallinnusohjelmalla roottorin napa passiivisella lapakulmansäädöllä. Roottorin navan suunnittelussa määriteltiin rakenteeseen vaikuttavat voimat, suunniteltiin 4,6 m halkaisijaltaan olevalle roottorille napa käyttäen 3D-mallinnusohjelmaa. Mallin kestävyyttä käyttötarkoituksessa tutkittiin 3D-mallinnusohjelman FEM- analyysityökalulla. Napa on suunniteltu kestäväksi tuulen ja sään aiheuttamat kuormat Suomen olosuhteissa.

---

Asiasanat: tuulivoima, siipi, lapakulma, roottori, tuulienergia

## **ALKULAUSE**

Kiitos työn tilaajalle, perheelle ja työn ohjaajalle lehtori Esa Kontiolle. Pitkä matka mutta tulipa kuljettua.

15.6.2018 Tommi Rantala

# SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ   | 3  |
| ALKULAUSE   | 4  |
| SISÄLLYS  | 5  |
| 1 JOHDANTO  | 7  |
| 2 ROOTTORI  | 8  |
| 2.1 Roottorin teho                                  | 9  |
| 2.1.1 Ilmavirtauksen teho                           | 9  |
| 2.1.2 Betzin laki                                   | 9  |
| 2.2 Roottorin napa                                  | 10 |
| 2.3 Roottorin lapa                                  | 11 |
| 2.3.1 Vääntömomentti                                | 11 |
| 2.3.2 Suhteellinen tuulennopeus                     | 11 |
| 2.3.3 Siipiprofiili                                 | 12 |
| 2.3.4 Lapaan vaikuttavat voimat                     | 12 |
| 3 TUULIVOIMALAN MYRSKYSUOJAUS                       | 14 |
| 3.1 Tuulensuunnasta pois kääntäminen                | 14 |
| 3.1.1 Passiivinen kääntö                            | 15 |
| 3.1.2 Aktiivinen kääntö                             | 16 |
| 3.2 Lapakulman muuttaminen                          | 16 |
| 3.3 Aerodynaaminen jarru                            | 18 |
| 3.4 Passiivinen sakkaussäätö                        | 19 |
| 3.5 Mekaaninen jarru                                | 19 |
| 4 PASSIIVISEN LAPAKULMANSÄÄDÖN SUUNNITTELU          | 20 |
| 4.1 Suunniteltavan lapakulmasäädön toimintaperiaate | 20 |
| 4.2 Rakenteen suunnittelu                           | 20 |
| 4.3 Sauvakoneiston suunnittelu                      | 23 |
| 4.4 Polyuretaanijousen valinta                      | 24 |
| 5 SÄÄTÖLAITTEEN LUJUUSTARKASTELU                    | 27 |
| 5.1 Lapakiinnike                                    | 27 |
| 5.1.1 Lapakiinnikkeen voimat                        | 27 |
| 5.1.2 Lapakiinnikkeen FEM-analyysi                  | 28 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2 Polyuretaanijousen kiinnityskappaleen voimat ja FEM-analyysi | 30 |
| 5.3 Kulmasauvan korvakkeen voimat ja FEM-analyysi.               | 32 |
| 6 LOPPUSANAT   | 34 |

# 1 JOHDANTO

Harrastajat ovat kokeneet pientuulivoimalaitoksen tehon hallinnan ja myrsky-suojauksen haastavaksi. Tässä työssä paneudutaan ratkaisumahdollisuuteen rajoittaa tehoa ja tätä kautta suojautua tuulen aiheuttamilta vahingoilta pientuulivoimalaitoksessa. Menetelmän päätavoitteena on saada huoleton roottori myös korkeilla tuulen nopeuksilla pientuulivoimalaitoksessa. Pientuulivoimalaitos on yksikkö, jonka roottorin halkaisija on alle 16 m ja nimellisteho alle 50 kW. (1, s.122)

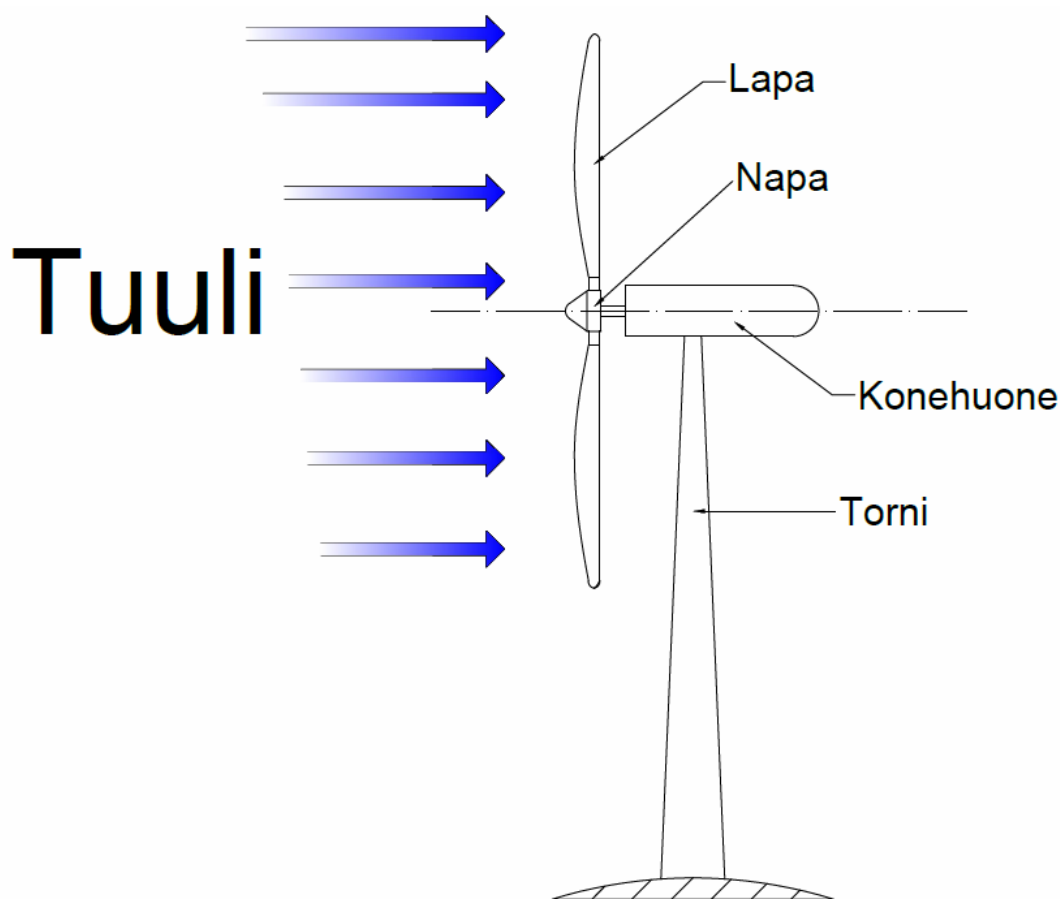
Työssä perehdytään tapoihin toteuttaa lapakulman säätö ja tutkitaan tilaajan ideaa passiivisesta lapakulman säädöstä vaaka-akselisessa pientuulivoimalaitoksessa. Tällä menetelmällä saadaan roottorin pyörimisnopeuden kiihtyminen pysäytettyä kasvattamalla roottorin siiven kohtauskulmaa niin suureksi, että siipi sakkaa (2, s. 332). Työn tuloksena tuotetaan dokumentit prototyypin valmistamiseen sekä pohditaan rakenteen soveltuvuutta kuormitusten ja toteutettavuuden kannalta.

Opinnäytetyö tehdään tuulivoimalaharrastaja Vesa Pehkoselle, joka on aiemmin teettänyt Oulun ammattikorkeakoulussa työt Ville Ahola Tuuligeneraattorimastojen käännön ohjaus (3) ja Jarkko Finnilä Pientuulivoimalaitoksen maston suunnittelu, lujustekninen tarkastelu ja kustannusten optimointi (4).

## 2 ROOTTORI

Roottoriin sisältyy napa sekä potkuri, joka koostuu yleensä 1–3 lavasta. Tuuli-voimalaitoksen roottorit jaetaan yleisesti pysty- ja vaaka-akselisiin roottoreihin. (5, s. 85.)

Tässä työssä perehdytään vain vaaka-akseliseen etutuuliroottoriin, joka on nykyään yleisin tapa toteuttaa tuulivoimala (kuva 1). Kolmeen lapaan on päädytty pienempien kuormien ja hieman tehokkaamman tuoton vuoksi. Kaksi- ja yksilapaisilla roottoreilla on taipumus värinä, tämä on seurausta massahitausvoimien eroista roottorin vaaka- ja pystyakselilla maan vetovoiman kiihtyvyyden vaikutuksesta. (5, s. 85, 102–107.)



KUVA 1. Vaaka-akselinen tuulivoimalaitos (5, s. 85)



## 2.1 Roottorin teho

### 2.1.1 Ilmavirtauksen teho

Ilmavirtauksen energia on ilmamolekyylien liike-energiaa, joka muutetaan tuuli-voimalassa roottorin liike-energiaksi. Ilmavirtauksen liike-energia  $W_0$  voidaan esittää mekaniikan liike-energian yhtälöllä (kaava 1). (6, s. 36.)

$$W_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad \text{KAAVA 1}$$

$m$  = ilmavirtauksen massa (kg)

$v_0$  = ilmavirtauksen nopeus (m/s)

Kun yhtälö (kaava 1) derivoidaan ajan suhteen, saadaan ilmavirtauksen teho  $P_0$  johdettua (kaava 2) (6, s. 36.).

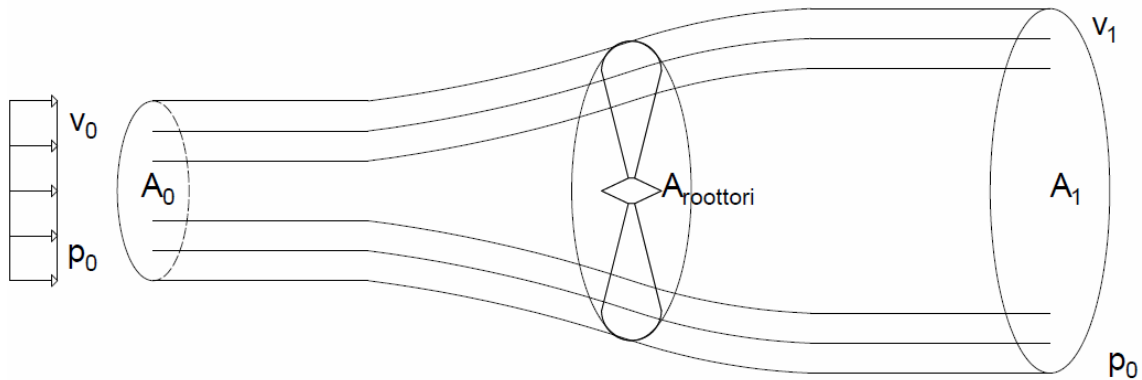
$$P_0 = \frac{1}{2}\rho Av_0^3 \quad \text{KAAVA 2}$$

$\rho$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  = ilmavirtausta vastaan kohtisuora pinta-ala (m<sup>2</sup>)

### 2.1.2 Betzin laki

Fyysikko Albert Betz esitti vuonna 1920 Betzin lakina tunnetun yhtälön (kaava 3), jolla voidaan esittää teoreettinen yläraja ideaaliroottorin tehon (kuva 2) ja ilmavirtauksen tehon suhteelle. Betzin laissa ilman oletetaan olevan kokoonpuristumatonta. Ideaaliroottori on ilmaa läpäisevä kiekko, jossa on ääretön määrä lapoja, kitkaton, massaton ja vastusvoimaton sekä roottorin takana oleva ilmavirtaus oletetaan pyörteettömäksi. (6, s. 37–43.)



