

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknitaloudellinen tiedekunta
Tuotantotalous

Diplomityö

Juha Stenvall

TUULIVOIMALAN LAPOJEN HUOLLOT JA TARKASTUKSET

Työn tarkastaja

Professori Timo Pihkala

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Panu Riikonen, Wirma Lappeenranta Oy

Toimeksiantaja

Wirma Lappeenranta Oy, Renewtech-hanke.

TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Juha Stenvall		
Työn nimi:	Tuulivoimalan lapojen huolto ja tarkastukset		
Vuosi:	2013	Paikka:	Lappeenranta
Diplomityö	Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tuotantotalouden osasto 67 sivua		
Tarkastaja:	Professori Timo Pihkala		
Ohjaaja:	DI Panu Riikonen, Wirma Lappeenranta Oy		
Toimeksiantaja:	Wirma Lappeenranta Oy, RENEWTECH projekti		
Hakusanat:	Tuuligeneraattorin lapa, huolto, maahantulo- ja käyttöönottotarkastukset, haastattelututkimus.		

Uusiutuva energia elää voimakasta kasvukautta ja hallituksen tekemien tukipäätösten vuoksi tuulivoimaa tullaan rakentamaan huomattavasti lisää tulevien vuosien aikana. Tuuligeneraattorin siipien huolto- ja tarkastustoiminta on uusi ja kehittyvä toimiala. Tämä diplomityö onkin tehty oppaaksi helpottamaan tuulivoimaa omistavien, rakentavien, tai tuulivoimapuiston perustamista harkitsevien tahojen huoltosuunnitelmien tekemistä varten.

Diplomityössä käydään läpi yleisimmät tuulivoimaloiden lapojen vikaantumiset, sekä työskentelytavat ja käytettävät laitteistot voimaloiden lapojen huoltoja ja tarkastuksia tehtäessä.

ABSTRACT

AUTHOR:	Juha Stenvall		
Title:	Inspections and repairs of wind turbine blades		
Year:	2013	Place:	Lappeenranta
Master's thesis	Lappeenranta University of Technology Faculty of Technology Management 67 pages		
Examiner:	Professor Timo Pihkala		
Supervisor:	DI Panu Riikonen Wirma Lappeenranta Oy		
Commissioned by:	WIRMA Lappeenranta Oy, RENEWTECH project		
Keywords:	Wind generator blade, inspections, service, interview study		
<p>Renewable energy is undergoing a dynamic growth and because of the Finnish governments decisions the wind power will be built much more in the coming years. Wind generator blades maintenance and inspection is having just the beginning steps and is a new and developing field. This thesis is provided as a guide to those who own wind power, or consider the establishment of a wind farm.</p> <p>The thesis represents the most common wind turbine blades failure-downs, as well as the working methods and equipment used in power plants blades, maintenance and audit purposes.</p>			

Alkusanat

Suuret kiitokset Panu Riikoselle. Hänen apunsa ja ohjauksensa lopputyössä on ollut korvaamaton.

Iso kiitos kuuluu myös rakkaalle vaimolleni Lisalle ja ihanille lapsille Tanjalalle, Erikalle, Niklakselle ja Bealle. Isän opiskeleminen tässä elämän vaiheessa on asettanut perheen uusien haasteiden eteen, joista kumminkin on selvitty hienosti.

Olen kiitollinen yliopistolle saamastani mahdollisuudesta kasvattaa pääomaani tiedon saralla. Kiitos varsinkin Sampo Kokkoselle kaikesta avusta ja tuesta, jota olen saanut matkan varrella.

Lappeenranta 01.09.2013

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	TUTKIMUKSEN TAUSTA	10
1.2	TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA RAJAUS	12
2	SIIVEN TOIMINTA	13
3	TUULIVOIMALOIDEN RAKENNE	15
3.1	LAVAT, NIIDEN RAKENNE JA MATERIAALIT	18
4	MIKSI SIIVISTÄ TULEE PITÄÄ HUOLTA	20
4.1	SIIPEN HINTA.....	20
4.2	KÄYTTÖ- JA YLLÄPITOKUSTANNUKSET	21
4.3	HYVIN HOIDETUT VOIMALAN LAVAT. PAREMPI TUOTTO!	22
4.4	TARKASTUKSET EHKÄISEVÄT JA ESTÄVÄT SUUREMPIA HARMEJA.....	25
5	ERILAISET LAPOJEN VAURIOT JA NIIDEN SYNTYMEKANISMIT	26
5.1	ILMANSAASTEET, HYÖNTEISET JA LIKAANTUMINEN	27
5.2	KOSTEUS	29
5.3	SALAMANISKUT.....	29
5.4	ÖLJYVUODOT.....	30
5.5	MURTUMAT	31
5.6	JOHTOREUNAN EROOSIO.....	32
5.7	KÄSITTELYVAURIOT	33
5.8	MUUT (ESIMERKIKSI LUODINREIÄT)	34
5.9	JÄÄTYMINEN	35
5.9.1	<i>Jäätymisen vaikutukset.....</i>	<i>36</i>
5.9.2	<i>Jäätymisen tunnistus.....</i>	<i>37</i>
5.9.3	<i>Jäänesto.....</i>	<i>38</i>
5.9.4	<i>Jäänpoisto.....</i>	<i>Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.</i>
6	MENETELMÄT TARKASTUSTEN JA KORJAUSTEN SUORITTAMISEEN.....	40
6.1	TARKASTUS NÄKÖ- JA KUULOHAVAINNOIN	40
6.2	KÖYSILASKEUTUMINEN.....	41
6.3	KÖYSIMOPO	42
6.4	HUOLTOTASO	44
6.5	HENKILÖNOSTIN	46
6.6	KORJAAMINEN LAVAN SISÄLTÄ KÄSIN.....	47
6.7	LAVAN IRROTTAMINEN JA LASKEMINEN MAAHAN KORJAUSTA VARTEN	48
7	EOW TARKASTUS.....	49
8	MAALLA OLEVIENTEN VOIMALOIDEN LUOKSE PÄÄSTÄVYYS	50

9	MERELLÄ OLEVIENTEN VOIMALOIDEN LUOKSE PÄÄSTÄVYYS.....	52
10	KORJAUSMATERIAALIT JA MENETELMÄT.....	54
11	TYÖTURVALLISUUS	56
12	MYYTTI TAKUUAJASTA.....	58
13	SILMÄYS TULEVAISUUTEEN.....	59
14	YHTEENVETO	61

Symboli ja lyhenneluettelo

DNV-	Det Norske Veritas, Norjalainen luokitus ja vakuutuslaitos
DP –	Dynamic Positioning. Tietokoneavusteinen ohjausjärjestelmä alusten paikallaan pitämiseen ja tarkkaan hidaskäyttöön liikutteluun. Järjestelmä hyödyntää paikannusjärjestelmiä ja liikettä tunnistavia sensoreita ja antaa niiden mukaan ohjauskomentoja aluksen propulsio- ja ohjauslaitteille.
EOW-	End of Warranty, takuuajan päätyminen
GL-	Germanischer Lloyd, Saksalainen luokitus- ja vakuutuslaitos
Jack-up alus-	Alus jossa on omat tukijalat, joilla se voi tukeutua merenpohjaan ja nousta irti veden pinnasta
Naselli-	Tuulivoimalan konehuone, jossa sijaitsee voimalan generaattori
LPS-	Lightning protection system

KUVALUETTELO

Kuva 1: Tuulivoimalan rakenne	17
Kuva 2: Karkea piirros lavan rakenteesta	18
Kuva 3: Tuulivoimalan lavan johtoreunan eroosiota	24
Kuva 4: Katkennut tuulivoimalan lapa (Gurvits F. Airice)	26
Kuva 5: Kuvassa hyönteisten aiheuttamaa likaantumista (Bladefence)....	28
Kuva 6: Salamaniskun ja veden höyrystymisen aiheuttama vaurio lavan kärjessä (Bladefence)	30
Kuva 7: Kuvassa vaihteiston öljyvuodon aiheuttamaa likaantumista lavan sisällä Kuva: Bladefence	31
Kuva 8: Kuvassa voimakasta eroosiota tuulivoimalan lavan johtoreunassa	32
Kuva 9: Kuvassa jäätymistä tuuligeneraattorin lavoissa	36
Kuva 10: Kuvassa huoltomies nousemassa köysimopolla (kuva Airice, Feodor Gurvits).....	43
Kuva 11: Kuvassa huoltotaso (Gurvits F. Airice)	45
Kuva 12: Kuvassa miehet puhdistamassa tuulivoimalan lapaa nostokorista käsin	46
Kuva 13: Kuvassa nostokoriauto seisoo tuettuna omilla jaloilla tuulivoimalan edessä (Kuva Bladefence).....	51
Kuva 14: Kuvassa tuulivoimaloiden asennukseen ja huoltoon suunniteltu jack-up alus	53

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1: Maalle rakennettavan 1,5MW:n tuuliturbiinin kustannusjakauma (Lund, Paatero, 2009)	20
Taulukko 2: Kuvaaja likaantuneen 900 kW turbiinin tehonmenetyksestä .	23
Taulukko 3: Tuulivoimalan lavoille tehtävien tarkastusten aikataulu.....	62

1 JOHDANTO

Suomi ei ole tuulivoimatuotannon kannalta ihannemaa, siitä huolimatta Suomessa on runsaasti tuulivoiman tuotantoon sopivia alueita. Rannikko, meri ja tunturit ovat siihen parhaita. Kauppa- ja teollisuusministeriön toimeksi antaman ja rahoittaman selvityksen *Tuulivoimavoitteiden toteutumisenäkymät Suomessa – Päivitetty tilannekatsaus 2007* mukaan vuoteen 2020 mennessä teknisesti ja maankäytöllisesti toteutuskelpoista merituulivoimapotentialiaa suomen merialueilla on useita tuhansia megawatteja. Suomen rannikkoalueet ovat tuuliolosuhteiltaan parhaita Itämeren alueella ja tuulienergian vienti Suomesta muihin Itämeren alueen maihin voisi olla yksi mahdollinen menestystarina, jos tuulivoimaa ja energiantuotantoa katsottaisiin tulevaisuudessa suuremmassa mittakaavassa kuin pelkäämään maakohtaisesti. Keskitetty merituulivoiman tuotanto hyödyttäisi koko Itämeren alueen asukkaita alentamalla merituulivoiman tuotantokustannuksia ja sitä kautta sähkön hintaa. (Jones F. et al. 2012). Lisäksi keskitäminen auttaisi merelle pystytettyjen voimaloiden huoltoa, kun suuri voimaloiden määrä tekisi taloudellisesti kannattavaksi hankkia esimerkiksi jack-up alus voimaloiden huoltotöitä varten.

Tuulivoimakapasiteettia on mahdollista lisätä merkittävästi. Vuoden 2012 lopussa Suomessa oli 163 voimalaa. Niiden yhteenlaskettu teho on 288 Megawattia, ja ne tuottavat noin 0,7 prosenttia Suomessa kulutetusta sähköstä. Nämä tiedot perustuvat Kauppalehdessä 19.8.2013 olleeseen Tuulivoimahankkeet tuottaisivat yli tavoitteiden-artikkeliin.

Suomi on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä ilmastonmuutoksen torjumiseksi. Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa (2008) on asetettu tavoitteeksi tuulivoimalla tuotetun sähkön osuuden nostaminen kuuteen terawattituntiin vuoteen 2020 mennessä. Tämä tarkoittaa tuotantokapasiteetin nostamista noin 2 000 megawattiin kyseisenä ajanjaksona. Käytännössä tämä tarkoittaa noin tuhatta tuulivoimalaa, joka taas tarkoittaa 3000 – 5000 työpaikkaa tuulivoimaloiden asennuksessa ja kunnossapidossa.

Tavoitteeseen pääsemiseksi valtio on päättänyt tukea tuulivoimaa takuuhinnalla eli niin sanotulla syöttötariffilla. Järjestelmän mukaisesti tuulivoimalla tuotetusta sähköstä maksetaan vähintään 83,5 euroa megawattitunnilta. Sähkön pörssihinnan ollessa matalampi, valtio maksaa takuuhinnan ja pörssisähkön välisen erotuksen.

Tuulivoimasähkön tuotannossa ei synny hiilidioksidipäästöjä eikä muitaakaan päästöjä. Tuulivoiman ympäristövaikutukset liittyvät ääneen, maiseman muutoksiin ja mahdollisiin haittoihin luonnon eliöstölle kuten linnustoon. Tuulivoimaloiden valmistusmateriaalit pystytään kierrättämään melko tehokkaasti tuulivoimalan elinkaaren tullessa päätepiisteeseensä.

Tuulivoimayksiköt erottuvat maisemassa suuren kokonsa ja muista rakennelmista poikkeavan muotonsa vuoksi. Maisemavaikutuksia voidaan vähentää sijoittamalla voimalat esimerkiksi merelle, mahdollisimman vähän näkyvälle paikalle tai hyvin suunniteltuihin muodostelmiin osaksi kulttuurimaisemaa.

Laitosten koko Suomessa on toistaiseksi ollut 2-3 megawattia. Suurimmat meillä rakennetut tuulivoimalat yltyvät jo lähes 5 megawattiin. Tulevaisuudessa tuulivoimaloita rakennetaan myös merelle yhä enenevässä määrin ja yksittäisten voimaloiden koko saattaa edelleen kasvaa. Suuremmat laitokset tuottavat enemmän tehoa, mutta koon kasvaessa myös muut haasteet kasvavat.

1.1 Tutkimuksen tausta

Jotta tuulivoimatuotanto lunastaisi sille asetetut toiveet, tulee sen olla tulevaisuudessa kustannustehokasta ja tuotetun energian on oltava kilpailukykyistä hiili- ja kaasuvoimaloilla tuotetun energian kanssa. Tämä ei ole mahdollista, jos tuulivoimaloiden lapojen huolto ja tarkastukset eivät ole ammattimaisesti hoidettuja. Huolto- ja korjausstrategioiden on oltava sillä tasolla, että tuulivoimalat toimivat optimaalisesti, jolloin sekä huolto- että

korjauseisokit ovat mahdollisimman lyhyitä. Jotta nämä tavoitteet saavutettaisiin, on tuulivoimaloiden huoltajien ja operaattoreiden kehitettävä mahdollisimman laadukkaat järjestelmät voimaloiden lapojen huolto- ja tarkastustoimintaan.