KUVA 2. Ideaaliroottorin periaatekuva (6, s. 37)

Betzin mallissa ilma on puristumatonta, joten roottorin ilmavirtauksella täytyy olla liike-energiaa roottorin jälkeen. Kuvassa 2 ilmaa poistuu vain oikeasta reu-  
nasta, joten kontrollitulavuuden täytyy kasvaa, jotta ilmavirtauksen massavirta  
pysyy vakiona  $A_0 < A_{\text{roottori}} < A_1$ . Jos  $v_0 = v_1$  ilmavirtaus ei hidastu, joten roottori ei  
ota tehoa ilmavirtauksesta. Toisaalta jos  $v_1 = 0$  ilman puristumattomuus ei voi  
toteutua, jolloin malli on epäpätevä. (6, s. 37–43.)

Betz etsi teoriassaan nopeudelle  $v_1$  optimiarvon ja sai ilmavirtauksen- ja rootto-  
rin tehon suhteeksi 0,593 (kaava 3). (6, s. 42.)

$$\frac{P_{\text{turbiini}}}{P_0} = \frac{\left(1 + \frac{v_0/3}{v_0}\right) \left(1 - \left(\frac{v_0/3}{v_0}\right)^2\right)}{2} = \frac{\left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{9}\right)}{2} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \frac{8}{9}}{2} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad \text{KAAVA 3}$$

Kaavassa 3 saatu tulos on teoreettinen maksimiarvo, mitatut tulokset roottorin  
ja ilmavirtauksen tehon suhteeksi on välillä 0,25–0,4. (6, s. 43.)

## 2.2 Roottorin napa

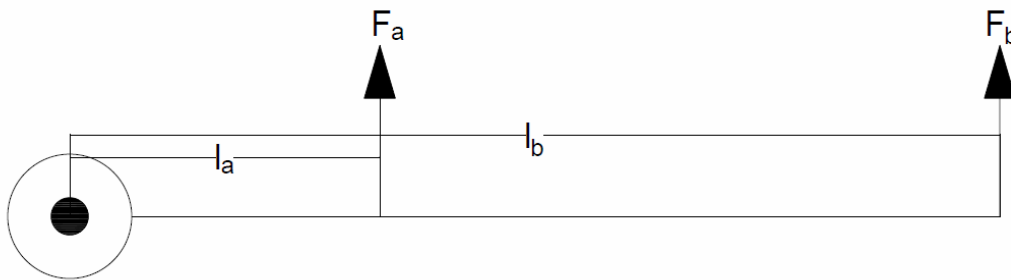
Roottorin navan tehtävänä on kiinnittää potkurin lavat generaattorin tai vaihteis-  
ton akselille. Lapojen kiinnitys napaan on yleensä säädettävissä joko roottorin  
ollessa pysäytettynä eli kiinteä lapakulma (englanniksi fixed-pitch) tai aktiivisesti  
roottorin pyöriessä eli säätyvä lapakulma (englanniksi variable-pitch). (5, s.  
111–114.)

## 2.3 Roottorin lapa

Lavan tehtävänä on muuntaa ilmavirtauksen liike-energia vääntömomentiksi. Lapa vastaa toiminnaltaan purjeverneen purjetta tai lentokoneen siipeä, joissa ilmavirtaus muutetaan veneen liike-energiaksi tai lentokoneen nostovoimaksi. Tuulivoimalan roottorissa generaattorin vääntömomentin tuottaa lavan nostovoima. Nostovoiman synnyttävät lavan pinnoilla eri nopeuksilla kulkevan virtauksen paine-erot. Lavan nostovoima muuttuu valitun siipiprofiilin, tuulen nopeuden, roottorin pyörimisnopeuden ja lavan kohtauskulman mukaan. (5, s. 97–99.)

### 2.3.1 Vääntömomentti

Vääntömomentilla mitataan voiman kykyä kiertää kappaletta tietyn akselin suhteen (kuva 3). (6, s. 52.)



KUVA 3. Vääntömomentti (6, s. 52)

Momentti on suoraan verrannollinen sekä voimaan  $F$  että voiman varteen  $l$ . Kuvassa 3 voiman  $F_b$  varsi  $l_b$  on kolme kertaa pidempi kuin voiman  $F_a$ , joten voiman  $F_b$  vaikutus akseliin on kolme kertaa suurempi kuin voimalla  $F_a$  jos voimat ovat yhtä suuret. Todetaan että suurin osa tuulivoimalaitoksen energiasta tuotetaan lähellä lavan kärkeä. Roottorin tehoa voidaan kasvattaa suurentamalla halkaisijaa. (6, s. 52.)

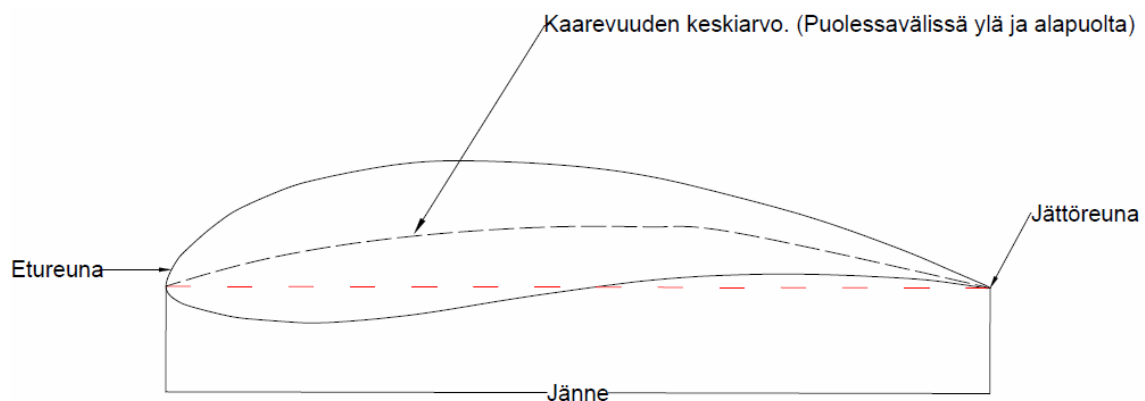
### 2.3.2 Suhteellinen tuulenopeus

Suhteellinen tuulenopeus on se ilmavirta, joka vaikuttaa roottorin lapaan. Tuulivoimalassa suhteelliseen tuuleen vaikutta maanpäällinen tuuli ja roottorin pyö-

rintänopeus (kuva 5). Kun tuulivoimalaitos on pysähdyksissä, suhteellinen tuuli on sama kuin maanpäällinen tuuli. Kun lavan ratanopeus kasvaa niin suhteellisen tuulen vaikutussuora kiertyy kohti siipiprofiilin pyörimistasoa (kuva 5), tästä johtuen lavat tehdään niin että lavan kierrekulma pienenee kärkeä kohden mentäessä. Tällä saavutetaan paras kohtauskulman arvo koko lavan pituudella. Kuvassa 5 siipiprofiili kiertää myötäpäivään lavan kärkeä kohti mentäessä. (6, s. 57.)

### 2.3.3 Siipiprofiili

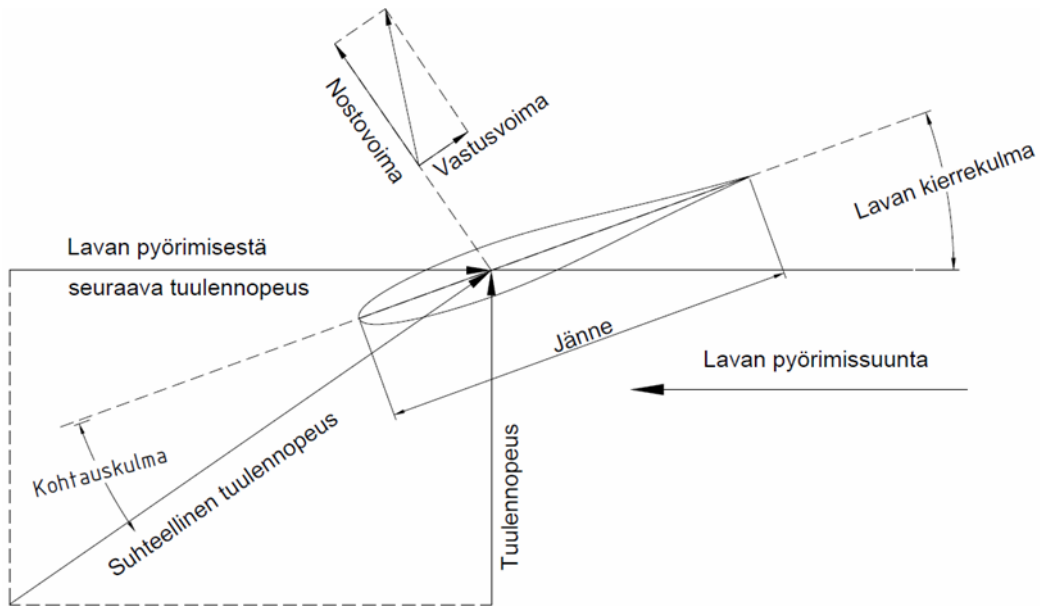
Siipiprofiili on poikkileikkaus lavasta valitussa pisteessä. Roottorin toimintaa suunniteltaessa valitulla siipiprofiililla on suuri vaikutus. Siipiprofiili pyritään valitsemaan siten, että lavan toiminta olisi tehokasta toimintaympäristössään. Siipiprofiilin (kuva 4) tärkeimmät suureet ovat siiven etureunan muoto, jättöreuna, jänteen pituus, profiilin paksuimman kohdan etäisyys etureunasta ja siiven kaarevuus. (4, s. 95.)



KUVA 4. Siipiprofiili (4, s. 95)

### 2.3.4 Lapaan vaikuttavat voimat

Kuvassa 5 näkyvät siipiprofiiliin vaikuttavat voimat. Vastusvoima on aina suhteellisen tuulen kanssa samansuuntainen, ja nostovoima on kohtisuorassa vastusvoimaan nähden. (6, s. 60.)



KUVA 5. Ilmavirran suhteellinen nopeus ja siipiprofiiliin vaikuttavat suureet (6, s. 60)

Tuulivoimalan lapa tai mitä tahansa siipiprofiilia suunniteltaessa pyritään saamaan yleensä nostovoima mahdollisimman suureksi ja minimoimaan vastusvoiman vaikutus. Vastusvoima aiheuttaa tuulivoimalassa haitallisia voimia siivelle pyrkimällä taivuttamaan siipeä taaksepäin aiheuttaen mekaanista rasitusta roottorille. (6, s. 56)

Roottorin pyöriessä lapaan vaikuttaa myös maan vetovoima sekä keskeisvoima. Keskeisvoima pyrkii vetämään lapa ja roottorin pyörimistasolla keskiöstä pois päin. (6, s. 56)

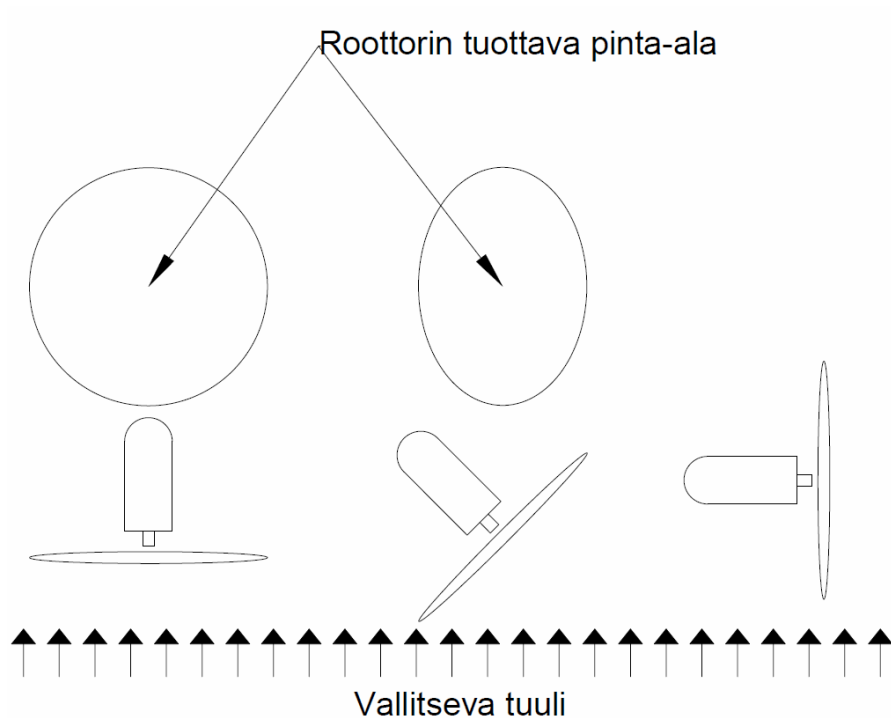
### **3 TUULIVOIMALAN MYRSKYSUOJAUS**

Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi markkinoilla olevia myrskysuojausmenetelmiä taustaksi opinnäytetyön suunnitelmalle. Kaikille suojausmenetelmille yhtenäistä on toiminnan automaattisuus. Automaattisuudella taataan turvallinen toiminta myös silloin, kun tuulivoimala ei ole valvonnan alaisena. (5, s. 128–143.)