Jatkuva huoltohenkilöstön koulutus tulee olemaan avainasemassa lapojen kasvaessa ja valmistusmateriaalien kehittyessä monimutkaisemmiksi. Uudet ja kehittyneemmät materiaalit ja valmistustekniikat tuulivoimalan lapojen valmistuksessa lisäävät omat haasteensa korjaustekniikoille ja niiden pysymiselle ajan tasalla. Tuulivoimapuistojen operaattoreiden vaatimustaso kasvaa ja huolloilta sekä korjausmenetelmiltä vaaditaan vastaavaa laatua ja dokumentaatiota, kuin mikä on käytössä valmistusympäristössä. Käytössä olevien lapojen ikääntyessä joudutaan suorittamaan aina vaativampia korjauksia kenttäolosuhteissa.

Tuulivoimateollisuuden kehittyessä ovat myös asiakkaiden odotukset nousseet uudelle korkeammalle tasolle. Samaan aikaan alalla jo toimivien huoltoyritysten mahdollisuudet vastata näihin haasteisiin ovat parantuneet. Tuulivoimaloilta vaaditaan suoritusvarmuutta silloin, kun luonnonolosuhteet ovat kovimmillaan ja yleensä sähkönkulutus suurimmillaan. Siksi säännöllinen huolto ja tarkastukset oikein ajoitettuna ja tehtynä ovat ensiarvoisen tärkeitä, jotta voimala tuottaisi silloin, kun sähköllä on kysyntää.

Tuulivoimatuotanto elää voimakasta kasvukautta Suomessa. Alalla on paljon hyvää tahtoa voimaloiden hankkimiseen ja rakentamiseen. Valitettavasti pelkkä hyvä tahto saattaa johtaa taloudellisesti suuriin virhearvioihin, kun ei osata huomioida kaikkia kustannustekijöitä, joita voimalan asentaminen ja ylläpitäminen tuo tullessaan. Tämän tutkimuksen tilannut Wirma Lappeenranta Oy on yhden osaprojektin toteuttaja kaakkois-suomalaisessa Renewtech-hankkeessa. Renewtech-hankkeen tavoitteena on edistää tuulivoiman tuotannon ympärille syntyvää liiketoimintaa. Yhtenä osana hanketta selvitetään tuulivoimaloiden siipien kunnossapitoon liittyvät toimenpidetarpeet ja niihin liittyvä liiketoiminta.

Kotka-Haminan seudun elinkeinoyhtiön Cursor osakeyhtiön yhdessä kuntien kanssa asettama tavoite rakentaa Kymenlaaksoon 100 tuulivoimalaa vuoteen 2015 mennessä antaa hyvän mahdollisuuden testata uusia sovelluksia konkreettisissa kohteissa. Erityisesti haastavat merituulipuistot tarjoavat uusia liiketoimintamahdollisuuksia logistiikassa ja huollossa niin suomalaisille projektivarustamoille, siipien ja tornien kuljetustelineitä valmistaville konepajoille kuin tuulivoimaloiden huoltoa harjoittaville yrityksille.

Kesäkuussa 2013 julkaistun kyselytutkimuksen mukaan enemmistö suomalaisista suhtautuu myönteisesti tuulivoimaan. Kyselyn mukaan tuulivoiman käytön lisäämistä kannattaa 90 prosenttia kansalaisista ja 87 prosenttia kuntapäätäjistä. (Mikkonen A. et al. 2013)

Kyselyn teettivät Motiva, Energiategollisuus ja Tuulivoimayhdistys. Siihen vastasi yli 2 000 kansalaista ja yli 1 300 kuntapäätäjää koko Manner-Suomesta.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksen tavoitteena on koota yhteen tietoa tuulivoimalan siipien vaatimista tarkastus- ja huoltotoimenpiteistä sekä niihin käytettävästä kalustosta. Tutkimuksesta tulisi syntyä Wirma Lappeenranta Oy:lle käsikirja, joka voidaan käänntää englanniksi jaettavaksi eri tuulipuisto-operaattoreille. Tutkimuksen tarkoituksena on konkretisoida huoltojen ja tarkastusten tarpeellisuus ja tuoda eri toimintamalleja operaattoreiden tietoon. Suoraa vertailevaa tietoa eri tapojen kustannuksista on mahdotonta tuottaa, koska kustannuksiin vaikuttavat lukuisat muuttujat, jotka ovat erilaisia eri sijaintipaikkojen välillä. Tutkimus rajataan koskemaan ainoastaan tuuligeneraattorin siipiä. Lisäksi tutkimuksessa käydään läpi yleisimmät tuulivoimaloiden siipien huoltoa ja tarkastuksia vaativat syyt ja tilanteet.

2 SIIVEN TOIMINTA

Yksinkertaistettuna nostovoima syntyy paine-eroista, kun siiven yläpinnalle muodostuu alipaine ja siiven alapinnalle ylipaine. Siiven yläpinnalla oleva alipaine muodostaa yleensä merkittävimmän osan koko nostovoimasta. Paine ei ole tasainen siiven pinnalla, vaan se on suurimmillaan siiven etureunassa ja pienenee siirryttäessä takareunaa kohti. Nostovoiman suuruus on painejakauma kerrottuna siiven tehollisella pinta-alalla eli

$$F = p A.$$

Ilman viskositeetti ja siivenpinnan kitka aiheuttavat rajakerroksen siivenpinnan läheisyyteen. Rajakerroksessa ilman virtauksen nopeus aivan siiven pinnalla on nolla, ja mentäessä kauemmas siivestä nopeus kasvaa vapaan virtauksen nopeuteen.

Nostovoiman suuruuteen vaikutetaan vapaan ilmavirtauksen ja siipiprofiilin kohtauskulman muuttamisella. Mikäli kohtauskulmaa ei ole, symmetrisen profiilin molemmilla puolilla vallitsee yhtä suuri paine jolloin nostovoima on nolla. Kohtauskulmaa kasvattamalla siiven yläpinnalle alkaa muodostua alipainetta ja alapinnalle ylipainetta, jolloin nostovoima kasvaa. Kun kohtauskulmaa kasvatetaan tietyn rajan yli, virtaus alkaa irrota (yleensä takareunalta lähtien, joskin muitakin sakkaustyyppisiä on). Kohtauskulmaa edelleen kasvatettaessa ilmiö siirtyy lähemmäs siipiprofiilin johtoreunaa. Vaikka virtaus ei enää ole kiinni koko siiven pinta-alalla, saadaan nostovoiman arvoa edelleen kasvatettua.

Sakkaukseksi kutsutaan ilmiötä, jolloin lopullisesti kaikki ilmavirta irtoaa siiven pinnalta, paine-erot häviävät ja nostovoima katoaa. Sakkauksen torjuminen edellyttää kohtauskulman pienentämistä. Suoranaisesti virtausnopeuden kasvattaminen ei tilannetta muuta, sillä virtaus ei enää tavoita siipeä. Sakkaus saattaa tulla äkillisenä, sillä sitä edeltää yleensä tilanne, jolloin nostovoima on ollut suurimmillaan. Lentokoneella tai virtauskoneella sakkaustilanteesta pyritään aina mahdollisimman nopeasti pois,

joskin lentokoneet käyttävät ilmiötä hyväkseen laskeutumisen yhteydessä tavoitteena nopea ja pehmeä nopeuden hidastaminen. Tuulivoimalan laivoissa sakkausta estetään kiertämällä siipiprofiilia niin, että kohtauskulma pienenee mentäessä kohti lavan kärkeä, jonka nopeus on suurin tuuliturbiinin pyöriessä.

Nostovoiman suuruuteen vaikuttavia seikkoja ovat ilmavirran nopeus (ilma-aluksen tai potkurin lavan nopeus), ilman tiheys (lämpötila ja staattinen paine), siipipinta-ala, siiven ja ilmavirran välinen kohtauskulma ja siiven puhtaus (lika, jää ja vesi). Siipiprofiileille on laadittu taulukoita, joilla profiilien nosto- ja vastusvoimia voidaan verrata toisiinsa eri olosuhteissa. Taulukoissa voimat on laskettu nostovoima- ja vastusvoimakertoimiksi suhteessa vapaan ilman nopeuteen, jolloin nostovoiman laskeminen on huomattavasti helpompaa.

3 TUULIVOIMALOIDEN RAKENNE

Tuuliturbiini on kone, jolla tuulen eli virtaavan ilman liike-energiaa muutetaan turbiinin akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Akseli pyörittää edelleen sähköä tuottavaa generaattoria ja tuottaa sähköä. Tuulivoimalayksikön eli aerogeneraattorin napa ja lavat muodostavat kokonaisuuden, jota kutsutaan turbiiniksi (tai roottoriksi). Turbiinin takana moottorikotelossa (konehuoneessa) ovat muut sähkölaitteet ja koneisto.

Nykyaikaiset 1 - 5 MW kaupalliset tuulivoimalaitokset ovat vaaka-akselisia, kolmelapaisia ja niiden roottori on torniin nähden tuulen yläpuolella. Kolmilapainen vaaka-akselinen etutuulipotkuri on yleisin energiantuotannossa käytetty tyyppi ja taloudellisesti edullisin. Sillä on suuri pyyhkäisyypinta-ala, suurimmillaan lähes hehtaari, ja tuotto on suoraan verrannollinen pyyhkäisyypinta-alaan. Potkurin pinta-ala suhteessa pyyhkäisyypinta-alaan on pieni (kahdesta kolmeen prosenttia) eli suuren pinta-alan käyttöön tarvitaan minimaalinen määrä materiaalia. Sillä on erinomainen hyötysuhde verrattuna muihin ratkaisuihin. Se on rakenteellisesti kevein ja luotettavin pitkäaikaisessa käytössä.

Tuulivoimala koostuu roottorista, konehuoneesta, joka sisältää vaihteet ja generaattorin, sekä tornista ja perustuksista.

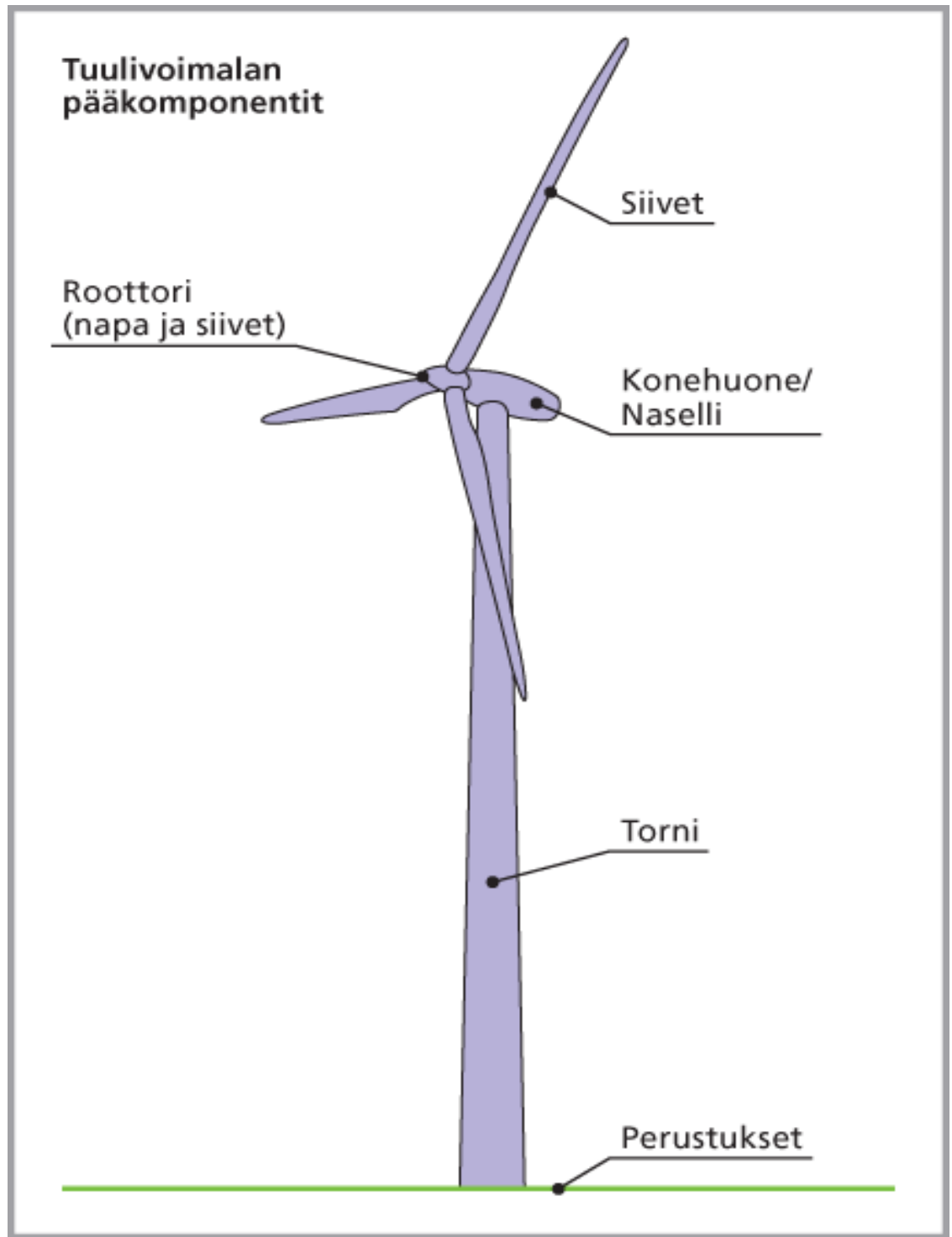
Perustuksen pääasiallinen tehtävä on kantaa tuulivoimalan ja tornin paino. Lisäksi perustusten täytyy kestää vaakasuuntaista rasiitusta, jota syntyy voimakkaan tuulen puhaltaessa. Peruksen juurelle sijoitetaan myös liitäntä sähköverkkoon, mikäli voimalalla tuotetaan virtaa myytäväksi.

Tornin korkeus vaikuttaa tuulivoimalan toimintaan ratkaisevasti. On esitetty arvio, että kaksinkertaistamalla tornin korkeus tuulen nopeus kasvaa 10 % ja odotettu sähköntuotanto 35 %. Tuulivoimaloiden korkeus on noin 80 - 140 metriä ja roottorin lapojen halkaisija noin 100 - 125 metriä.

Konehuoneessa sijaitsee pääosa voimalan tekniikasta eli vaihteisto, jarrut ja generaattori. Käytettävä teknologia poikkeaa voimalamalleittain. Markkinoille on myös tullut vaihteettomia voimaloita. Näiden vaihteettomien voimaloiden etuna on 50 prosenttia vähemmän pyöriviä osia sekä kevyempi rakenne verrattuna vaihteellisiin voimaloihin. Vaihteettomissa voimaloissa käytetään kestoplaneettogeneraattoria, ja koska välissä ei ole vaihteistoa, saadaan tuotettua energiaa vähemmällä tehonhäviöllä.

Roottori pyörittää tuulivoimalan generaattoria. Vakiintunut tuulivoimalamalli sisältää kolme siipeä, mutta myös yhden ja kahden siiven roottorit ovat mahdollisia. Tuulta pystytään hyödyntämään sitä paremmin, mitä herkempiä tuulivoimalan siivet ovat pyörimään. Tämä vaatii toteutuakseen kevyitä, mutta kestäviä materiaaleja kuten alumiini, hiilikuitu ja lasikuitu.

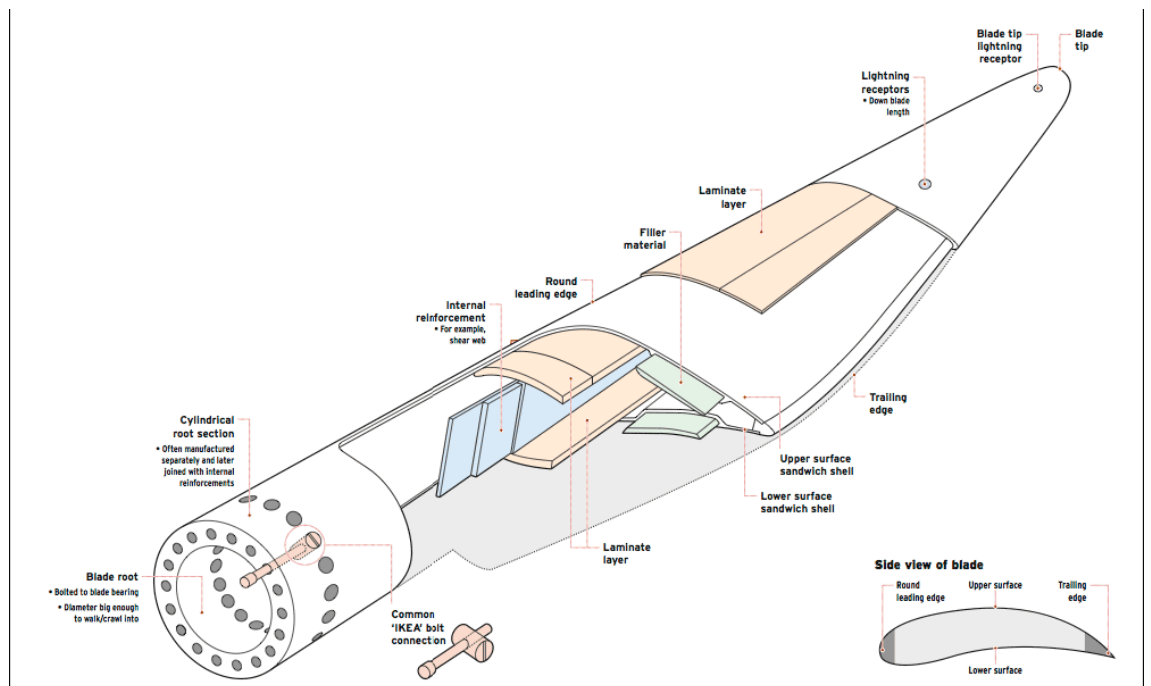
Alla olevassa kuvassa on esitetty tuulivoimalan pääkomponentit:



Kuva 1: Tuulivoimalan rakenne

3.1 Lavat, niiden rakenne ja materiaalit

Loppujen lopuksi tuulesta saatavan tehon määrän ratkaisee tuulivoimalan roottorin koko. Jo pienetkin lisäykset roottorin kokoon vaikuttavat suoraan tehon kasvuun. Lavan pituutta kasvatettaessa 10 prosenttia (%) kasvaa roottorin pinta-ala 21 %. Lاپoja ei voida rakentaa mielivaltaisen suuriksi, koska väsymisspektrit kehysuuntaan kasvavat lavan painon mukaan ja paino taas kasvaa kuormituksen mukaan. Jos halutaan valmistaa lapa, joka kestää enemmän räsitusta (joka siis pääasiassa aiheutuu lavan omasta massasta), pitää siitä tehdä massiivisempi. Tämä taas lisää räsitusta edelleen ja jossain vaiheessa oravanpyörää saavutetaan piste, jolloin lavan pituutta ei enää voida kasvattaa. Materiaalit, joilla on hyvä paino ja räsituksenkestosuhde, ovat myös hyviä lapamateriaaleja, mutta tosin usein myös kalliita. Hiilikuitua käyttämällä voitaneen kuitenkin rakentaa halkaisijaltaan jopa 200 metrin roottori.



Kuva 2: Karkea piirros lavan rakenteesta

Kaksilapainen roottori voi olla vähän kolmelapaista isompi ja yksilapainen vielä vähän isompi, mutta muun muassa esteettiset haitat tulevat todennäköisesti jarruttamaan kaksi- tai yksilapaisten sovellusten kehittelyä.

Riso National Laboratoryssa Tanskassa on myös kehitetty joustavaa roottoria. Aeroelastisilla sovelluksilla, numeerisella optimoinnilla ja vakausanalyysillä ollaan päästy rakenteisiin, joissa lapoihin kohdistuvat rasitukset ovat vähentyneet 25 – 50 % verrattuna jäykkään roottoriin (Rasmussen & Petersen, 1999). Suunnitteluvaiheessa on keskitytty luomaan koejärjestelyt sillä tavalla, että tulokset antaisivat mahdollisimman tarkasti tietoa myös selvästi koelaitteiston kokoluokkaa suurempien komponenttien (koelavan pituus 6,1 m) käyttäytymisestä ja ominaisuuksista.

Suurin haaste lapojen pituutta kasvattaessa on saada lavasta niin kestävä ja jäykkä, ettei se iskeydy tuulivoimalan torniin pyöriessään kovassa tuulella. Lapojen jäykkyyden lisäämisen lisäksi on muutettu roottorin kulmaa ylöspäin jolloin lavan ollessa ala-asennossa kohtauskulma torniin nähden kasvaa.

Lapojen valmistuksessa käytetään yleisesti tällä hetkellä lasikuitua ja hartsia lavan sydämen ollessa balsaa. Lisäämällä hiilikuitumateriaalien käyttöä on lavan massan arvioitu vähenevän noin 20 %. Keveämmillä materiaaleilla saadaan luonnollisesti pienennettyä tuulivoimalan muihin osiin kohdistuvia voimia. Jäykkyydellä ja keveydellä on edelleen hintansa. Hiilikuidusta valmistettu lapa maksaisi jopa kaksikymmentä kertaa enemmän kuin lasikuidusta valmistettu. Lisäksi vielä tällä hetkellä korjausmateriaalit, jotka ovat yleisesti käytössä, sopivat lasikuidusta valmistetuille lavoille.

4 MIKSI SIIVISTÄ TULEE PITÄÄ HUOLTA

4.1 Siipien hinta

Kuten alla olevasta taulukosta käy ilmi, ovat tuuligeneraattorin lavat arvoltaan suurin yksittäinen tuulivoimalan komponentti. Lisäksi mikäli yksi siipi tuhoutuu käyttökelvottomaksi, joudutaan generaattorin tasapainon vuoksi useimmiten vaihtamaan koko siipisarja. Taulukossa 1 selvitetään 1,5 megawatin tuuliturbiinin kustannusten jakautuminen eri komponenttien kesken.

Taulukko 1: Maalle rakennettavan 1,5MW:n tuuliturbiinin kustannusjakauma (Lund, Paatero, 2009)

KOMPONENTTI	OSUUS (%)
Lavat	18,3
Napa	2,5
Pääakseli	4,2
Vaihdelaatikko	12,5
Generaattori	7,5
Konehuone	10,8
Suuntausjärjestelmä	4,2
Säädin	4,2
Torni	17,5
Jarrut	1,7
Perusta	4,2
Asennus	2,1
Kuljetus	2
Verkkokytkentä	8,3

Tuulivoimaloiden valmistajat eivät ymmärrettävistä syistä anna tietoja omien voimaloidensa rikkoutumisten määristä tai syistä. Norjalaisen luokitus- ja vakuutuslaitos Det Norske Veritasin keräämien tietojen perusteella joka viides tuulivoimalan lapa tarvitsee suunnittelemattoman huollon kaksikymmentävuotisen käytön aikana ja yksi kahdestakymmenestä lavasta joudutaan vaihtamaan samana aikana merkittävän rakenteellisen heikkenemisen ja rikkoutumisen vuoksi. Lisäksi 7 – 10 % tuuligeneraattoreiden rikkoutumisista voidaan jäljittää lapojen aiheuttamiksi. Tulevaisuudessa merelle rakennettavien voimaloiden siipien kasvaessa 80 - 100 metrisiksi 45 tonnia painaviksi järkäleiksi ja niiden aiheuttamien voimien kasvaessa vastaavissa määrissä tulevat siipien tasapainolle ja kunnolle asetettujen vaatimusten taso vain kasvamaan. Amerikan johtavan uudistuvien energiamuotojen vakuuttajan Gcuben mukaan vuonna 2012 Pohjois-Amerikassa tehdyistä tuulivoimaloita koskevista vahinkoilmoituksista 41,4 % johtui lavoista ja 35,1 % koski vaihdelaatikoita. Näiden kahden suurimman vahinkoryhmän syistä merkittävimpänä olivat huono huolto 24,5 %, salamaniskut 23,4 % ja suunnittelussa olleet virheet. (Hopson C. 2013).

4.2 Käyttö- ja ylläpitokustannukset

Tuulivoimalan vuotuisten käyttö- ja kunnossapitokustannusten arvioidaan olevan noin 2 – 3 % projektin alkuperäisistä investointikustannuksista. Tämä vastaa noin 12 – 18€/MWh tuotantokustannuksia (tuotanto 2400 h/a, investointikustannus 1400 €/kW) [1]. Suomessa huolto- ja korjauskustannukset ovat olleet suhteellisen korkeita. Maissa, joissa tuulivoimaa on rakennettu paljon, käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat laskeneet. Käyttö- ja ylläpitokustannukset muodostuvat:

- Huoltokustannuksista
- Vakuutuskustannuksista ja korjauskustannuksista (joiden keskinäinen jakautuminen riippuu vakuutusten kattavuudesta), sekä
- Hallinnointikustannuksista

Huolto- ja korjauskustannukset suhteutettuna asennetun laitoksen tehoon tai tuotettuun energiaan vaihtelevat voimakkaasti riippuen mm. tuulipuiston koosta ja laitosten yksikkökoosta (huollettavien laitosten lukumäärä), huoltoetäisyyksistä ja -yhteyksistä (esimerkiksi merituulivoimaloiden huolto on huomattavasti kalliimpaa kuin maalla sijaitsevien), huolto-organisaation tehtyjen huoltosopimusten toimivuudesta ja niin edelleen. Voimaloiden ikääntyessä huolto- ja korjauskustannukset yleensä vähitellen kasvavat. Suurten tuulivoimaloiden (yli 1 MW) on muun muassa Saksan tuulivoimatalastoissa todettu olevan huolto- ja korjauskustannuksiltaan suhteessa edullisempia kuin pienempien laitosten (myös laitosten ikäerot huomioon ottaen). (Syöttötariffityöryhmän väliraportti 2009)

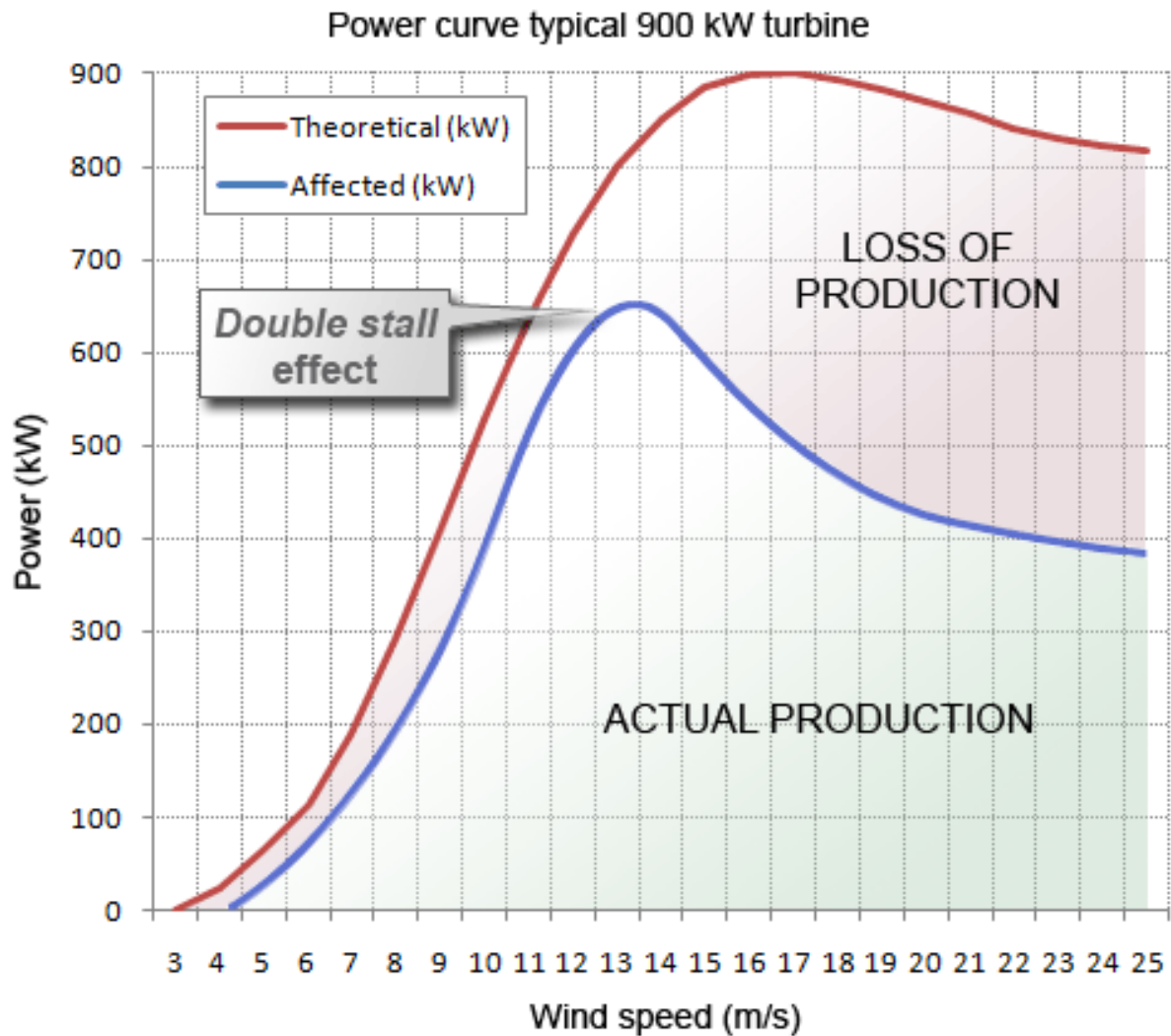
4.3 Hyvin hoidetut voimalan lavat. Parempi tuotto!