#### **3.1 Tuulensuunnasta pois kääntäminen**

Tuulensuunnasta pois kääntäminen (englanniksi furling) on yksinkertaisin ja halvin tapa toteuttaa roottorin ylinopeussuojaus. Menetelmän haittapuolina on mainittu heikompi tuotto tuulivoimalan tehon ylärajalla ja se, että tuulen nopeuden vaihdellessa roottori saattaa alkaa heijaamaan edestakaisin aiheuttaen epätasaista tuottoa. (5, s. 133.)

Tuulensuunnasta pois kääntämisessä on tavoitteena pienentää roottorin energiaa tuottavaa pinta-alaa kääntämällä roottori sivuun vallitsevasta tuulensuunnasta (kuva 6). Roottorin pyörimisnopeus hidastuu, kun tuulesta saatava energia vähenee. Energian tuotto loppuu, kun roottorin pyörimistaso on samansuuntainen tuulen suunnan kanssa. (5, s. 128–133.)



KUVA 6. Roottorin tuottava pinta-ala (5, s. 130)

### 3.1.1 Passiivinen kääntö

Menetelmässä roottorin akselille vaikuttava tuulenpaine on käännön käynnistävä voima. Kun tuulennopeus kasvaa, myös roottorin tuulenpaine kasvaa. Kun tuulenpaine saavuttaa asetetun arvon, lähtee roottori kääntymään pois tuulen suunnasta. (5, s. 130.)

Sivuttain kääntyvässä menetelmässä roottori on sivussa kääntymisakselistaan ja tuulivoimalan peräsin estää roottoria kääntymästä liian aikaisin. Peräsimen nostovoima vapauttaa roottorin kääntymistä estävän mekanismin ja antaa roottorin kääntyä poispäin vallitsevasta tuulesta. Roottorin alkuperäiseen asemaan palauttavana mekanismina voidaan käyttää jousia tai painovoimaa. (5, s. 131.)

Pystysuunnassa kääntyvässä mekanismissa kääntymisakseli on yksikön alareunassa. Roottorin palautumista tuulensuuntaan ohjataan joko jousilla tai vastapainolla. (5, s. 133.)

### **3.1.2 Aktiivinen kääntö**

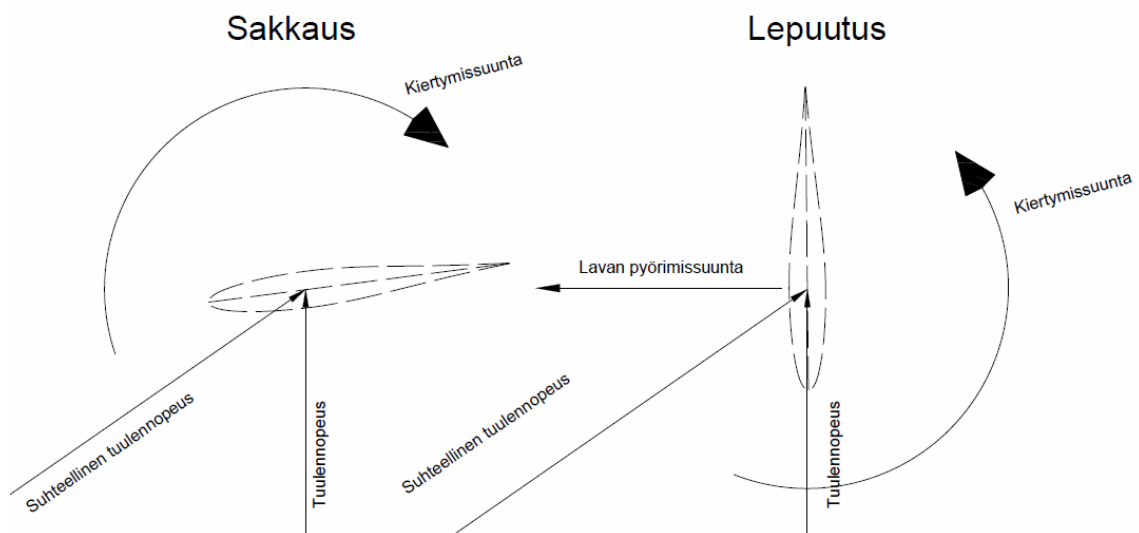
Aktiivisessa käännössä tuulivoimalaa ohjaa tietokone tai logiikkaohjain, joten sähkönsaanti täytyy taata tuulivoimalan sijoituspaikalla. Tuulivoimalan mastoon sijoitetaan anemometri ja tuuliviiri, joista ohjelmaan saadaan mittaustietoa tuulesta. Mitatun tiedon pohjalta tuulivoimalan ohjelma kääntää tarvittaessa roottoria pois tuulensuunnasta. Roottorin kääntämiseen käytetään joko hydraulikka tai sähkömoottoria. Tämä suojausmenetelmä on tilaajalla käytössä. (7.)

### **3.2 Lapakulman muuttaminen**

Tämäkin menetelmä voidaan toteuttaa mekaanisella tai sähköisellä ohjauksella. Lavan kohtauskulman muuttamiseen on ollut vuosien saatossa markkinoilla useita eri konstruktioita. Menetelmän etuna voidaan pitää roottorin kääntämiseen verrattuna parempaa tuottoa alueen ylärajalla sekä nopeaa reagointia tuulennopeuden muutoksiin. Haittoina on pidetty rakenteen monimutkaistumisen tuomaa rikkoutumisherkkyttä ja huoltokohteiden lisääntymistä. Teollisen luokan tuulivoimaloissa on kaikissa lapakulman säätömahdollisuus jo myös sen vuoksi, että saadaan paras mahdollinen tuotto kaikissa tuuliolosuhteissa. (5, s. 135.)

Roottorin ylinopeustilanteiden estämiseksi voidaan lapakulmaa säätää kahdella eri tavalla, joko kääntämällä lavan jänneviiva tuulensuuntaiseksi eli lepuuttaa roottori tai kasvattaa lavan kohtauskulmaa sakkaukseen asti. Sakkaukseen lapaa tarvitsee kääntää vain muutamia asteita, mutta lepuuttamiseen lapaa täytyy kääntää useita asteita (kuva 7). (6, s.68-69.)



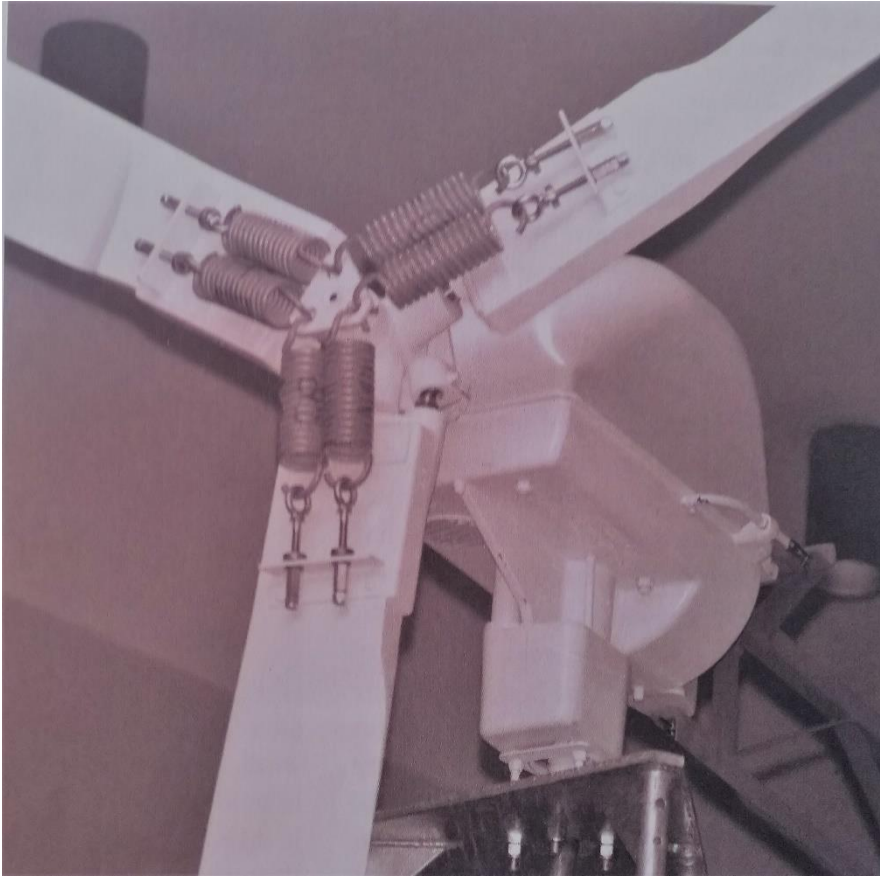


KUVA 7. Lapakulman säätö (6, s. 69)

Aktiivisessa säädössä roottorin navassa on sähkö- tai hydraulimoottorit, jotka muuttavat logiikkaohjaimen käskyjen mukaan lapojen kohtauskulmaa. Ohjaus vaatii sähkönsaannin varmistusta tuulivoimalan sijoituspaikalle eikä monimutkaisuutensa vuoksi ole yleinen pientuulivoimaloissa. (6, s. 68)

Passiivisen säädössä käytetään keskipakosäädintä mekaanisesti kytkettynä lapoihin. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös lavan omaa massaa (kuva 8). Kummasakin menetelmässä palauttavana voimana käytetään jousia. (5, s. 137.)

Yksi lapojen massaa hyödyntävä mekanismi on Jacobs Wind Electric Companyn markkinoille tuoma mekanismi (kuva 8). Jacobsin innovaatio oli kytkeä lavat yhteen kiinnityskappaleella, jolloin kaikilla lavoilla on sama kohtauskulma. Näin toteutettuna roottori ei ole aerodynaamisesti epätasapainossa. Jacobsin mekanismeissa keskeisvoima vetää lapoja pois päin roottorin keskipisteestä, lavat pääsevät liukumaan lapa-akselia pitkin. Lavat vetävät kiinnityskappaletta roottorin akselin suunnassa ja kaikki lavat kääntyvät yhtä aikaa. Kiertymisen mahdollistamiseksi lavat on kiinnitetty pallonivelellä roottorin napaan. (5, s. 137.)



*KUVA 8. Jacobsin roottori (4, s. 136)*

### **3.3 Aerodynaaminen jarru**

Jarruvarjoilla ja kärkijarruilla lisätään lavan vastusvoimaa, ja näin pyörintänopeus hidastuu. Kärkijarrut ovat levyt lapojen kärjissä, jotka aktivoituivat keskeisvoiman vaikutuksesta kun lähestytään ylinopeutta. Kärkijarrut ovat tehokas tapa hidastaa roottoria, mutta ne eivät vaikuta lavan aerodynamiikkaa mitenkään. Kärkijarrut ovat yksinkertaisia ja halpoja mekanismeja, mutta äänekkäitä ja heikentävät tuottoa lavan kärjessä missä roottorin toiminta on tehokkainta. (5, s. 142–143.) Jarruvarjot toimivat samanlailla kuin kärkijarrut mutta levyjen sijaan lavan kärjissä aukeaa jarruvarjot. (5, s. 141.)