Suurin uhka tuulivoimaloiden lavoille ei ole salamointi, jää, ultraviolettisäteily tai pintavauriot, vaan tietämättömyys niiden vaikutuksista. Säännölliset tarkastukset ja huolto ehkäisevät katastrofeja koko voimalan elinkaaren ajan.

Maan tasolta on erittäin vaikeata havainnoida millaisessa kunnossa tuulivoimalan siivet todella ovat. Lasikuitu on herkkä materiaali, jonka kestävyyttä koetellaan Suomen ilmastossa kovalla kädellä. Ilman säännöllisiä tarkastuksia ja toimenpiteitä voimaloiden siivet kärsivät väistämättä vaurioita ja ovat vaarassa jopa hajota kokonaan ennen aikojaan.

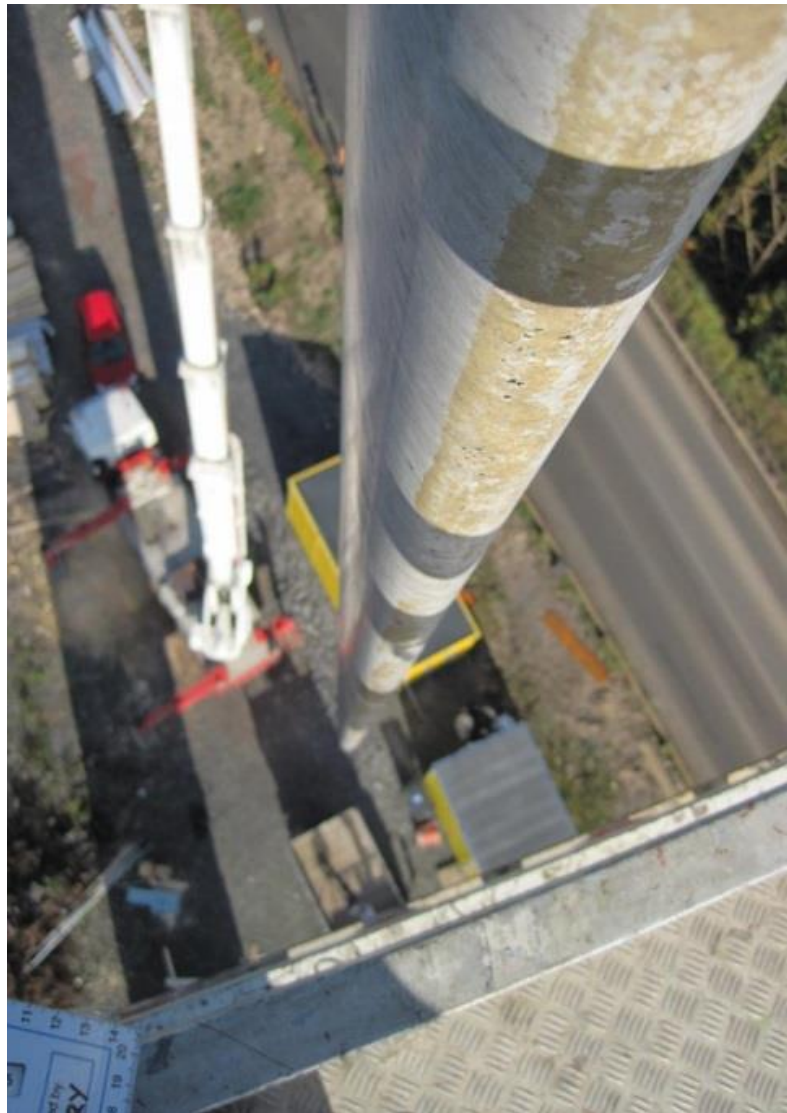
Pelkästään liiskaantuneet hyönteiset siiven johtoreunassa laskevat voimalan tehoa jopa 25 % Hollannin energiatutkimuskeskuksen laatiman, kuusi eri tutkimusta ja selvitystä sisältävän artikkelin mukaan. (Corten P. Veldkamp H. 2001)

Taulukko 2: Kuvaaja likaantuneen 900 kW turbiinin tehonmenetyksestä



Hyönteiset ja kertyvä lika voivat siis heikentää siipien aerodynaamisia ominaisuuksia, mikä taas johtaa voimalan tuoton laskemiseen. Tärkeätä on huomioida, että moni asia voi pahimmillaan pysäyttää voimalan lopullisesti kauan ennen takuuajan umpeutumista. Ultravioletisäteily, ilman epäpuhtaudet ja voiteluöljyt yhdessä ilmanvastuksen kanssa haurastuttavat siipien pintakerroksia. Salamet repivät reikiä tietysti vieläkin nopeammin. Taivaalta sataa seuraava ongelma. Sadevesi pääsee rei'istä siiven rakenteisiin ja sen suorituskyky heikkenee entisestään. Kun pitkin siiven pintaa valunut öljy tai epäpuhtauksia ei ole puhdistettu, voivat ne tukkia vedenpoistoaukot siiven kärjestä.

Kosteus pääsee sisään pienestäkin raosta ja jäätyessään laajentuva vesi rikkoo rakenteita salakavalasti sisältä päin. Siiven profiili muuttuu, mikä heikentää aerodynamiikkaa, mutta lapojen epävakaalla pyörimisellä voi olla painavampikin syy ja seuraus. Monituhatkiloisissa siivissä tarvitaan keskenään vain pieniä eroavaisuuksia painossa, kun epätasapaino alkaa rasittaa voimansiirtoa ja vaihteistoa. Jos siipi siis nielee liikaa vettä, ostolistalla saattaa pian olla uusi turbiini. Jatkuvan rasituksen alla hiuksenhienoista säröistä voi kasvaa pitkiä halkeamia, jotka ajan kanssa halkeavat lisää. Äärimmäisessä tapauksessa pois lentänyttä siipeä saa etsiä voimalan lähiseudun asukkaiden takapihoilta.



Kuva 3: Tuulivoimalan lavan johtoreunan eroosiota

4.4 Tarkastukset ehkäisevät ja estävät suurempia harmeja

Vaurioita voimaloiden lapoihin saattaa syntyä jo ennen voimalan pystyttämistä. Kuljetus ja nostot ovat otollisia paikkoja vahinkojen synnylle. koko voimalan elinkaaren kestävä siipien säännöllinen tarkastaminen ja huoltaminen pitäisikin aloittaa jo lapojen tullessa maahan esimerkiksi laivalla.

Tarkastukset tuottavat omistajalle hyödyllistä tietoa siipien kunnosta, mutta mikä tärkeintä, pienet säröt, reiät ja eroosio havaitaan ja paikataan ennen kuin siipiin repeytyy ongelmallisempia halkeamia ja aukkoja.

Talvella 2012 - 2013 saatiin hyvä esimerkki siitä, miten suuriin tuotannonmenetyksiin saatetaan ajautua, kun Pohjois-Ruotsissa tuulienergian tuotanto kärsi rankasta talvesta. Tuulivoimaloiden siivet jäätivät eikä energiaa saatu verkkoon. Nollan tienoilla oleva lämpötila, lumisade ja olemattomat tuulet ovat talvena 2012 – 2013 kiusanneet etenkin Pohjois-Ruotsin tuulivoimaloita, kertoo Ny Teknik -lehti.

”Sama ongelma toistuu talvesta talveen. Jäätä poistetaan monilla eri tavoilla, mutta vielä ei ole löytynyt menetelmää, joka sekä poistaisi ongelman kokonaan ja olisi vielä kustannustehokas”, sanoo Ruotsin tuulivoimatekniikan keskuksen SWPTC:n puheenjohtaja Matthias Rapp. (Peltonen K. 2013)

5 ERILAISET LAPOJEN VAURIOT JA NIIDEN SYNTYMEKANISMIT

Lapojen kunnan seuranta ja niiden puhdistus sekä ajoissa suoritettavat korjaustoimenpiteet ovat erittäin tärkeitä generaattorin hyötysuhteen säilyttämiseksi mahdollisimman optimaalisella tasolla. Lisäksi ajoissa suoritetuilla korjauksilla ehkäistään suurempien vaurioiden synty ja jopa mahdollinen generaattorin lavan tai lapojen menettäminen. Tuulivoimaloiden operaattoreiden ja omistajien ymmärtäessä paremmin siipien tarkastusten ja huollon merkityksen syntyy heille merkittävä taloudellinen hyöty. Tarkastetut, puhtaasti ja ehjät siivet pyörittävät turbiinia varmemmin, pidempään ja tehokkaammin.



Kuva 4: Katkennut tuulivoimalan lapa (Gurvits F. Airice)

5.1 Ilmansaasteet, hyönteiset ja likaantuminen

Ilman epäpuhtauksien aiheuttama lapojen likaantuminen on hyvin paikkakuntakohtaista ja riippuu lähiseudun teollisuudesta, liikenteestä ja kulkeutumisesta. Paikkakunnilla missä on havaittu runsaasti epäpuhtauksia ilmassa, myös generaattorin lavat likaantuvat nopeasti. Tästä hyvänä esimerkkinä Haminaan sijoitetut generaattorit, joiden siivet likaantuivat jo vuoden aikana merkittävästi. Myös hiilisataman läheisyydessä Porissa sijaitsevat generaattorit ovat likaantuneet nopeasti. Noen ja muun lian kertyminen lapojen pinnalle aiheuttaa ajan saatossa lavan aerodynaamisten ominaisuuksien heikkenemistä ja tehon menetystä. Laskennallisesti suuremmissa tuulivoimaloissa jo viiden prosentin tehon lasku tarkoittaa 40 000€ vuotuisen tuoton menetystä. Paikoissa, joissa generaattorin lavat likaantuvat voimakkaimmin, olisi pesu syytä suorittaa kolmen vuoden välein.

Eri tutkimuksissa on hyönteisten kertymisen lapoihin havaittu aiheuttavan 10 – 25 % tehon menetyksen varsinkin kovemmissa tuulissa. Tutkimuksissa ehkä hieman yllättäenkin havaittu tehon menetys tapahtui portaittain tuulen nopeuden kasvaessa. Näistä viimeisimpiä tutkimuksia on Gustave P. Cortenin ja Herman F. Veldkampin tutkimus ”Stall Flag and PV Measurements on the NEG Micon 700/44 Wind Turbine with LM19 Blades”, jossa tutkittiin hyönteisten aiheuttamaa tehonmenetystä NEG Miconin tuulivoimalassa. Matalammissa tuulen nopeuksissa ei havaittu merkittäviä tehon menetyksiä, mutta tuulen nopeuden kasvaessa yli 10 m/s nopeuksiin alkoi turbiinin tuottama teho laskea radikaalisti. Tämän havaittiin johtuvan lavan sakkauksen portaittain tapahtuvasta kasvusta. Samassa tutkimuksessa havaittiin myös lapojen sakkauksen vähenevän sateisen ajanjakson jälkeen, kun lavat hetkellisesti puhdistuivat. Hyönteisten on havaittu aiheuttavan eniten lapojen pintojen epäpuhtautta silloin, kun tuulee hiljaa, ilman suhteellinen kosteus on korkea ja lämpötila on yli +10 C. Hyönteiset tarttuvat lavan johtoreunaan roottorin ollessa liikkeessä. Looginen johtopäätös tästä on, että lapojen puhdistukselle pa-

ras aika on myöhään syksyllä juuri ennen pakkasten alkua, jolloin päästään syksyyn ja talveen mahdollisimman hyvässä kunnossa olevilla laivoilla. Suomessa syksy ja alkutalvi ovat yleensä hyvätuulista aikaa, jolloin generaattori jauhaa tuloa omistajalleen.

Alla olevassa kuvassa näkyy miten epätasaiseksi pinta muuttuu hyönteisten liiskautuessa.