Aerodynaamisiin jarruihin luetaan myös ilmajarrut, laipat ja kärjen lapakulman muuttaminen. Näillä menetelmillä pyritään irrottamaan ilmanvirtaus osasta lappaa ja lisäämään roottorin vastusta. Siksi nostovoiman ja vastuksen suhde kas-

vaa ja pyörintänopeus pysyy vakaana. Näiden mekanismien käynnistäjänä on yleensä roottorin keskeisvoima mutta myös sähköistä ohjausta käytetään. Näistä ilmajarruja ja laippoja pidetään äänekkäinä ja epäluotettavina. Kärjen lapakulman muuttamista käytetään edelleen joissain suurissakin tuotantolaitoksissa. (5, s. 142–143.)

### **3.4 Passiivinen sakkaussäätö**

Tuulivoimalaitoksissa joissa generaattori pystyy pitämään pyörintänopeuden vakiona, voidaan käyttää passiivista sakkaussäätöä. Passiivisessa sakkaussäädössä lapa on kiinteällä lapakulmalla. Tuulennonopeuden kasvaessa pysyy roottorin kierrosnopeus vakiona, jolloin kohtauskulma suurenee. Kohtauskulma kasvaessa roottorin suorituskyky heikkenee, kunnes lapa sakkaa ja leikkaa tuoton minimiin. (5, s. 139.)

Passiivinen sakkaussäätö tarvitsee generaattorin vikaantumisen varalta myös toisen myrskysuojausmenetelmän. Valmistajat ovat käyttäneet varmistuksena mekaanista jarrua tai aerodynaamista jarrua. (5, s. 139–140.)

### **3.5 Mekaaninen jarru**

Mekaaninen jarru asennetaan joko roottorin akselille tai vaihdelaatikon jälkeen generaattorin akselille. Jarrut voivat aktivoitua mekaanisesti, hydraulisesti tai sähköisesti. Mekaanisen jarrun toiminta pitää olla vikaantuessaan turvallista. Siksi jarru aktivoituu sähkökatkoksen tai muun häiriön aikana. Kiinteällä lapakulmalla varustetuissa roottoreissa jarru tulisi asentaa roottorin akselille. Näin vältetään vaihdelaatikon vikaantumisesta johtuvat ongelmat ja saadaan suora ohjaus roottorille. Mekaanisten jarrujen huono puoli on vikaantuminen ja säännölliset huoltotoimenpiteet. Yleensä mekaanisen jarrun kanssa käytetäänkin rinnan jotain muuta suojausmenetelmää. (5, s. 140–141.)

## 4 PASSIIVISEN LAPAKULMANSÄÄDÖN SUUNNITTELU

Suunnittelun lähtökohtana on yksinkertainen järjestelmä, jossa roottorin voimia on helppo hallita sekä järjestelmä joka on toimintavarma ja vaatisi mahdollisimman vähän huoltoa. Mekanismi on pyritty suunnittelemaan siten että lapaa ohjaaviin rakenteisiin ei kohdistuisi taivutusta, jolloin voimat ovat helposti hallittavissa ja mitoitettavissa. Suunnittelussa käytetään teräsrakenteita ja standardiosia. (7.)

### 4.1 Suunniteltavan lapakulmasäädön toimintaperiaate

Työssä suunniteltiin vipumekanismi, jonka käynnistävinä voimina on roottorin lapojen työntövoima sekä keskeisvoima. Keskeisvoiman vaikutus liikkeeseen tulee lapojen asentojen suhteessa pyörimisakseliin. Näitä liikkeitä vastustava voima luodaan roottorin akselilinjassa olevalla polyuretaanipuristusjousella. (7.)

Aloituskokouksessa sovittiin jousen materiaaliksi polyuretaani. Polyuretaani valikoitui materiaaliksi hyvien iskunvaimennus ja kestävyys ominaisuuksien vuoksi. Polyuretaani säilyttää joustavuutensa myös matalassa lämpötilassa, mikä on ehdoton vaatimus Suomen olosuhteissa. Polyuretaanilla on myös mekaanisten ominaisuuksien lisäksi hyvä kemikaalien ja UV-valon kesto, mikä on tärkeää ulko-olosuhteissa. (11.)

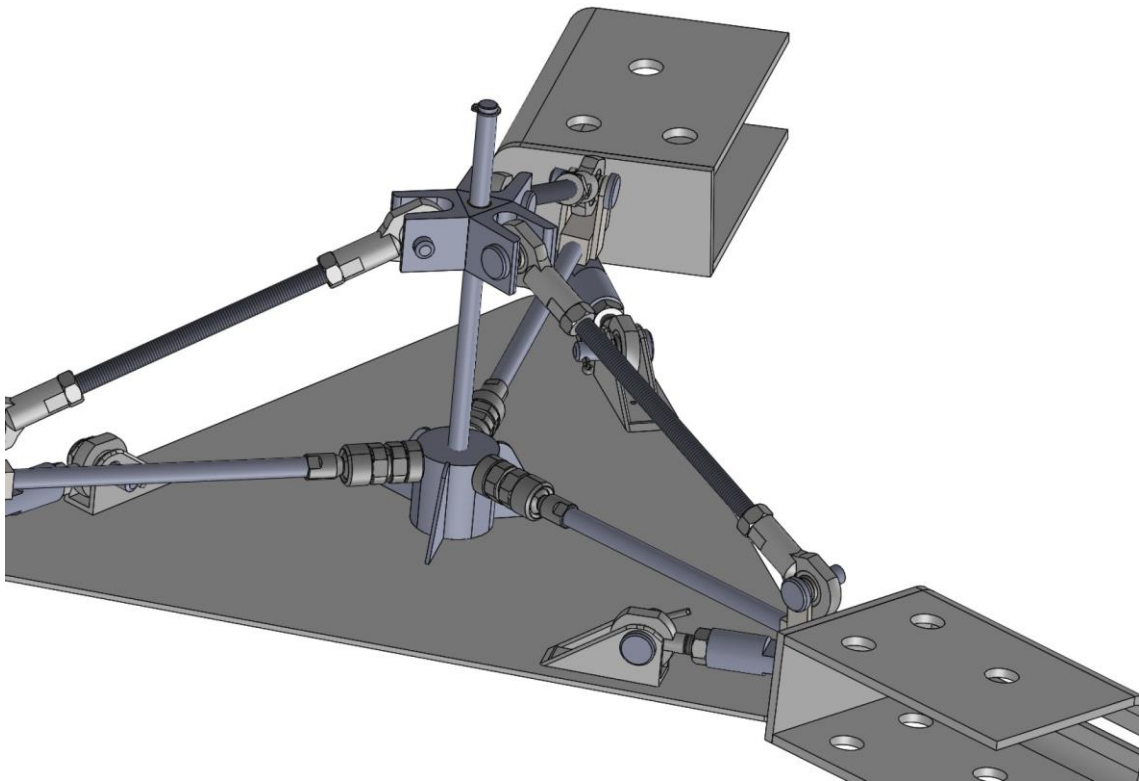
### 4.2 Rakenteen suunnittelu

Suunnittelussa käytettiin Solidworks -3D-CAD-ohjelmistoa. Muita vaihtoehtoja olisi ollut Catia ja Autodesk –inventor. Solidworksin valitsin sen vuoksi että, sitä olen käyttänyt eniten opintojen aikana. Solidworks -simulaatio työkalut mahdollisti myös FEM-analyysin samalla ohjelmistolla.

Työn lähtökohtana oli tehdä prototyypin valmistamisesta mahdollisimman helppoa ja edullista. Lähtökohdaksi valittiin noin 4 metriä halkaisijaltaan oleva 3-lapainen roottori, oletettavaksi maksimi tuotoksi arvioitiin noin 1 kW. Rakenteissa pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon standardikomponentteja ja laskemaan koneistuksien osuudet mahdollisimman pieniksi.

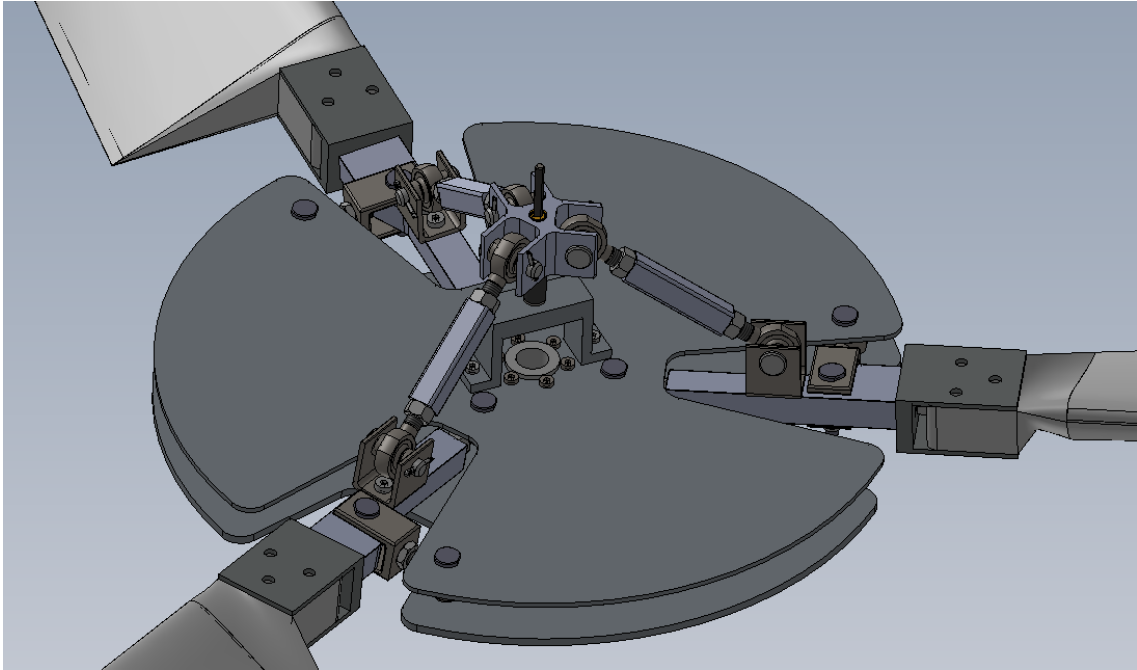
Rakenteeseen sopivat lavat löytyvät Qingdao greef new energy equipment LTD:n mallistosta (12). HB-1.9 lapa käy tämän tyyppiseen tuulivoimalaitokseen. Lavan pituus on 1900 mm:ä, jolloin roottorin navan kanssa päästään 4,6 m halkaisijaltaan olevaan roottoriin. (Liite 2.)

Aluksi suunnittelin rakenteen toteutettavaksi kierretangoilla, jotka olivat laakeroitu levyllä oleviin korvakkeisiin nivelpäillä. Tästä rakenteesta luovuttiin, koska kierretangot tuntuivat heikolta sekä korvakkeiden korvaaminen kahdella runkolevyllä vähensi koneistuksen tarvetta. Rakenteesta poistui myös korvakkeet, jotka todettiin epävarmoiksi ja hankaliksi valmistaa. (Kuva 9.)



*KUVA 9. Säätolaitteen ensimmäinen malli*

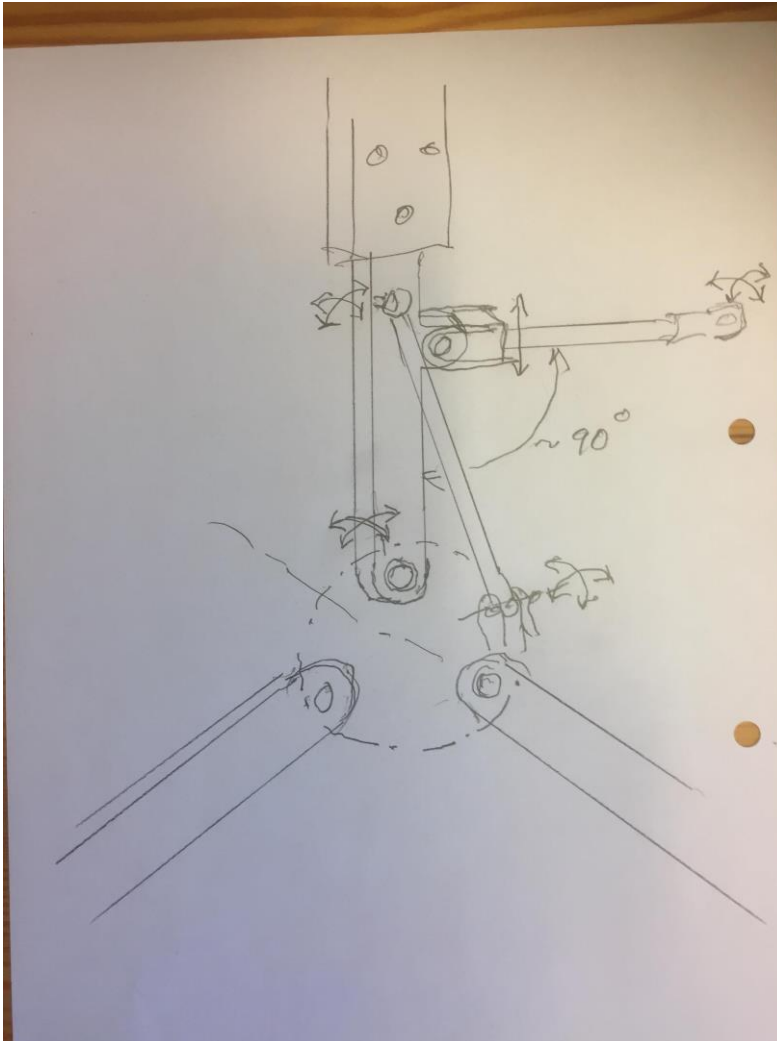
Seuraavasta mallista tehtiin jo prototyypin mittapiirustukset. Kierretangot korvattiin koneistettavilla osilla ja korvakkeiden sijasta käytetään kahta runkolevyä joiden väliin nivelpäät ovat kiinnitetty. Näin saatiin rakenteesta kestävämpi, osien määrää vähennettyä sekä prototyyppiä lähemmäksi mahdollista lopullista tuotetta. (Kuva 10.)



*KUVA 10. Työssä tehty malli*

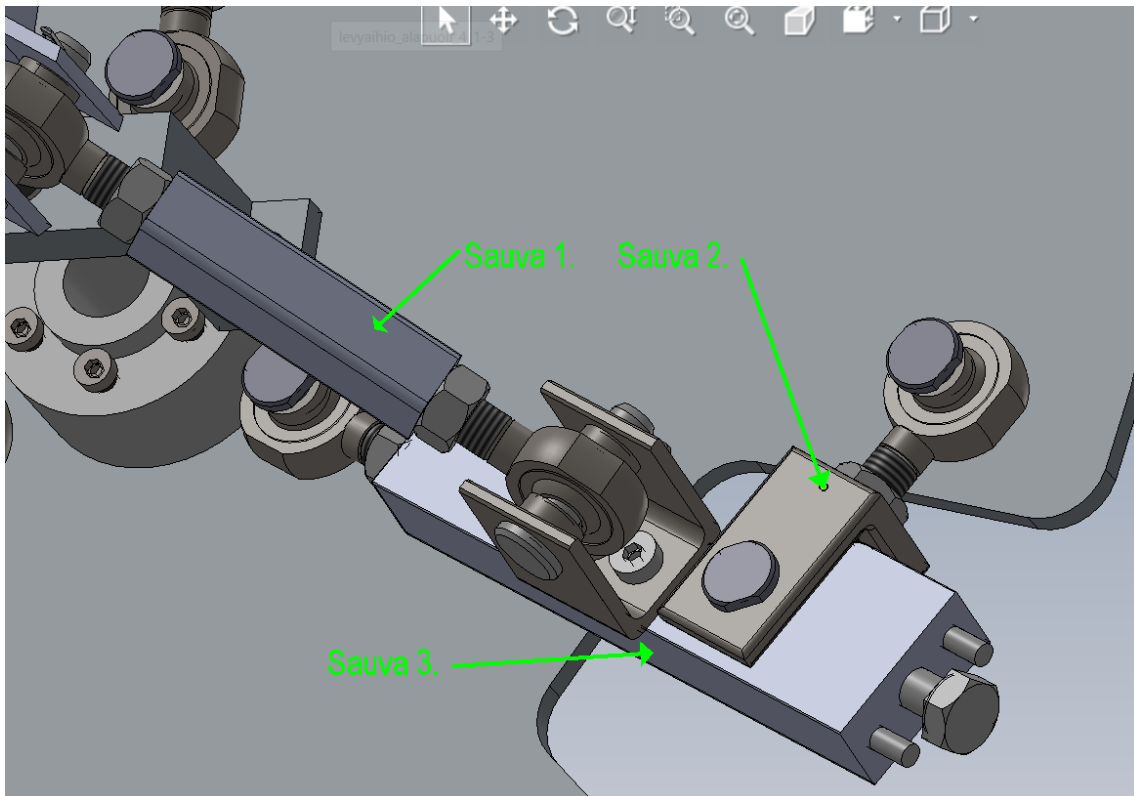
### 4.3 Sauvakoneiston suunnittelu

Toimivan sauvakoneiston suunnittelu osoittautui haastavaksi operaatioksi. Tilaaja piirsi ideastaan mallin paperille, josta mitoitettiin toimiva sauvakoneisto. Suunnittelussa toivottiin, ettei sauvoihin tulisi kuin veto- tai puristusjäännitystä, jolloin voimat on helppo hallita ja taivutusmomentteja tulisi mahdollisimman vähän. (Kuva 11.)



*KUVA 11. Tilaajan hahmotelma*

Hahmotelmien pohjalta aloin rautalankamalleilla suunnittelemaan koneiston liikeratoja Solidworksissa. Kun liikeradat toimivat, tehtiin teräsrakenne rautalankamallin päälle. (Kuva 12.)



*KUVA 12. Sauvakoneisto yläasennossa*

Sauvan 2 pituus määrittää kulman muuttumisnopeuden, sauvalla 3 siivet kiinnitetään levyihin ja sauvalla 1 ohjataan voima jouselle. Sauvan 2 pituudella säädetään kulman muutosnopeus. Lyhyemmällä sauvalla saadaan kulmamuu-  
 toksen aikaiseksi pienemmällä lavan liikkeellä. Sauvasta 2 tuli lyhyt koska halusin että roottorin tuottava pinta-ala olisi mahdollisimman suuri myös pienillä pyörimisnopeuksilla. (Kuva 12.)

Sauvan 3 päähän tulee lavan kiinnitys, lavankiinnityskappale tulee 3° kulmassa sauvaan 3 nähden. Tällä asetuskulman muutoksella varmistetaan että lapa sakkaa ala-asennossa. Sauvakoneiston ollessa ylimmässä asennossa on lapakulma positiivinen suhteessa lapojen valmistajan asetuskulmaan tällä pitäisi saada paremmin nostetta pienemmillä tuulenopeuksilla, jolloin tuulivoimalan tuoton pitäisi parantua. (Kuva 12.)

#### **4.4 Polyuretaanijousen valinta**

Työssä piti laskea mekanismiin sopiva polyuretaanipuristusjousi sekä tehdä rakenteesta turvallinen kaikissa tuuliolosuhteissa. Polyuretaanipuristusjousen



valintaan vaikeutti aerodynaamisten laskujen monimutkaisuus ja työhön käytetty aika rajasi laskut vain suuntaa-antaviksi. Polyuretaanikappaleen kiinnitys on suunniteltu siten että prototyyppin kokeiden avulla jousityyppiä voidaan helposti muuttaa tarvittaessa. Polyuretaanipuristusjousen mitoitukseen käytettiin SFS-EN 6100-2:en Windturbines – part 2: small windturbines standardissa esitettyä yksinkertaistettua kuormitusmenetelmää (8, s. 40–47). Työssä tarkastelin vain kriittiseksi katsomani kohteet, joiden pohjalta voidaan todeta että rakenne kestää käyttöolosuhteet.

Polyuretaanijousen valintaan käytettyjen voimien laskemiseen käytetään standardin SFS-EN 6100-2 Kuormitustapaus A: Normaali toiminta Akselin kuormitus (kaava 4). (8, s. 41–43.)

$$F_{x-akseli} = \frac{3}{2} * \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{R} \quad \text{KAAVA 4}$$

R = roottorin säde (m)

$\lambda_{design}$  arvona käytetään kärjen nopeussuhde mitoitukseen käytettävässä tuulennopeudessa. (kaava 5.)

$$\lambda_{design} = \frac{R}{V_{design}} \frac{\pi n_{design}}{30} \quad \text{KAAVA 5}$$

$V_{design}$  = mitoituksessa käytetty tuulennopeus. (m/s)

$n_{design}$  = roottorin pyörimisnopeus. (r/min)

$Q_{design}$  = roottorin vääntömomentti. (Kaava 6.) (Nm)

$$Q_{design} = \frac{P_r}{\omega_n} \quad \text{KAAVA 6}$$

$P_r$  = roottorin työ (W)

$\omega_n$  = roottorin kulmanopeus (rad/s). (Kaava 7.)

$$\omega_n = \frac{\pi n}{30} \quad \text{KAAVA 7}$$

n = kierrosnopeus (r/min)

Mekanismi on täysin toiminnassa tuulennopeudella 11 m/s, jolloin polyuretaanijousen mitoitukseen käytettävä voima saadaan sijoittamalla HB 1.9 datalehden (liite 2) arvot kaavaan 5. Laskin myös roottorin aksiaalivoiman tuulennopeudel-

le 7 m/s jolloin pystyin ennustamaan uretaanijousen käyttäytymistä ja valitsemaan sopivat kulmat rakenteelle. Laskut ovat liitteessä 5.

$$F_{x\text{-akseli } 11\text{m/s}} = 340,5 \text{ N (liite 5)}$$

$$F_{x\text{-akseli } 7\text{m/s}} = 150,6 \text{ N (liite 5)}$$

Polyuretaanijousena on Fibro GmbH Fibroelast<sup>®</sup> polyuretaaniputki. Putken mitana ulkohalkaisija 20 mm, sisähalkaisija 8,5 mm ja pituus 60 mm. Datalehden mukaan putken kimmokerroin on 3 N/mm<sup>2</sup>. Kun nämä sijoitetaan suhteellisen venymän kaavaan puristuksessa (kaava 8) (9, s. 270), saadaan laskettua polyuretaanijousen puristuma.

$$\Delta l = \frac{F l_0}{A_0 E}$$

KAAVA 8

$$F = F_{x\text{-akseli}} \text{ (N)}$$

$$l_0 = \text{kappaleen kokonaispituus (mm)}$$

$$A_0 = \text{kappaleen poikkileikkauksen pinta-ala (mm}^2\text{)}$$

$$E = \text{kimmokerroin (N/mm}^2\text{)}$$

Sijoitetaan kaavaan.

$$\frac{340,5 \text{ N} \cdot 45 \text{ mm}}{\pi \cdot [(20 \text{ mm})^2 - (8,5 \text{ mm})^2] \cdot 3 \text{ N/mm}^2} = 20 \text{ mm}$$

Valmistajan datalehden mukaan jousen muodonmuutos saa olla maksimissaan 40 %:a eli 45 mm pituisella jousella 18 mm. 20 mm on 44 %:a jousen kokonaispituudesta, rakenteessa estetään mekaanisella vastakappaleella jousen muodonmuutos yli 40 %:a. Tällä tavoin rakenne saavuttaa maksimijarrituksen laskennallisesti hieman ennen tavoiteltua 11 m/s.

## 5 SÄÄTÖLAITTEEN LUJUUSTARKASTELU

Lujuustarkastelua varten arvioitiin, mitkä ovat kriittiset ja lujuuslaskemista vaativat osat. Tarkasteluun otettiin lapakiinnikekokoonpano, polyuretaanijousen kiinnitysosa ja kulmasauvan korvake. Lujuustarkastelua varten voimat laskettiin käyttäen standardin SFS-EN 6100-2:en Windturbines – part 2: small windturbines standardissa esitettyä yksinkertaistettua kuormitusmenetelmää (8, s. 40–47). Lujuustarkastelu toteutettiin käyttämällä Solidworksin FEM-analyysi työkalua.