Kuva 5: Kuvassa hyönteisten aiheuttamaa likaantumista (Bladefence)

5.2 Kosteus

Kosteuden pääsy lavan rakenteisiin aiheuttaa lukuisia ongelmia. Rakenteisiin päässyt vesi aiheuttaa jäätyessään rakenteiden halkeamista. Useimmissa siivissä runkomateriaalina käytetään puuta. Puun vettyminen aiheuttaa materiaalin jäykkyydessä muutoksia, jolloin tuulivoimalan lapa alkaa taipua arvioitua enemmän, tämä taas saattaa aiheuttaa murtumia muissa materiaaleissa, kuten lapojen lasi- tai hiilikuidussa. Lisäksi mikäli vettä on kertynyt lavan kärkeen aiheuttaa salamanisku omat ongelmansa.

5.3 Salamaniskut

Salamaniskuja silmälläpitäen on lavat suojattu ukkosenjohtimilla. Ukkosenjohdatuksen ollessa kunnossa ei salamanisku itsellään välttämättä aiheuta merkittäviä vaurioita lavoille. Ongelmat syntyvät, kun huoltoa on laiminlyöty. Yleinen tapahtumaketju on seuraavanlainen: Lapojen kärjissä on reiät, joista lapojen sisään päässyt vesi tulisi poistua keskipakoisvoiman vaikutuksesta lapojen pyöriessä. Usein nämä reiät tukkeutuvat ajan saatossa. Lavan kärjessä ollessa nestettä salaman iskiessä lapaan, kärjessä oleva vesi höyrystyy silmänräpäyksessä ja aiheutuu pienoinen räjähdys. Tällainen räjähdys suljetussa tilassa repäisee lavan kärkeen melkoisen aukon. Jottei lavan kärkeen syntyisi tällaisia vesikertymiä, tulisi lavan kärkien vedenpoistoaukot tarkastaa ja huoltaa kerran vuodessa ja samalla olisi syytä tarkastaa lavan ukkosenjohtimen toiminta.



Kuva 6: Salamaniskun ja veden höyrystymisen aiheuttama vaurio lavan kärjessä (Bladefence)

5.4 Öljyvuodot

Siipien säätömekanismin ja vaihteiston öljyvuodot eivät myöskään ole mitenkään harvinaisia. Roottorin pyöriessä öljy leviää tasaisena kalvona lapojen juuriin. Öljyvuodon havaitsemisen ja korjaamisen jälkeen tulisi öljy saada pinnoilta pois mahdollisimman nopeasti. Materiaalien huokoisuuden takia, jos öljy pääsee imeytymään rakenteisiin, on sitä myöhemmin lähes mahdoton saada pois. Lisäksi öljyn peittämiin lapojen osiin tarttuu helpommin myös muita epäpuhtauksia aiheuttaen lapojen pintaan entistä paksumman kerroksen, joka taas aiheuttaa lavan sakkaamista.



Kuva 7: Kuvassa vaihteiston öljyvudon aiheuttamaa likaantumista lavan sisällä (Bladefence)

5.5 Murtumat

Siipien kasvaessa on havaittu myös rasituksesta aiheutuvien murtumien määrän kasvaneen. Vaikka siivillä on omat kestävyystestinsä, nämä eivät ole pystyneet täysin ennakoimaan kaikkia siipiin kohdistuvia voimia ja rasituksia. On havaittu siiven taipumisen olevan oletettua monitahoisempaa, josta aiheutuu ns. salmiakkiefekti kun rakenteita rasitetaan useampaan tahoon yhtäaikaisesti.

5.6 Johtoreunan eroosio

Siiven johtoreuna on siiven etuosa, joka siis voimalan roottorin pyöriessä kohtaa suurimmalla voimalla erilaiset ilmassa olevat epäpuhtaudet ja partikkelit. Lavan liikenopeudesta johtuen nämä partikkelit aiheuttavat lavan pinnan kulumista eli johtoreunan eroosiota. Näitä kulumista aiheuttavia partikkeleita ovat mm. sade, räntä, lumi, pöly, hyönteiset, merisuola jne. Erilaiset epäpuhtaudet vaihtelevat huomattavasti voimalan sijoituspaikan mukaan. Jos ympärillä on paljon peltoja ja maataloutta on pölyn määrä huomattavasti suurempi kuin tuntureille tai merelle sijoitettujen voimaloiden ympärillä. Johtoreunan eroosiota yritetään vähentää suojaamalla voimalan lapoja esim. johtoreunan teippaamisella, erilaisilla suojaamaaleilla tai suoja-aineilla.



Kuva 8: Kuvassa voimakasta eroosiota tuulivoimalan lavan johtoreunassa

Tuulivoiman alkuvuosina yleinen käsitys Pohjois-Amerikassa oli, että tuulivoimalan pystytyksen jälkeen voimalan lavat olisivat huoltovapaita. Ajan myötä saatiin kallista oppia siitä, kuinka varsinkin lavan johtoreunan huolto ja tarkastukset eivät ole ainoastaan suositeltavia vaan äärimmäisen tärkeitä, jotta lavat pysyisivät käyttökunnossa koko suunnitellun elinkaarensa ajan.

Johtoreunan eroosio alkaa välittömästi voimalan käyttöönotossa. Jollei lapoihin ole tehty valmistuksen yhteydessä suojausta johtoreunan eroosiota vastaan, alkavat kulumisen jäljet näkyä jo kolmessa vuodessa. Lapojen kärjet ovat liikenopeutensa vuoksi herkimmin eroosiolle altistuvat alueet. Vaikka johtoreuna olisikin suojattu eroosiolta valmistusvaiheessa, pienetkin laaturvirheet, joita usein vähätellään ja peitetään pinnoitteella, vaikuttavat siihen miten johtoreuna ja koko siipi alkaa rappeutua. Pienetkin ilmataskut tai kuplat siiven pinnoitteessa aiheuttavat pinnan eroosiota käytössä, kun pinnoitemateriaali taipuu ja venyy. Siipimateriaalin eroosion huomaminen ajoissa pienentää korjauskustannuksia huomattavasti. Mikäli korjauksia ei tehdä riittävän varhaisessa vaiheessa alkaa laminointi silminnähdessä rappeutua jo viiden ensimmäisen käyttövuoden aikana. On erittäin tärkeää, että korjaukset tehdään alusta alkaen oikeilla materiaaleilla ja riittävän suurella ammattitaidolla unohtamatta dokumentaatiota tehdystä korjaustoimenpiteistä. Pelkkään korjauksen hintaan tuijottaminen kiinnittämättä huomiota siihen, mitä saa, voi aiheuttaa ikäviä ja kalliita yllätyksiä myöhemmin.

Mikäli johtoreunan eroosiota ei ole korjattu ollenkaan tai korjaus on tehty heikosti saattaa lavan lisäksi vaarantua koko tuulivoimala. Epätasapainossa olevat lavat aiheuttavat värähtelyä, jota voimala tai lavat eivät ole suunniteltu kestämään. Pienetkin halkeamat pinnassa kasvavat ajan myötä isommiksi ongelmiksi, kun kosteus pääsee syvemmälle lavan rakenteisiin. Kosteus lavan rakenteissa taas koituu tuhoisaksi lavan jäätyessä tai salaman iskiessä lapaan.

5.7 Käsittelyvauriot

Tuuligeneraattorin lavat kulkevat melkoisen kuljetusketjun läpi ennen saapumista tuotantopaikalle. Useimmiten lavat nostetaan tehtaalta rekan lavalle, josta ne lastataan laivaan. Merikuljetuksissa lavat kuljetetaan

useimmiten kansilastina, jolloin ne joutuvat alttiiksi merenkäynnille ja säille. Kovassa merenkäynnissä saattavat aallot lyödä kannen yli, jolloin lavat joutuvat kovalle rasitukselle ja suolaveden armoille. Määräsatamassa lavat nostetaan taas rekkaan, joka kuljettaa ne asennuspaikalle, missä seuraa vielä nosto yläilmoihin. Olisi ensiarvoisen tärkeää, että tuulivoimalan tilaajalla olisi oma tarkastaja paikalla viimeistään lapojen saapuessa määräsatamaan. Mitä paremmin suoritetaan lavoille maahantulotarkastus, sitä paremmat mahdollisuudet on suojautua turhilta kuluilta, joita aiheutuisi viallisten siipien vastaanottamisesta tuotantopaikalle. Vastaanototarkastuksissa on löydetty myös vaurioita, joita on aiheutunut kun siipien päällä on kuljettu ja aiheutettu murtumia varomattomuudella.

5.8 Muut (esimerkiksi luodinreiät)

Tuulivoimalat aiheuttavat suuria tunteita ja niistä on löydetty tarkistuksissa myös tahallisesti aiheutettuja vaurioita. Luotien ja haulien reiät lavoissa antavat kosteudelle mahdollisuuden tunkeutua rakenteisiin aiheuttaen aiemmissa kappaleissa mainittuja ongelmia.

Huomattavia vaurioita aiheuttaa toisesta rikkoontuneesta siivestä irronneet palat tai katkennut siiven osa. Tällainen täystuho on jo voimalaoperaattorin pahin painajainen. Lapojen huollon ja tarkastusten laiminlyönti on johtanut siihen, että yhden siiven rakenteellista vauriota ei ole huomattu ja heikentyneet rakenteet johtavat lavan katkeamiseen voimalan pyöriessä. Irronnut lapa tai lavan pala osuu seuraavaan lapaan aiheuttaen huomattavia vaurioita myös toisessa lavassa. Huonoimmassa mahdollisessa skenaariossa tämä johtaa sitten kaikkien lapojen merkittävään vaurioitumiseen tai totaaliseen tuhoon.

5.9 Jäätyminen

Jäätyismekanismia on pääasiassa kaksi erilaista. Pilvien tai sumun ympäröidessä voimalan tapahtuu sopivissa olosuhteissa ”pilven sisällä jäätymistä” (in-cloud icing). Jäätyismekanismista toinen on sadejäätyminen, joka johtuu sadepisaroiden jäätymisestä tuulivoimalan lapojen pinnalle. Jäätyminen saattaa myös aiheutua kummastakin edellä mainitusta mekaniismista samanaikaisesti. Tuulivoimaloille jäätyminen aiheuttaa monenlaisia ongelmia. Tuulivoimaloiden lavat jäätyvät ja siten jääkuormat aiheuttavat ylimääräistä rakenteellista kuormitusta lavoissa. Lisäksi lapoihin kertyvä jää muuttaa lapojen aerodynaamista käyttäytymistä sellaiseen suuntaan, jota ei välttämättä ole otettu huomioon voimalaa suunniteltaessa. Jäätyminen seurauksena lapa alkaa myös sakata pienemmällä tuulennopeudella. Tuulennopeuden mittausanturit jäätyvät ja aiheuttavat ongelmia voimalan säätöjärjestelmälle. Näin ollen jäätyminen aiheuttaa huomattavan määrän seisonpäiviä tuulivoimaloille ja huonontaa siten voimaloiden käytettävyyttä. Myös elektroniikkaa, generaattoria ja vaihdelaatikkoa on lämmitettävä, jotta ne pysyvät toimintakunnossa kaikissa olosuhteissa. Lapalämmitysjärjestelmä koostuu lämmityselementeistä, jotka voidaan asentaa kalvoina lavan pinnalle tai integroida laparakenteeseen. Laparakenteeseen integroidut lämmityselementit altistuvat vähemmän ulkoiselle rikkoutumiselle ja ovat siten toimintavarmempia. Lämmityselementtien huolto- ja korjaustyöt ovat vaikeita toteuttaa.



Kuva 9: Kuvassa jäätymistä tuuligeneraattorin lavoissa

5.9.1 Jäätymisen vaikutukset

Lavan pinnalle kerrostuva jää aiheuttaa muutoksia lapaprofiilille. Jää kasautuu pääosin johtoreunaan, mikä huonontaa optimoidun lapaprofiilin ominaisuuksia. Jään kertyminen lisää lavan karheutta ja nostekertoimen arvot pienenevät. Karheuden kasvaessa myös sakkauskulma pienenee eli lapa sakkaa pienemmällä tuulennopeudella. Jäätyminen etenee usein epätasaisesti rottorin lapojen välillä, mikä heikentää siipien tasapainoa. Lapoihin kiinnittynyt jää aiheuttaa myös taloudellisia vaikutuksia, sillä jää-

tymisen seurauksena energiantuotanto saattaa puoliintua normaaliolosuhteisiin nähden. Jää heikentää siiven aerodynaamisia ominaisuuksia, ja aiheuttaa roottoriin epätasapainoa. Vaikutus on niin suuri, että se on estetävä taloudellisesti kannattavan tuotannon aikaansaamiseksi, sillä se saattaa vähentää voimalan tuotantoa jopa 50 %. (Kemijoki Oy, 2002). Lisäksi suunnittelemattomat aerodynaamiset ja massaepätasapainosta johtuvat kuormat lyhentävät turbiinin elinikää. Roottorista tippuvat jäät saattavat aiheuttaa myös turvallisuusriskin lähistöllä liikkuville ihmisille ja liikenteelle. Yhä suurempitehoiset tuulivoimalat ovat jatkuvan kehitystyön alaisina. Suurempi yksikköteho merkitsee suurempia roottorin halkaisijoita, mikä puolestaan johtaa siihen, että siipien kärjet ylettyvät yhä ylemmäs. Toisaalta kuitenkin jäätymisriski kasvaa korkeuden kasvaessa, jolloin maantieteellinen alue, jolla jäätyminen on ongelma, laajenee. Porin tuulipuistossa on kahdeksan kappaletta yhden megawatin tuulivoimalaa, näistä neljään asennettu jäänestojärjestelmät, sillä ne sijaitsevat lähellä tietä ja voisivat näin aiheuttaa turvallisuusriskin. Nämä olivat ensimmäiset ei-arktiselle alueelle asennetut jäänestojärjestelmät. Kahden talven aikana Porissa tehdyissä mittauksissa jäätymistä on esiintynyt 85m:n korkeudessa seitsemän kertaa useammin kuin 62 m:n korkeudessa (Marjaniemi et al., 2001).

5.9.2 Jäätymisen tunnistus

Jäätymisen tunnistaminen on tärkeää voimalan häiriöttömän toiminnan kannalta. Voimalan lapoihin kertynyt jää aiheuttaa tehon menetystä ja epätasapainoa voimalan lavoissa.

- Nykyisissä turbiineissa on erilaisia ääni- ja värinäsensoreita, joiden avulla valvotaan turbiinin osia, esimerkiksi tornia, roottorin lapoja ja generaattoria sekä niiden käyttäytymistä turbiinin tuottaessa sähköä. Sensoreiden havaitsemat signaalit kerätään ja analysoidaan tietokoneohjelmistojen avulla, ja lopulta saadaan tieto siitä, toimiiko turbiini oikein.

- Kun turbiini on asennettu ja testattu, valvontajärjestelmä ottaa ”sormenjäljen” normaalien olosuhteiden signaaleista
- Talvella turbiinit voivat kerätä pinnalleen jäätä kosteasta ilmasta. Ohutkin jääkerros muuttaa turbiinin ja sen lapojen värähtelyä, mikä valvontajärjestelmä havaitsee.
- Jos valvontajärjestelmä havaitsee jäätä lavoissa, turbiini pysähtyy automaattisesti ja jäänpoistojärjestelmä aktivoidaan
- Täydellisesti toimivaa tunnistusjärjestelmää ei vielä ole. Liian aikaisin päälle kytkeytyvä lapojen lämmitys tai liian pitkään päällä oleva lämmitys lisää energian kulutusta ja lyhentää lämmitysjärjestelmän käyttöikää. Liian myöhään päälle kytkeytyvä lämmitysjärjestelmä taas antaa mahdollisuuden melko kovalle jäänmuodostumiselle ja jään muodostuminen ehtii heikentämään turbiinin tuottoa.

5.9.3 Jäänesto ja jäänpoisto

Markkinoilla on kolmenlaisia jäänestojärjestelmiä

- kuumailmajäänpoistojärjestelmä puhaltaa kuumaa ilmaa onttoon lapaan lämmittäen lapamateriaalia. Järjestelmän on havaittu olevan jossain määrin herkkä vikaantumiselle, eikä se toimi voimalan ollessa käynnissä.
- foliopinnoite on tekniikka, jota hyödynnetään myös lentokoneissa. Sähkövirta lämmittää folion, joka sulattaa jään lavan pinnalta.
- sähkövirtaa johtava kerros lavan sisäpuolella on edistyksellisin jäänestomenetelmä. Menetelmän etuna on, että se ei ole suoraan alttiina sääolosuhteille: hienorakenteinen kolmiulotteinen verkosto rakennetaan komposiittimateriaalista koostuvaan lapaan. Älykkäät ohjaimet lähettävät sähköä vaihtelevilla taajuuksilla verkoston kautta lavan eri osiin sulattamaan jäätä siellä, missä sitä on. Järjestelmä voi toimia myös voimalan normaalin operoinnin aikana.

Jäänpoistoon käytetään yleisimmin tuulivoimalan lapojen lämmitystä. Menetelminä on joko siipeen laminoidut lämmityselementit tai lämpimän ilman puhallus lavan sisälle. Mikäli jäänmuodostuminen on tapahtunut voimalan ollessa seisahduksissa, olisi hyvä saada jää sulatettua ennen voimalan käynnistymistä, jolloin vältetään pyörivien lapojen aiheuttamalta jään sinkoutumiselta jopa parinsadan metrin päähän voimalasta.

Hydrofobinen päällyste roottorin lavoissa vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti jää voi tarttua lavan pintamateriaaliin. Asiaa tutkitaan intensiivisesti, mutta lavan pinnoituksen täytyy täyttää muitakin vaatimuksia esimerkiksi heijastavuuden ja tutkanäkyvyyden suhteen.

6 MENETELMÄT TARKASTUSTEN JA KORJAUSTEN SUORITTAMISEEN

Vertailtaessa käytännössä eri työtapoja pitäisi huomioida työtunnin hinnan lisäksi myös huoltoseisokin aiheuttamat tuotannon menetykset. Henkilönostimen kanssa toimiessa saadaan voimala tuotantokäyttöön silloin, kun varsinaista huolto- ja korjaustoimintaa ei tapahdu. Eli jos työ vaatii useampia päiviä, voidaan voimalaa pitää tuotannossa silloin, kun korjaustoimintaa ei ole, esimerkiksi öisin. Muissa korjausmenetelmissä tarvittavien kiinnitysten ja nostoköysien tai vaijerien poistaminen silloin, kun korjaustoimintaa ei tapahdu, on työlästä ja aikaa vievää ja käytännössä voimala seisookin kunnes korjaus- ja huoltotoimet on saatu kokonaisuudessaan tehtyä.

6.1 Tarkastus näkö- ja kuulohavainnoin

Voimalan lapojen tarkastaminen näkö- ja kuulohavainnoin on ylivoimaisesti edullisin tarkastusmenetelmä, tämän voi tehdä jokaisen voimalakäynnin yhteydessä. Mikäli yhden lavan ääni eroaa selkeästi kahdesta muusta, suoritetaan perusteellisempi tarkistus. Kyseessä voi olla kärkivaurio, siipijarrun luukku auki, iso pintavaurio tai vaikkapa voimakkaan salamaniskun jälki ääntä aiheuttamassa. Vähän paremman kuvan saa kun katsoo lapaa systemaattisesti voimalan katolta. Hyvä optiikka sekä harjaantunut silmä auttavat löytämään vähän pienemmätkin vauriot. Siipien kuvaaminen voimalan ollessa toiminnassa vaatii ammattilaistasoa olevaa kalustoa, kun lavan kärjen nopeus saattaa olla lähempänä 120 m/s. Silmien pitäminen auki auttaa löytämään viat ”sattumalta”. Mikäli huolto-ohjelman ”Tarkista voimalan lavat” -kohta on hoidettu pelkästään visuaalisella tarkastuksella, ensimmäiset viisikin vuotta tuovat melkoisella varmuudella jonkin suuruisen lapavaurion. Lisäksi visuaalisessa tarkastuksessa havaitun vaurion paikallistaminen on hankalaa ja jatkoseuranta erittäin vaikeaa. Siksi huolto-ohjelmassa olisi syytä olla mielellään vuosittainen voimalan pysäyttäminen ja siipien tarkastaminen esim. henkilönostimen avulla.

Hyvät puolet:

- edullinen
- helppo toteuttaa ilman ennakkosuunnittelua
- voidaan suorittaa aina sopivan hetken olleessa käsillä

Huonot puolet

- pienet pintavauriot jäävät huomaamatta
- saattaa antaa väärän kuvan siiven todellisesta kunnosta

6.2 Köysilaskeutuminen

Useat kiipeilykouluttajat tarjoavat turvallisia köysityöskentelymenetelmiä. Kiipeilytekniikasta johdetut tuulivoimalatyöskentelytavat mahdollistavat pääsyn lähes jokaiseen lavan kohtaan suhteellisen pienillä kustannuksilla. Rajoitteina ovat tuuli (tyypillisesti enintään n. 6 m/s), kylmät olosuhteet sekä mukana kuljetettavan laitteiston ja työvälineiden rajallinen määrä. Köysilaskeutumisessa suunta on aina alaspäin eli aikaa kuluu työskentelyn lisäksi myös siirtymisiin. Tyypillisesti alastulon jälkeen kuluu vähintäänkin puoli tuntia ennen kuin työskentelyä pystyy jatkamaan samassa kohtaa tai sen vieressä. Tämän voi tietenkin rytmittää työvaiheiden mukaan, mutta ”hukka-ajan osuus” on silti melko suuri. Leikkaavien työkalujen ja kemikaalien vaikutuksen välttäminen kantaviin köysiin ovat tärkeä osa turvallista työn suunnittelua.

Hyvät puolet:

- edullisuus, työtunnin hinta n. 50€/h
- saapuminen korjausalueelle nopeaa
- tällä hetkellä toinen varteenotettava mahdollisuus merelle perustettujen voimaloiden huoltoon ja tarkastukseen

Huonot puolet:

- huono hyötykuorma
- kiipeilyköysien kiinnittäminen ja niiden aiheuttamat jäljet, hankaumat ja vauriot siiville
- kiipeilijän aiheuttamat jäljet siipiin (esim. iskemät ja kenkien jäljet kun kiipeilijä pitää itseään erillään siivestä)
- hitaus, aina uusi kiipeilyköysien kiinnittäminen, kun vaihdetaan työstettävää siipeä
- hyvin herkkä keliolosuhteille
- työturvallisuuskysymykset ja – vastuut

6.3 Köysimopo

Mahdollisuus siirtyä sekä ylös- että alaspäin parantaa köysityöskentelyä huomattavasti. Ammatillaiset suosivat polttomoottorikäyttöisiä ”köysimopoja”, joskin sähköisetkin vinssit tarjoavat hyvän työskentelyalustan. Moottori kiinnitetään ”puosun tuoliin” josta löytyvät tyypillisesti pari ämpäriä kokoista kuljetuslokeroa työkaluille ja tarvikkeille. Osaava ammattilaistyöpari virittelee tarvittavat köydet ja siirtyy korjausalueelle melko nopeasti. Huonoina puolina voi pitää riippuvuutta olosuhteista, ammattilaisten korkeahkoa kustannusta sekä pientä mukana kulkevan tavaran määrää.

Yksi käsipari ei kovin monimutkaisia korjauksia tee ja monimutkaisempien laminointien tekeminen aiheuttaa haasteita, samoin alueen suojaaminen ja vaikkapa lämmittäminen.

Hyvät puolet:

- edullisuus
- liikkuvuus parempi kuin köysilaskeutumisessa
- saapuminen korjausalueelle nopeaa
- tällä hetkellä paras mahdollisuus offshore-voimaloiden huoltotoimintaan

Huonot puolet

- vain yksi työntekijä
- huono hyötykuorma
- pelkästään laskeutumisköydellä toimivaan korjaajaan verrattuna suurempi rasitus kiinnityskohtiin
- kiipeilyköysien kiinnittäminen ja niiden aiheuttamat jäljet, hankaumat ja vauriot siiville
- kiipeilijän aiheuttamat jäljet siipiin (esim. iskemät ja kenkien jäljet kun kiipeilijä pitää itseään erillään siivestä)
- hitaus. aina uusi köysien kiinnittäminen, kun vaihdetaan työstettävää siipeä
- työturvallisuuskysymykset ja - vastuut



Kuva 10: Kuvassa huoltomies nousemassa köysimopolla (kuva Airice, Feodor Gurvits)

6.4 Huoltotaso

Rakennusteollisuudesta tutut huoltotasot ovat löytäneet tiensä myös tuuli-voimaloihin. Kantovaijereihin ripustetaan hissimoottorein varustettu ”parveke”, jolla ajetaan tornia vasten nojaten haluttuun kohtaan. Hyötykuorma on iso, operointi helppoa (käytännössä ”hissipoika” on yksi tarkastajista/korjaajista), alusta on erittäin stabiili, sen pystyy kääntämään edulliseen suuntaan tuulen mukaan ja yhdellä kerralla voi lähestyä lapaa kummaltakin puolelta. Taso tuodaan suoraan voimalan alle perävaunulla, alhaalla oleva aggregaatti tuottaa tarvittavan sähkön ja useilla voimalavalmistajilla on tarvittavat vaijereiden kiinnityskohdat valmiina nasellissaan. Tämä on varteenotettava vaihtoehto sen järeyden (työkalujen ja tarvikkeiden kantokyky), edullisen hinnan sekä helpon käytettävyyden vuoksi. Suomen hankalat vuodenajat suosivat pressuteltojen käyttöä ja tietyissä tilanteissa on eduksi, jos samaan kohtaan saada kolmekin käsiparia hyvillä työkaluilla.

Hyvät puolet:

- kohteen korkeus ei rajoita käyttöä, kuten mahdollisesti henkilönsäntimissä
- vakaus
- erinomainen hyötykuorma
- ratkaisun edullisuus
- mahdollisuus offshore toimintaan
- telineen aiheuttamat iskut siipiin epätodennäköisiä normaaleissa työskentelyolosuhteissa
- pystytään tekemään laadukasta työtä, johtuen hyvistä työskentelyolosuhteista

Huonot puolet:

- jättää jälkiä ja painumia torniin
- mikäli ei valmiita kiinnityspisteitä, niin nostovaijerien kiinnittäminen aiheuttaa jälkiä ja hankaumia siipiin. Vaijereita ei kiinnitetä suoraan

siipiin tai konehuoneeseen vaan käytetään nostoliinoja kiinnitysten tekemiseen

- henkilönostimeen verrattuna työn aloittaminen on hitaampaa, koska joudutaan menemään ylös tekemään nostinta varten tarvittavat kiinnitykset.



Kuva 11: Kuvassa huoltotaso (Gurvits F. Airice)

6.5 Henkilönostin

Kuorma-autoalustalle tehdyt henkilönostimet tarjoavat nopean pääsyn aika korkealle (käytännössä n. 100 metriin saakka). Voimalan edustalle asettuvan auton kuljettaja jatkaa ohjaajana samalla kuin yksi tai kaksi asentajaa pääsee työkohteeseen. Korin mukana saadaan ylös tarvittaessa sähköä sekä paineilmaa. Hyötykuormaa mahtuu mukaan parinsadan kilon verran, ulottuma sekä kuljettajan oma paino vaikuttavat siihen. Henkilönostinta tilattaessa mobilisointikustannus, työtunnin hinta sekä mahdolliset odotuskustannukset ovat merkittävässä roolissa. Lisähaasteita tulee puuskaisessa tuulessa, voimalaa ei pysty kääntämään kovinkaan paljoa ja etenkin sivutuuli on hankala, ohjaaja joutuu koko ajan pitämään tason riittävän kaukana lavan pinnasta osuman välttämiseksi.