### 5.1 Lapakiinnike

Lapakiinnikkeen suunnittelin HB-1.9 datalehdessä esitetyn kiinnityskaavion mukaan (liite 2). Lavan kiinnitys tehdään ruuveilla ja itselukittuvilla muttereilla hitsattuun teräsrakenteeseen. Lapojen rakenne on suunniteltu kestämään 40 m/s:ssa tuulennopeuksia, joten lapojen kiinnitystä ei tarvitse laskea, koska Pohjois-Pohjanmaan olosuhteissa maksimituuli  $V_{50}$  10 m korkeudella on 20 – 25 m/s:ssa. (10.)

#### 5.1.1 Lapakiinnikkeen voimat

Lapakiinnikkeen mitoituksessa käytetään standardin SFS-EN 6100-2 Kuormitustapaus E: Maksimi pyörimisnopeus (7, s. 97). Lavan ja lavan osien mitoitukseseen standardin mukaan keskeisvoima on mitoittava tekijä. Keskeisvoima lasketaan kaavalla 9.

$$F_{z-lapa} = m_B \omega_{n,max}^2 R_{cog}$$

KAAVA 9

$m_b$  = lavan massa (kg).

$\omega_{n,max}$  = roottorin maksimi kulmanopeus ( 1/s).

$R_{cog}$  = lavan painopisteen etäisyys roottorin navasta (m).

Turvamekanismien toimiessa roottorin kierrosnopeus rajoittuu 220 r/min:ssa, voidaan käyttää laskennassa kaavasta 7 saatua kulmanopeutta 11 m/s:ssa tuulennopeudelle.

$$6,5 \text{ kg} * 23 \text{ 1/s} * 0,72 \text{ m} = 107,5 \text{ N}$$

Lapakiinnikkeiden mitoituksessa täytyy myös huomioida pysäytettyyn roottoriin kohdistuvat voimat maksimituulella  $V_{50}$ . Mitoituksessa käytetään standardin SFS-EN 6100-2 Kuormitustapaus I: Maksimi altistuminen ohjetta. Maksimituulen voima  $F$  saadaan laskettua kaavalla 10. (8, s. 100).

$$F = C_f * 1/2 * \rho * V_{50}^2 * A_{proj} \quad \text{KAAVA 10}$$

$C_f$  = kappaleen muodon voimakertoimen saadaan taulukosta. (kuva 8.)

$\rho$  = ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ) oletetaan  $1,225 \text{ kg/m}^3$







$V_{50}$  = maksimituuli, tuulennopeus joka saavutetaan kerran 50 vuodessa.

$A_{proj}$  = lavan pinta-ala joka on kohtisuorassa tuuleen suuntaan nähden. Tässä tapauksessa saadaan lavan Solidworks -3D-mallista =  $0,314 \text{ m}^2$ .

61400-2 © IEC:2013

- 47 -

**Table 3 – Force coefficients ( $C_f$ )**

| For all cross sections<br>wind direction is<br>from left to right |  |  |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|--|--|
| Characteristic length <sup>a</sup> < 0,1 m                        | 1,3  | 1,3  | 1,5  | 1,5  | 1,5  | 2,0  |
| Characteristic length <sup>a</sup> > 0,1 m                        | 0,7  | 1,2  | 1,5  | 1,5  | 1,5  | 2,0  |

<sup>a</sup> Characteristic length is the top to bottom dimension (perpendicular to the flow) as illustrated here except in the case of the oblique aerofoil for which an aerofoil data book should be consulted.

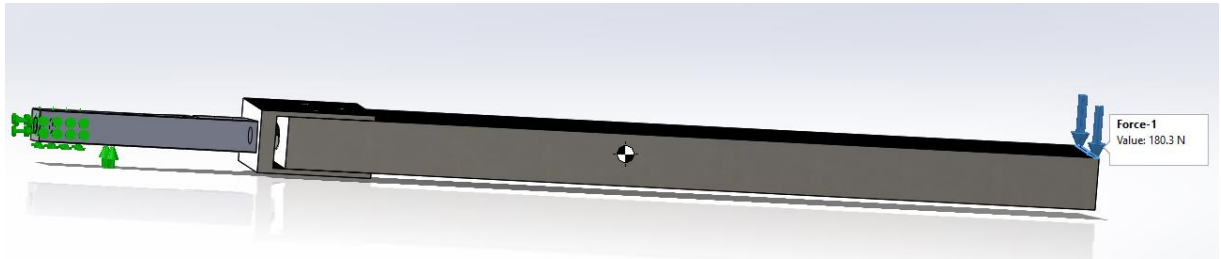
*KUVA 13. voimakertoimet erimuotoisille kappaleille (7, s. 47)*

Sijoitetaan arvot kaavaan.

$$1,5 * 1/2 * 1,225 \text{ kg/m}^3 * (25 \text{ m/s})^2 * 0,314 \text{ m}^2 = 180,3 \text{ N}$$

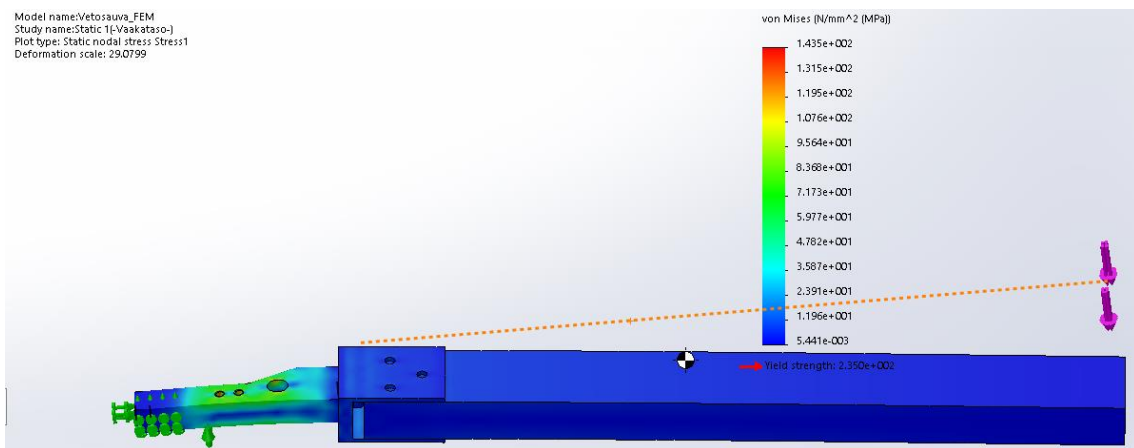
### 5.1.2 Lapakiinnikkeen FEM-analyysi

FEM-analyysia varten rakenne yksinkertaistettiin, työn helpottamiseksi. Tukipisteinä on kohta missä lapakiinnike tukeutuu alalevyyn, kun mekanismi on ääri-asennossa sekä nivelpään sisäkierteen. FEM-analyysissä lapa korvattiin 792 mm pitkällä teräspalkilla jolloin voiman vaikutuspiste saatiin lavan keskipisteseen. Lapakiinnikkeeseen vaikuttava voima saadaan kaavasta 10.



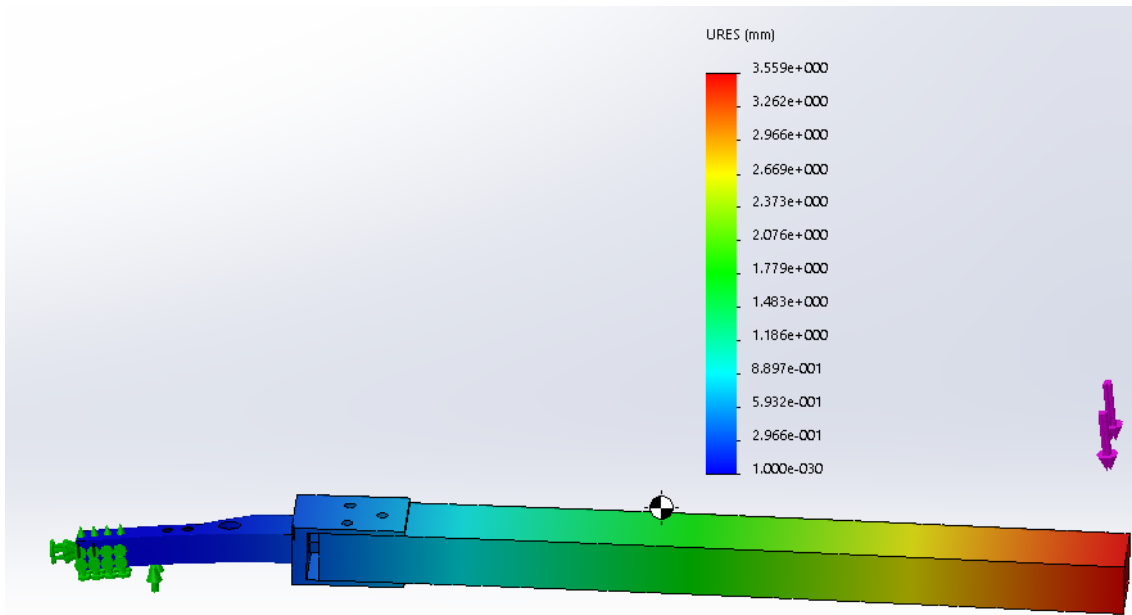
KUVA 14. Tukipisteet ja voima

Rakenteen materiaaliksi valikoitui rakenneteräs S235, jonka myötölujuus on 235 N/mm<sup>2</sup>. Solidworks FEM von Mises jännityksen kuvaajasta (kuva 10.) nähdään että jännitys on maksimissaan 143,5 N/mm, varmuuskertoimeksi tulee 1,6 mikä on hyväksyttävissä. Materiaaliksi voidaan myös vaihtaa S355, varmuuskertoimeksi saataisiin 2.47.



KUVA 15. von Mises tarkastelu

FEM analyysissä tarkasteltiin myös siirtymää (kuva 11), kuvasta huomataan että siirtymä itse kiinnikkeen alueella on varsin pieni noin 0-0,3 mm.



KUVA 16. Siirtymä kuvaaja

Rakenteen mitoituksessa onnistuttiin tässä tapauksessa, valitsemalla materiaaliksi S355 saadaan varmuuskerrointa nostettua. Mikä olisikin suositeltavaa jolloin myös Suomen vaihtelevat sääolosuhteet ja huono huolettavuus otettaisiin huomioon.

Standardin SFS-EN 6100-2 Kuormitustapaus E: Maksimi pyörimisnopeus (8, s. 97) tapauksessa jännitykset ovat vetoa ja voidaan ilman tarkempaa tarkastelua todeta rakenne riittävän lujaksi. Lapakiinnikkeen nivelpäät ovat SKF:n mallistosta SAKB 16 F (liite 4) Tämä nivelpää on reilusti mitoitettu sovellukseen, staattiselle kuormalle varmuuskertoimeksi tulee 200.

## 5.2 Polyuretaanijousen kiinnityskappaleen voimat ja FEM-analyysi

Kiinnityskappaleen mitoitukseen käytetään standardin SFS-EN 6100-2 Kuormitustapaus D: maksimi työntövoima (kaava 11) (8, s. 96). Tällä kaavalla voimat tulevat ylimitoitetuiksi koska maksimi työntövoiman tapauksessa alalevyn rakenteen tulisi ottaa vastaan voimat, mutta tällä tavalla voimme varmistaa kappaleen kestävyden.

$$F_{x\text{-akseli}} = C_t \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot (2,5 \cdot V_{\text{ave}})^2 \cdot \pi \cdot R^2$$

KAAVA 11

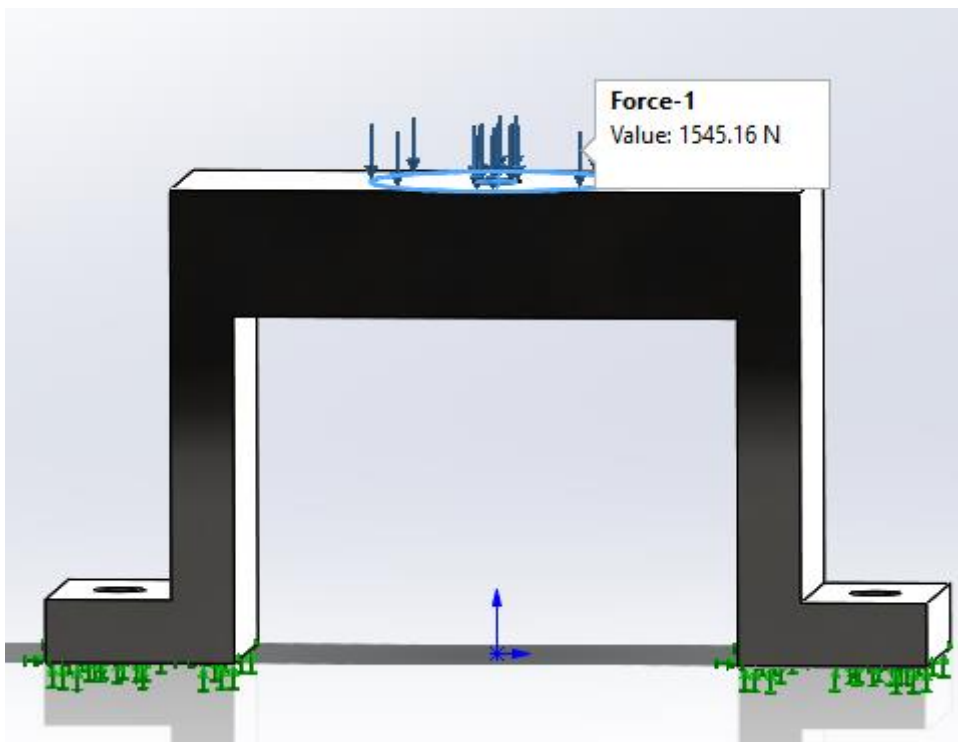
$C_t$  = työntövoimakerroin laskennassa oletetaan 0,5.

$\rho$  = ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ) oletetaan  $1,225 \text{ kg/m}^3$ .

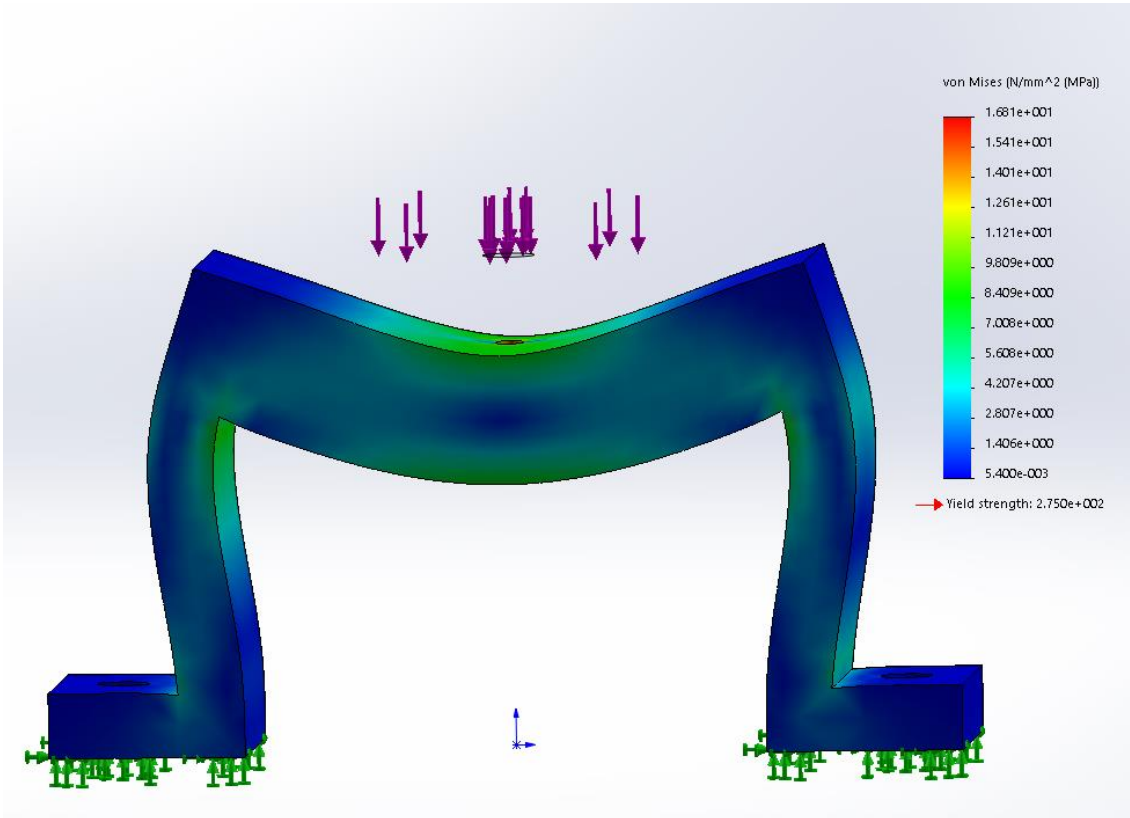
$V_{\text{ave}}$  = Tuulen keskinopeus vuodelle (m/s) on 7 m/s 50m korkeudella Pohjois-Pohjanmaan rannikolla (10.).

$$0,5 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (2,5 \cdot 7 \text{ m/s})^2 \cdot \pi \cdot 2,29^2 = 1545,158 \text{ N}$$

Materiaalina on S235 teräs, analyysin von Mises vertailujännitys on maksimissaan  $16,8 \text{ N/mm}^2$ . Rakenteen varmuuskertoimeksi tulee 14, voidaan todeta sovellukseen sopivaksi. (Kuva 13.)



KUVA 17. Kiinnityskappaleen voima ja tukipisteet analyysissä



KUVA 18. Kiinnityskappaleen von Mises jännitys

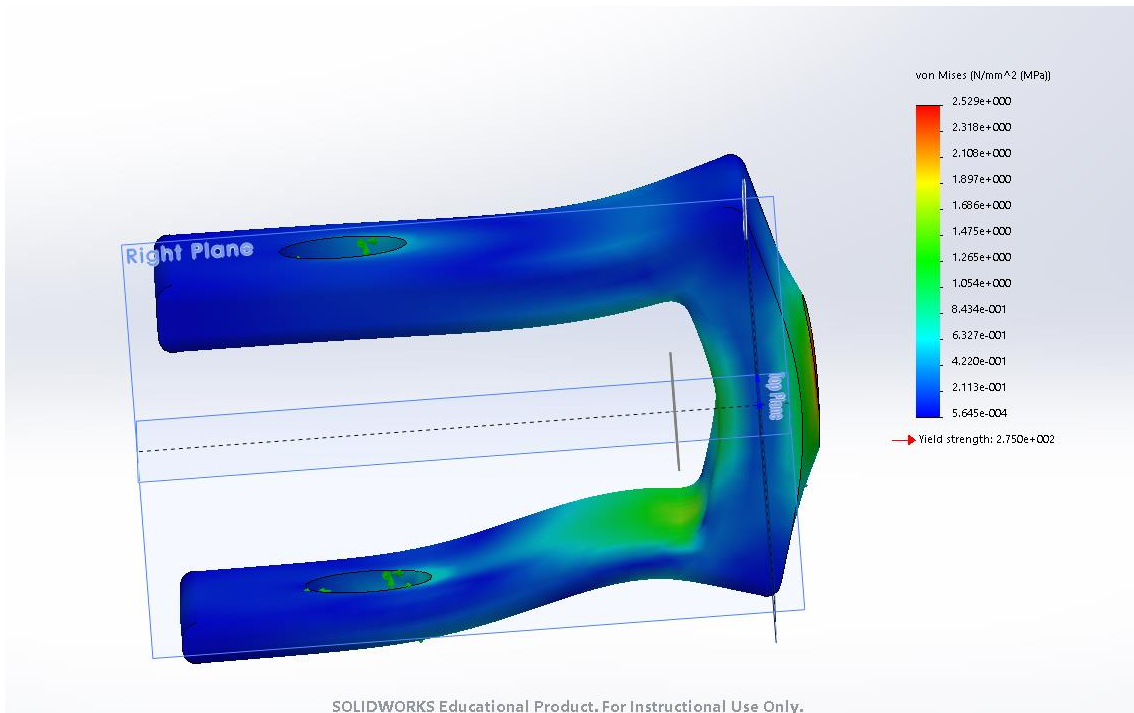
### 5.3 Kulmasauvan korvakkeen voimat ja FEM-analyysi.

Kulmasauvat välittävät rakenteessa momentin ensin kiinnityslevyihin ja sitä kautta akselille. Laskentaa varten sain momentin kaavasta 6, momentti on laskettu roottorin akselille. Jakamalla tämän momentin kolmella ja jakamalla korvakkeen etäisyydellä akselin keskipisteestä sain yhteen korvakkeeseen vaikuttavan voiman.

$$\frac{108,5147339 \text{ Nm}}{0,2635 \text{ m} \cdot 3} = 137,3 \text{ N}$$

von Mises jännityksen maksimi on  $2,5 \text{ N/mm}^2$  voidaan todeta että korvake kestää suunnitellussa ympäristössä. Varmuuskertoimeksi tulee 142, joten kestää varmasti kaikissa olosuhteissa. (kuva 14.)





*KUVA 19. Korvakkeen von Mises jännitys*

## 6 LOPPUSANAT

Työssä tutkittiin mahdollisuutta tehdä passiivinen lapakulmien säätö pientuuli-voimalaitoksessa käyttäen tuulenpainetta ja keskeisvoimaa käynnistävänä tekijänä. Työn tuloksena syntyneestä mallista saadaan tehtyä tarvittavat dokumentit prototyypin valmistamiseen. Mallia täytyisi vielä saada kevennettyä, koska nykyinen paino siipineen on 71 kg. Aloituspalaverissa päätettiin, ettei massa ei ole kriittinen. En keventänyt rakennetta tässä työssä.

Säänkestävyyden kannalta laitteisto pitää maalata kauttaaltaan säänkestävällä maalilla sekä suunnitella nokkakartio, jolla saadaan tuulenpainetta pienennettyä ja suojaa säältä. Sauvakoneisto ja polyuretaanijousi voidaan prototyyppi testien jälkeen hienosäätää. Tätä varten rakenne on tehty helposti säädettäväksi.

Työ oli mielenkiintoinen ja todella haastava aerodynamiikan monimutkaisuuden vuoksi. Myös pääsääntöisesti englanninkielisen lähdeaineiston sanasto antoi oman haasteensa. Seuraava vaihe olisikin tehdä koneistuspiirustukset mallista ja osaluettelot. Tämän jälkeen prototyypin voisi valmistaa ja lopulliset mitoitukset tehdä koeajojen jälkeen.

## LÄHTEET

1. Isosaari, Kyösti 2012. Mistä energiaa taloon? Omakotiasujan energia- ja ympäristöopas. Helsinki: Otavamedia Oy.
2. Manwell, J.F – McGowan, J.G – Rogers A.L 2002. Wind energy explained: Theory, design and application. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
3. Ahola, Ville 2012. Tuuligeneraattorimastojen käynnön ohjaus. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa: [http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/40531/Ahola\\_Ville.pdf](http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/40531/Ahola_Ville.pdf). Hakupäivä 11.2.2015.
4. Finnilä, Jarkko 2013. Pientuulivoimalaitoksen maston suunnittelu, lujustekninen tarkastelu ja kustannusten optimointi. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa: [http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/57872/Finnila\\_Jarkko.pdf](http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/57872/Finnila_Jarkko.pdf). Hakupäivä 11.2.2015
5. Gipe, Paul 2004. Wind power. Renewable energy for home, farm and business. Completely revised and expanded edition. White river junction, Vermont: Chelsea green publishing company.
6. Korpela, Aki 2016. Tuulivoiman perusteet. Vantaa: Hansaprint Oy
7. Työntilaaaja 2014. Aloituskokous. 18.11.2014.
8. SFS-EN 61400-2:en. 2014. Wind turbines – part 2: Small wind turbines (IEC 61400-2:2013). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
9. Valtanen, Esko 2016. Tekniikan taulukkokirja Jyväskylä: Genesis\_kirjat Oy
10. Suomen tuuliatlas. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi>. Hakupäivä 7.6.2018.
11. Vink Finland Oy. Saatavissa <http://www.vink.fi>. Hakupäivä 8.6.2018.