Kuva 12: Kuvassa miehet puhdistamassa tuulivoimalan lapaa nostokorista käsin

Hyvät puolet:

- vakaus
- erinomainen hyötykuorma (500 – 700 kg)
- työturvallisuus hyvin huomioitu
- voimalan seisonta-aika lyhyin vaihtoehdoista
- sallii voimalan käyttämisen, kun ei työskennellä, esimerkiksi öisin
- telineen aiheuttamat iskut lapoihin epätodennäköisiä normaaleissa työskentelyolosuhteissa
- pystytään tekemään laadukasta työtä, johtuen hyvistä työskentelyolosuhteista
- elää tulessa samassa taajuudessa generaattorin lavan kanssa

Huonot puolet:

- osuessa siipeen jättää jälkiä ja painumia
- voimaloiden kasvaessa kohteen korkeus tulevaisuudessa saattaa rajoittaa työskentelyä.
- kallein vaihtoehto
- kaluston rajallinen saatavuus

6.6 Korjaaminen lavan sisältä käsin

Isot rakennevauriot, jäykisteiden korjaukset sekä salamasuojausten vaurioiden paikkailu on parempi tehdä sisältä käsin. Lapojen salamaniskuojausten kaapeli tai kaapelit kulkevat lavan sisäpuolella ja niiden eheyttä ei pysty edes ulkopuolelta tarkastamaan, muuten kuin mittaamalla virran johtuvuutta siiven kärjessä olevasta nastasta naselliin. Ukkosenjohdinten ollessa poikki esimerkiksi salamaniskun vaurioittamana, on mentävä lavan sisälle etsimään vauriokohta. Tuolloin lapa lukitaan vaakatasoon ja korjaajat siirtyvät tarvikkeineen sisäkautta työkohtaansa. Ongelmat liittyvät kulkemiseen, reitin ahtauteen, sekä isojen korjausten ilmanvaihtoon ja pölynpoistoon. Reitti on yllättävän pitkä ja työläs, kun joudutaan työkalujen kanssa kulkemaan konehuoneen läpi ja vaihdelaatikon ohi lavalle (yleensä

pölyimuri jää kiinni viimeistään navan spinneriin mentäessä). Lavan ollessa pahoin vaurioitunut nousevat työsuojeluriskit korkeiksi lavan mahdollisen murtumisvaaran vuoksi.

6.7 Lavan irrottaminen ja laskeminen maahan korjausta varten

Lavan irrottaminen ja laskeminen maahan korjausta varten on ylivoimaisesti kallein vaihtoehto. Kustannusarvio voimalan koosta riippuen on noin 30 000€ - 100 000€. Vahingoittunut lapa nostetaan yleensä yhdellä isolla nosturilla, jossa on tarkoitusta varten suunniteltu nostoteline. Nostotelineessä on tuenta lavalle useammassa kohdassa. Korjausta varten lapa irrotetaan navasta ja lasketaan maahan. Tarvittavat korjaukset tehdään maassa varta vasten rakennetussa teltassa. Joissain tapauksissa uusi lapa nostetaan tilalle ja vanha kuljetetaan korjattavaksi sopivaan paikkaan. Lavan laskemisen jälkeen korjaukset voidaan tehdä optimiolosuhteissa. Lapojen irrottaminen, nostaminen ja kuljettaminen tekevät tästä kuitenkin erittäin kalliin, mutta joskus välttämättömän vaihtoehdon. (Gurvits F, 2012)

7 EOW TARKASTUS

EOW eli takuuajan umpeutuminen on tärkeä merkkipaalu, jolloin tuulivoimalan operaattorin on syytä teettää mahdollisimman perinpohjainen tarkastus voimalalleen. Huomioitavaa on, että takuuehdoissa usein määritellään, miten paljon ennen takuuajan päättymistä on reklamoitava takuuseen menevistä vioista. On tiedettävä, mitä on sovittu takuusta ja mitä se kattaa ja tarkastettava kaikki kohteet, minkä takuu kattaa. Mikäli tarkastuksessa löytyy huomautettavaa voimalan kunnossa sellaisissa kohteissa, jotka kuuluvat takuun piiriin, on asiasta reklamoitava voimalan toimittajalle viipymättä. Tärkeää tarkastuksen yhteydessä on, että sen tekee luotettava ammattitaitoinen toimija, joka osaa myös dokumentoida havaitut ongelmat oikealla tavalla, jotta takuussa mahdollisesti olevat ehdot täyttyvät. Tuuliturbiinin lapojen EOW tarkastuksen tulisi pitää sisällään ulkoisen ja sisäisen lapojen tarkastuksen.

Tarkastuksessa tulee kiinnittää huomiota lavan ulkoiseen laminointiin, pinnoitteeseen, liitoskohtiin lavan juuressa, johtoreunan suojaukseen ja LPS-suojaukseen (lightning protection system). LPS:n johtavuus olisi syytä tarkistaa muutenkin 2 – 4 vuoden välein, jotta vältetään kallisarvoisilta korjauksilta joita mahdollinen salamanisku aiheuttaa suojaamattomalle turbiinille.

Samalla, kun lavan salamaniskusuojaus tarkistetaan, on hyvä tarkistaa lavan kärjessä olevat valuma-aukot. Varmistettaessa veden ja kosteuden poistuminen lavasta, vältetään roottorin epätasapainolta, joka taas voi johtaa vaihteiston tai generaattorin vaurioitumiseen.

8 MAALLA OLEVIENT VOIMALOIDEN LUOKSE PÄÄSTÄVYYS

Suomessa maalla oleville voimaloille on helppo päästä. Jo rakennusvaiheessa on rakennettu voimaloille ja niiden ympärille hyvät tiet ja kentät, jotka kestävät erittäin raskaan kaluston siirtelyn ja käyttämisen voimalan läheisyydessä. Suurimmat henkilönostimet painavat alle 70 tonnia, joka ei ole ongelma näille teille. Henkilönostinta varten ei myöskään tarvitse perustaa erillistä tuentaa, vaan tuenta onnistuu nostimen omilla jaloilla. Valitettavasti helppo lähestyttävyyden tuo voimaloiden läheisyyteen myös ei toivottuja vierailijoita. Voimaloiden siivistä on löydetty jälkiä vahingoittamisesta mm. erilaisilla aseilla.

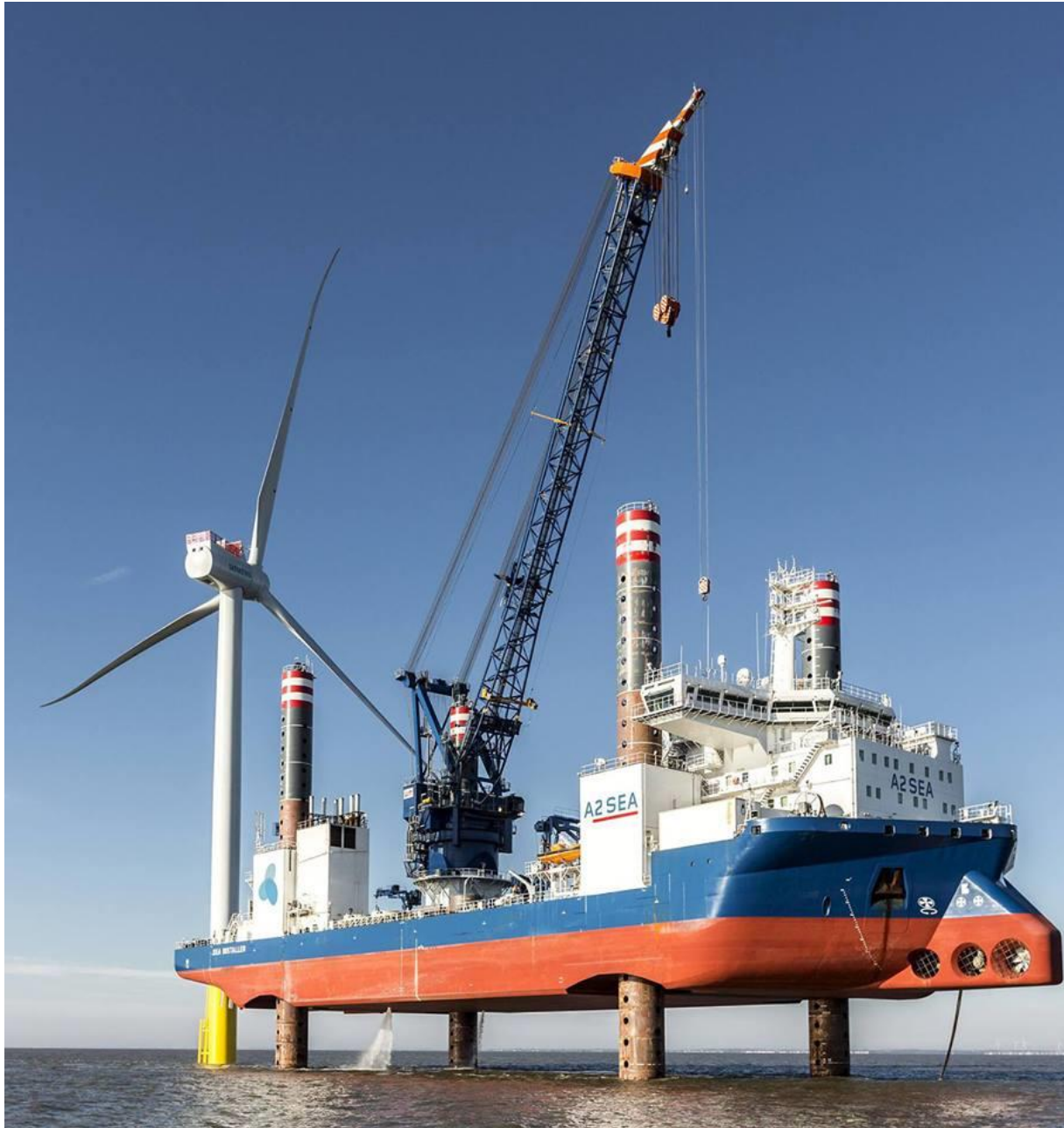


Kuva 13: Kuvassa nostokoriauto seisoo tuettuna omilla jaloilla tuulivoimalan edessä (Kuva Bladefence)

9 MERELLÄ OLEVIENTEN VOIMALOIDEN LUOKSE PÄÄSTÄVYYS

Merellä olevien voimaloiden luokse päästään erilaisilla vesikulkuneuvoilla, joita ovat vene, hinaaja tai proomu. Mikäli halutaan tukeva työskentelyalusta henkilönostimelle, täytyy proomussa tai aluksessa olla erilliset merenpohjaan laskettavat jalat, joilla alus voidaan nostaa vedenpinnan yläpuolelle. Tällaista alusta kutsutaan jack-up proomuksi tai alukseksi. Nostamalla alus irti veden pinnasta saavutetaan optimaalinen vakaus jolloin voidaan suorittaa vaativiakin nosto-operaatioita aallokon häiritsemättä.

Merellä olevissa kohteissa voidaan käyttää myös DP-järjestelmällä varustettuja aluksia. Dynamic positioning (DP) on tietokoneohjattu järjestelmä aluksen pitämiseen paikallaan ja suunnassaan. Järjestelmä käyttää aluksen paikallaan pitämiseen aluksen omia potkureita ja ohjailupotkureita. Tietoa aluksen liikkeistä antavat erilaiset tuuli- ja liiketietoa tuottavat sensorit. DP-järjestelmällä varustetut alukset eivät kuitenkaan sovellu henkilönostimilta tapahtuville korjaustöille, koska ne ovat alttiita aallokelle. Aallokko aiheuttaisi nostokorin huomattavaa liikkumista työskentelykorkeudessa. Suomessa merelle perustettavia voimaloita ollaan vasta suunnittelemassa. Tällä hetkellä toiminnassa on vain yksi Porin Tahkoluodon edustalla. Myös merelle perustettavassa voimalassa pitää ottaa huomioon luokse päästävyys. Matalaan veteen perustettavan voimalan perustamiskustannukset ovat halvemmat kuin syvään veteen perustetun. Liian matalaan veteen perustetun voimalan ongelmaksi muodostuu luokse päästävyys. Alusten operoinnin kannalta ihanteellista olisi, jos voimalan ympärillä veden syvyys olisi viisi metriä tai enemmän.



Kuva 14: Kuvassa tuulivoimaloiden asennukseen ja huoltoon suunniteltu jack-up alus

10 KORJAUSMATERIAALIT JA MENETELMÄT

Tuulivoimaloiden lapojen valmistajat suosivat omissa standardeissaan korjausmenetelmäksi märkälaminointia, jossa lasikuitumattoa ja hartsia levitetään korjattavaan kohteeseen. Tämä vaatisi kuitenkin hyvin ihanteelliset olot lämpötilan ja kosteuden suhteen. Lisäksi kuivumisajat ovat huomattavan pitkiä. Varsinkin takuuajana tämä on huomattava ongelma, kun lähes aina korjaus vaatisi lavan laskemista maahan ja korjaamista tilassa, jonne saadaan aikaiseksi ihanneolosuhteet. Tällainen korjaus on hyvin kallista ja onkin kehitetty huomattavasti järkevämpiä menetelmiä korjausten suorittamiseen ilman, että lapoja tarvitsee irrottaa.

Toistaiseksi tuulivoimatuotannon standardit poikkeavat lentoteollisuudesta olennaisesti. Lentoteollisuudessa jokaiseen työvaiheeseen on ohjeet ja standardit. Tuulivoimaloiden lapojen valmistajat eivät välttämättä ole ottaneet huomioon omissa toimintaohjeissaan sitä, minkälaisissa olosuhteissa voimaloiden lapoja joudutaan todellisuudessa korjaamaan. Takuuajan jälkeen tuulivoimalan operaattoria ei enää sido valmistajan standardit, mutta sen sijaan taloudelliset näkökulmat. Korjaukset pitäisi suorittaa mahdollisimman hyvin ja kestävästi, mutta niin, että voimalan tuotanto pysähtyy mahdollisimman lyhyeksi aikaa.

Matalat lämpötilat ja väärä ilmankosteus rajoittavat potentiaalista vuoden- ja vuorokaudenaikaa, jolloin korjauksia voidaan tehdä vanhoilla menetelmillä. Mikäli korjausta vauhditetaan käyttämällä nopeampia kovetteita, myös työskentelyaika lyhenee hartsin kuivuessa käyttökelvottomaksi liian nopeasti. Tällöin vaarantuu myös korjauksen laatu, jos hartsi ei ehdi imeytyä riittävän hyvin lasikuitukankaaseen. Kaksikomponenttihartsin sekoituslämpötilan tulee olla yli 15 C, jotta saadaan laadukas hartsi. Lämpöpeitteitä tai ultravioletti lämmittämiä voidaan käyttää lämpötilan saamiseksi lähemmäksi optimaalista. Tästä huolimatta pitää käytettyjen materiaalien pysyä liikkumattomina seuraavat 24 tuntia Germanischer Lloydin antamien korjausten laatua käsittelevien vaatimusten mukaan.