12. Tian, Cheryl 2016 HB-1.9 Horizontal Wind Blades -----GREEF NEW ENERGY. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Tommi Rantala. 1.3.2016.
13. Fibro GmbH. Saatavissa: <http://www.fibro.de/en/home.html>. Hakupäivä 8.6.2018.
14. SKF group. Saatavissa: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/plain-bearings/general/male-thread/index.html>. Hakupäivä 20.12.2016.

## **LIITTEET**



Liite 1 Lähtötietomuistio

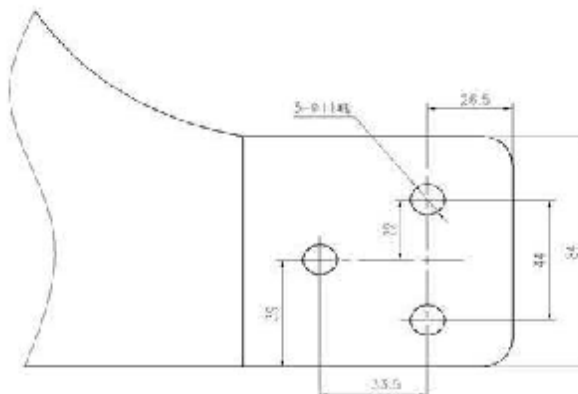
Liite 2 HB - 1.9:n datalehti

Liite 3 Fibroelast®:n datalehti

Liite 4 Safb 16 f:n datalehti

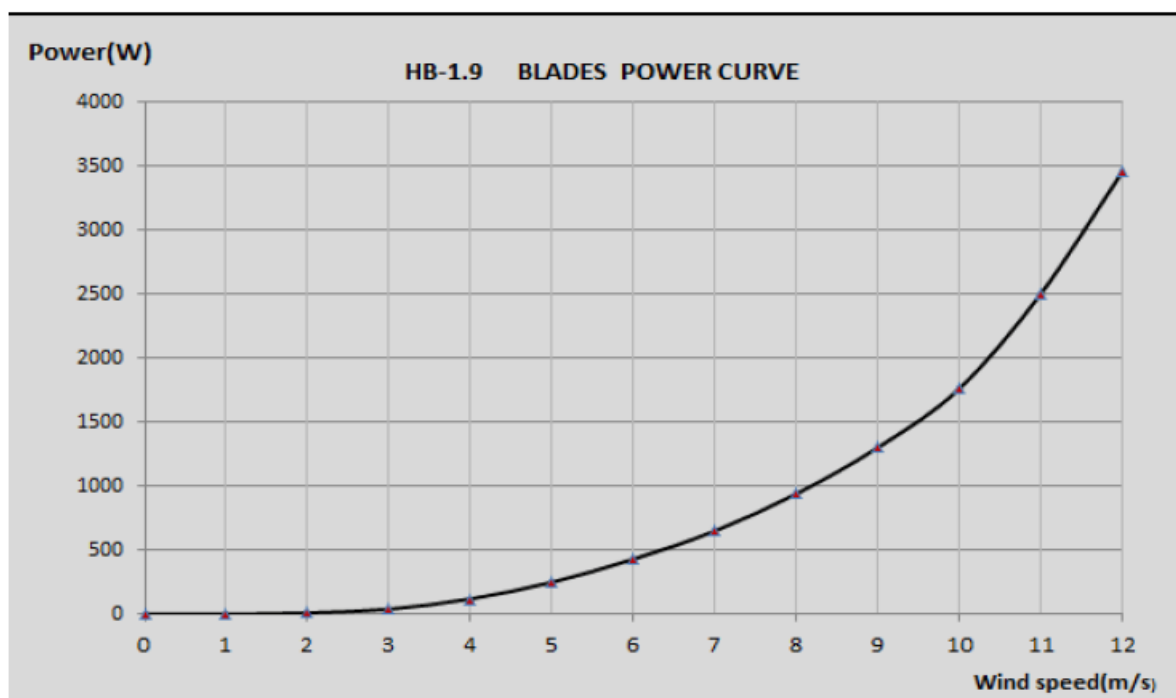
Liite 5 Laskutoimituks

|  <b>WIND TURBINE BLADES QUOTATION SHEET</b> |   |                                    |                  |
|--|---|------------------------------------|------------------|
| Pictures   | Model   | HB-1.9                             | Unit Price /3PCS |
|   | Rated Power   | 3KW                                | <b>\$260</b>     |
|  | Single Blade Length   | 1900mm                             |                  |
|  | Rotor Diameter  | 4000mm                             |                  |
|  | Chord Wide  | 250mm                              |                  |
|  | Chord Thickness   | 50mm                               |                  |
|  | BladeTip Chord Wide   | 80mm                               |                  |
|  | Blade Tip ChordThickness  | 15mm                               |                  |
|  | Single Weight   | 8.1kg                              |                  |
|  | Start Wind Speed  | 3m/s                               |                  |
|  | Rated Wind Speed  | 11m/s                              |                  |
|  | Rated Rotor Speed   | 220rpm                             |                  |
|  | Working Wind Speed  | 3-35m/s                            |                  |
|  | Safety Wind Speed   | 40m/s                              |                  |
|  | Root Type   | Plate                              |                  |
| Bolts Quantity   | 3   |                                    |                  |
| Material   | FRP   |                                    |                  |
| <b>Total Price</b>   |   | <b>EXW</b>                         | <b>\$260</b>     |
| <b>Advantage :</b>   | 1.High Cp (Coefficient power) $\geq 35\%$<br>2.Low start wind speed<br>3.Good performance in endurance resistance<br>4.Strength enough can meet the request of out of control running<br>5.No noise Below 65 dB<br>6.Special edge protection technology ,Avoid Wind ,sand, snow, Salt fog erosion protection<br>7.Low wind resistance (Surface rude treatment & with special protection coat)<br>8.Easy balance,running stable. |                                    |                  |
|  | <b>Remark:</b>  |                                    |                  |
|  | 1.MOQ: 1 Unit /3pcs sample order is available   | 4.Packing Info:Plywooden Case      |                  |
|  | 2.Payment:T/T 100% In advance   | 5.Quotation Vally date: 2016-03-30 |                  |
|  | 3.Delivery date : 8 working days upon deposit arriving  | 6.Guarantee: 3 years for free      |                  |



**QINGDAO GREEF NEW ENERGY EQUIPMENT CO.,LTD**

Contact:Ms Cheryl Tian | Mob:+86-18563988505| E-mail:Inter@greefenergy.com | Skype :greefenergy\_sales | www.greefenergy.com



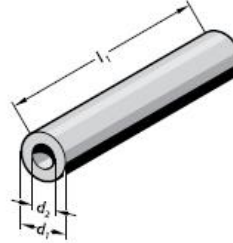
(12.)



FIBROELAST®-Hollow round rod



2541.4.



**Material:**

Polyester-based polyurethane  
Hardness 70 Shore A

**Colour:**

white

**Note:**

FIBROELAST®-Hollow round rods can also be used as springs.

**Physical properties:**

Shore hardness A: 70  
100% modulus of elasticity: 3,0 [N/mm<sup>2</sup>]  
300% modulus of elasticity: 6,0 [N/mm<sup>2</sup>]  
Tensile strength: 28 [N/mm<sup>2</sup>]  
Elongation: 500 [%]  
Tear resistance: 58 [kN/m]  
Permanent set (70°C): 45 [%]  
Rebound elasticity: 55 [%]  
Maximum deformation: 40 [%]

2541.4. FIBROELAST®-Hollow round rod

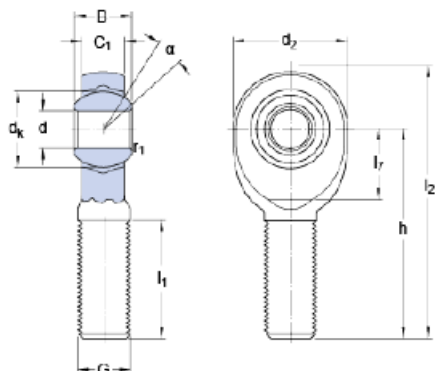
| Order No   | d <sub>1</sub> | d <sub>2</sub> | l <sub>1</sub> |
|------------|----------------|----------------|----------------|
| 2541.4.016 | 16             | 6,5            | 330            |
| 2541.4.020 | 20             | 8,5            | 500            |
| 2541.4.025 | 25             | 10,5           | 500            |
| 2541.4.032 | 32             | 13,5           | 500            |
| 2541.4.040 | 40             | 13,5           | 500            |
| 2541.4.050 | 50             | 17             | 500            |
| 2541.4.063 | 63             | 17             | 500            |
| 2541.4.080 | 80             | 21             | 500            |
| 2541.4.100 | 100            | 21             | 500            |
| 2541.4.125 | 125            | 27             | 500            |





## SAKB 16 F

### Dimensions



|                |           |    |
|----------------|-----------|----|
| d              | 16        | mm |
| d <sub>2</sub> | max. 43   | mm |
| B              | 21        | mm |
| G              | M 16      |    |
| C <sub>1</sub> | max. 15.5 | mm |
| h              | 66        | mm |
| α              | 16        | °  |
| d <sub>k</sub> | 28.5      | mm |
| l <sub>1</sub> | min. 37   | mm |
| l <sub>2</sub> | max. 89   | mm |
| l <sub>7</sub> | min. 21   | mm |
| r <sub>1</sub> | min. 0.3  | mm |

### Calculation data

|                              |                |      |                   |
|------------------------------|----------------|------|-------------------|
| Basic dynamic load rating    | C              | 21.4 | kN                |
| Basic static load rating     | C <sub>0</sub> | 34.5 | kN                |
| Specific dynamic load factor | K              | 50   | N/mm <sup>2</sup> |
| Material constant            | K <sub>M</sub> | 530  |                   |

### Mass

|              |     |    |
|--------------|-----|----|
| Mass rod end | 0.2 | kg |
|--------------|-----|----|

(14.)

Kulmanopeus tuulennopeudella 11 m/s  $\omega_{11 \text{ m/s}}$

$$\frac{\pi * 220 \text{ 1/min (liite 2)}}{30} = 23,03834613 \text{ 1/s}$$

Roottorin vääntömomentti tuulennopeudella 11 m/s  $Q_{11 \text{ m/s}}$

$$\frac{2500 \text{ w (liite 2)}}{23,03834613 \text{ 1/s}} = 108,5147339 \text{ Nm}$$

Kärjen nopeussuhde tuulennopeudella 11 m/s  $\lambda_{11 \text{ m/s}}$

$$\frac{2,29 \text{ m}}{11 \frac{\text{m}}{\text{s}}} * \frac{\pi * 220 \text{ 1/min}}{30} = 4,79$$

Roottorin aksiaalikuorma tuulennopeudella 11 m/s  $F_{x\text{-akseli } 11 \text{ m/s}}$

$$\frac{3}{2} * \frac{4,79 * 108,5147339 \text{ Nm}}{2,29 \text{ m}} = 340,47 \text{ N}$$

Roottorin kierrosnopeus 7 m/s, oletetaan että  $\lambda$  säilyy samana kuin 11 m/s, voidaan kierrosnopeus johtaa kaavasta 5.

$$n = \frac{\lambda * v * 30}{R * \pi} \quad \text{Sijoitetaan luvut kaavaan } \frac{4,79 * 7 \text{ m/s} * 30}{2,29 \text{ m} * \pi} = 139 \text{ 1/min}$$

Kulmanopeus tuulennopeudella 7 m/s  $\omega_{7 \text{ m/s}}$

$$\frac{\pi * 139 \text{ 1/min}}{30} = 14,56 \text{ 1/s}$$

Roottori momentti tuulennopeudella 7 m/s

$$\frac{700 \text{ w (liite 2)}}{14,56 \text{ 1/s}} = 48 \text{ Nm}$$

Roottorin aksiaalikuorma tuulennopeudella 7 m/s  $F_{x\text{-akseli } 7 \text{ m/s}}$

$$\frac{3}{2} * \frac{4,79 * 48 \text{ Nm}}{2,29 \text{ m}} = 150,6 \text{ N}$$