Perinteisten laminointimenetelmien rajoitukset korjauksissa ovat lisänneet kiinnostusta modernien korjausmateriaalien ja menetelmien käyttöön. UV-kovetteiset hartsit kuivuvat minuuteissa, eivätkä ole niin riippuvaisia lämpötiloista. Ultraviolettilon käyttäminen maalin, musteen tai hartsin kovettamiseen ei ole uusi keksintö. Eräältä valmistajalta (RENUVO) löytyy kahta erilaista hartsilaatua. Kesälaadun käyttölämpötila on +15C - +30C ja talvilaatu toimii +5C - +18C lämpötilassa. Näin saavutetaan perinteiseen menetelmään verrattuna käytettävyyttä kymmenen astetta kylmemmässä lämpötilassa, kuin mihin on totuttu. (Wood K, 2011)

11 TYÖTURVALLISUUS

Työskentely tuulivoimalan ulkopuolella on turvallisuuskohdasta rinnastettavissa työskentelyyn suurissa rakennustyökohteissa, joissa joudutaan työskentelemään korkeissa paikoissa. Työntekijän tulee olla normaalisti terveydellä varustettu henkilö. Alan ollessa vielä varsin nuori eivät työturvallisuusstandardit ole hioutuneet lopulliseen muotoonsa. Turvallisuuden valvonta on hyvin pitkälle työn tilaajan vastuulla. Turvallisuutta valvottaessa on kiinnitettävä huomiota mm.

- Tuuli ja sääolosuhteisiin. Tuulirajat on sovittava ennen työn aloittamista.
- Suojautumiseen ja suojaamiseen tippuvilta työkaluilta ja osilta
- Tuulivoimalan lavat tulee olla työskentelyn aikana pysäytetty mekaanisesti (ei vain jarrun varassa)
- Jännitteisten työkohteiden kanssa työskentelevillä on oltava työturvallisuuskortti ja SFS 6002 standardin mukainen koulutus
- Kaikkien, jotka osallistuvat huoltotöihin, on oltava tietoisia työn riskeistä ja sitouduttava riskien torjumiseen
- Varmistetaan esimerkiksi toiminnan auditoinnilla sopimustoimittajan riittävä ammattitaito ja perehdytys oman ja toisten työsuorituksen turvallisuuden takaamiseksi
- Veden päällä työskentelyssä tulee huomioida myös mahdolliset veden putoamisen riskit, jolloin työntekijöillä on oltava kelluntavälineistö.

Merelle rakennetut ns. offshore voimalat tuovat omat vaatimuksensa työturvallisuudelle. Aluksilla on varustamoista riippuen omat turvallisuusstandardit, joita on noudatettava. Työntekijöiltä saatetaan vaatia erilaisia turvallisuuskoulutuksia, joita ei maapuolella välttämättä tunneta. Näihin vaatimuksiin on hyvä tutustua varustamon edustajan kanssa ennen kuin vuokrataan alus miehistöineen. Toisaalta merenkulussa jo yleisesti käytössä olevasta turvallisuusjohtamisesta voitaisiin ja tultaneenkin ottamaan oppia

tuulivoimaloiden huolloissa. Työn tilaajan on helpompi valvoa turvallisuutta, kun huoltotöihin erikoistuneilla yrityksillä on oma standardoitu turvallisuusjohtamistapa, josta selviää kunkin työn turvallisuusvaatimukset. Esimerkiksi käy vaikkapa turvaköysien paksuus ja ikä. Turvaköysien tai kiipeilyköysien vaadittavan paksuuden ollessa tiedossa ja sertifioituna on työn tilaajan helpompi tarkistaa, että työ suoritetaan turvallisilla varusteilla.

12 MYYTTI TAKUUAJASTA

Siipien toimittaja myöntää siiville tietyn takuuajan, jonka aikana havaitut valmistusvirheet joko korjataan tai korvataan. Takuu aika ei kuitenkaan yleensä pidä sisällä siipien huoltoa tai varsinaisia tarkistuksia ja nämä jäävätkin tilaajan vastuulle. On olemassa esimerkkejä, joissa edes tyyppivikoja ei ole korvattu, koska tilaaja ei ole havainnut takuuajana vikoja siivissä. Tarkistukset takuuajana ovatkin ensiarvoisen tärkeitä ja niiden katsotaan juridisesti kuuluvan tilaajavastuun piiriin.

Uusia turbiinityyppejä tuotiin markkinoille ja myytiin suuria määriä ilman, että niitä oli testattu tarpeeksi. Tämän seurauksena tekninen luotettavuus kärsi. Luotettavuuden ja laadun varmistamiseksi alettiin vaatia pitkiä takuuajoja. Pitkät takuuajat eivät kumminkaan ole välttämättä taetta laadusta, vaan luotettavuus paranee ymmärtämällä toimintaolosuhteet ja sitä kautta kehittämällä teknologiaa ja huolto- sekä kunnossapitostrategioita. Luotettavuuden takaa keskeisten komponenttien ja järjestelmien pitkä todistettu käyttöhistoria ja sen mukana omaksutut opit ja tehdyt parannukset.

Päällimmäisenä keskusteluaiheena maailmalla tänä päivänä on tuulivoiman kilpailukyky sähköntuotantomuotona. Vaikuttavia tekijöitä kilpailukykyyn ovat kustannuspuolella investointi-, rahoitus- ja käyttökustannukset ja tuottopuolella tuuliolosuhteet, sähköstä saatava hinta ja turbiinin koko sekä luotettavuus. Viime vuonna yli 70 % kaikesta uudesta asennetusta sähköntuotantokapasiteetista Euroopassa oli uusiutuvaa, josta lähes puolet tuulivoimaa. Kun uudesta kapasiteetista yli kolmannes on tuulivoimaa, täytyy myös sen toimivuus olla korkealla tasolla, jotta sähköjärjestelmän luotettavuus voidaan turvata. Siksi turbiinien ja puistojen luotettavuuden merkitystä ei saa aliarvioida.

13 SILMÄYS TULEVAISUUTEEN

Suurimpien tuulivoimaloiden teho on nykyisin viisi megawattia ja roottorin halkaisija lähes 120 metriä. Yhteiseurooppalaisella pitkäjänteisellä kehitystyöllä pyritään nostamaan avomerellä käytettävien tuulivoimaloiden sähköteho jopa 20 megawattiin

Tuulivoimaloiden koko näyttää kasvavan edelleen. 26 päivä heinäkuuta 2013 aloitti matkansa tällä hetkellä suurimman merelle rakennettavan voimalan lavat Kirkebystä kohti Fife energiapuistoa Methilissä. Lapojen pituus on 83,5 metriä ja halkaisija tyvessä 4,2 metriä. Tämä Samsungin 7 megawatin voimala tulee olemaan siipien halkaisijaltaan 171,2 metriä. Tuulivoimaloiden koon kasvattaminen on ymmärrettävää, kun saadaan lisää tehoa, eikä tarvitse tehdä niin useita perustuksia. Lapojen koon kasvaessa ja voimaloiden noustessa yhä korkeammalle kasvavat haasteet voimaloiden lapojen huolloissa ja korjauksissa.

Tällä hetkellä maailmalla on käynnissä lukuisia tutkimusprojekteja voimaloiden lapojen pinnoitukseen erilaisilla materiaaleilla, joita ovat muun muassa nanomateriaalit. Tarkoituksena on saavuttaa lavat, jotka pysyvät pidempään puhtaina ja huoltovapaina. Lisäksi tutkimuksen alla on tuulivoimalan lavat, jotka korjaavat itse itseään. Käytännössä erilaiset materiaalit, jotka ovat lapojen pinnoitteiden alla toimivat siten, että lavan pinnoitteeseen ilmestyessä halkeamia aineet aktivoituvat ja nousevat kohti halkeamia paikaten ne.

Lapojen kestävyyttä parannetaan myös kehittämällä niin sanottua aktiivista muodonhallintaa. Lapojen muoto muuttuu tuulen voiman muuttuessa tai lavan pyörähtäessä tornin ohi.

Aktiivinen muodonhallinta nostaa tuulivoimaloiden tehoa, koska lapojen nostovoima voidaan pitää vakiona suurillakin tuulennopeuksilla ja siten rajoittaa lapoihin kohdistuvia värähtelyrasituksia. Näin tuulivoimalaa voi-

daan käyttää nykyistä kovemmillä tuulilla ja saadaan lisättyä vuotuista käyttöaikaa ja voimaloiden tuottoa.

Nykyisin tuulivoimaloita lepuutetaan kovimmilla tuulilla, koska niiden rakenne ei kestäisi niihin kohdistuvia rasituksia.

Tuulivoimalan lavan muodonmuutos saadaan aikaan asentamalla siihen niin sanottuja muistimetallilankoja. Kun muistimetallilankojen lämpötila nostetaan sähkövirran avulla noin 60 asteeseen, muistimetalli muuttaa tuulivoimalan lavan halutun muotoiseksi.

Pyrkimys tuulivoimalan lapojen kasvattamiseen on saanut aikaiseksi lukuisia kehitysprojekteja erilaisten valmistusmateriaalien testaamiseksi. Tuulivoimalan lavoille on asetettu kovat tavoitteet tulevaisuudessa. Lapojen tulisi olla pidempiä, tehokkaampia ja pysyä käyttökunnossa niille asetetun 20 - 25 käyttövuoden tavoitteen ajan. Tämän lisäksi lapojen tulisi mielellään olla vielä huoltovapaita ja iskunkestäviä.

14 YHTEENVETO

Tilaaajan velvollisuudet ja oikeudet on syytä muistaa. Komponenteille kannattaa hankkia luotettava tarkastaja jo siinä vaiheessa kun komponentit saapuvat maahan. Tuulivoimalan lavat on tärkeä ja kallis komponentti, joka ei suinkaan ole huoltovapaa.

Käyttöönottotarkastus on syytä tehdä siipien ollessa asennettuina paikoilleen, jolloin voidaan havaita mahdolliset nostojen aiheuttamat vauriot. Havaittuihin vaurioihin on suhtauduttava vakavasti. Pienetkin vauriot saattavat tuoda ajan kuluessa huomattavia kustannuksia, jos niitä ei huomata ja korjata ajoissa. Lavoista on pidettävä huolta alusta alkaen.

Turvallisuutta ei voi liioitella. Alusta alkaen kannattaa pitää huolta että turvallisuuskulttuuri on kaikin puolin kunnossa. Voimaloiden lapojen huollossa käytetään yleisesti ulkopuolisia alihankkijoita ja tilaaajan kannattaa tuntee myös näiden yritysten toimintatavat. Luotettava yhteistyökumppani vähentää työtaturmien mahdollisuutta tai vääristä työtavoista johtuvia lapojen vahingoittumisia.

Luotettavien yhteistyökumppaneiden käyttö voimaloiden kunnossapidossa on ensiarvoisen tärkeää. Yhteinen toimintahistoria saattaa pidemmällä aikavälillä säästää selvää rahaa. Huoltoyritys, joka antaa toiminnalleen takuun ja käyttää standardoituja korjausmenetelmiä, auttaa pitämään tuulivoimalan lavat käyttökuntoisina niille suunnitellun 20 – 25 vuoden elinkaaren ajan.

Tämän lopputyön tarkoituksena oli tuoda lisää tietoa helposti ymmärrettävässä muodossa tuulivoimaloiden lavoista niiden operaattoreille ja omistajille. Lisäksi syntyi suositus tuulivoimaloiden lavoille tehtävien tarkastusten aikataulusta.

Taulukko 3: Tuulivoimalan lavoille tehtävien tarkastusten aikataulu

Maahantulotarkistus suoritetaan voimalan lapojen saapuessa maahan. Tarkistetaan mahdolliset merikuljetuksessa syntyneet vauriot ja nostovauriot.

Kuljetustarkistus suoritetaan lapojen saapuessa voimalan juurelle. Tarkistetaan mahdolliset maakuljetuksen aikana syntyneet vauriot.

Käyttöönottotarkistus suoritetaan ennen voimalan ottamista käyttöön. Tarkistetaan mahdolliset nostossa ja asennuksessa syntyneet vauriot.

Ensimmäisten viiden vuoden aikana suoritetaan käytön aikaisia tarkastuksia, joissa havainnoidaan likaantumista ja vikaantumista

Ensimmäisten viiden vuoden aikana suoritetaan lapojen puhdistus ja perusteellisempi tarkastus. Korjataan pintavauriot ja tarkistetaan johtoreunan eroosio.

Ennen takuuajan päättymistä suoritetaan tarkastus ja reklamoidaan mahdollisesti havaitut ongelmat.

Ennen huoltosopimuksen päättymistä suoritetaan tarkastus ja reklamoidaan mahdollisesti havaitut ongelmat.

Takuiden ja huoltosopimusten päätyttyä tehdään tarkastukset ja huollot taloudellisten näkökulmien perusteella, eli pyritään säilyttämään generaattorin lavat mahdollisimman tuottavina käyttöihin loppuun. Aikataulu mukautetaan jo saatujen kokemusten perusteella.

LÄHDELUETTELO

Julkaisut:

Anon1 (2012) Windenergy Handbook- 2- (2012) Aerodynamics and Loads, saatavilla <http://www.gurit.com/wind-energy-handbook-1.aspx> , [viitattu 4.5.2013]

Anon2 (2012) Windenergy Handbook- 6- (2012) Comparative Cost Study of a 35m Wind Turbine Blade using Infusion and Prepreg Materials Technology Blade Cost Analysis: Prepreg vs Infusion Material Technology, saatavilla <http://www.gurit.com/wind-energy-handbook-1.aspx> [viitattu 4.5.2013]

Corten P. Veldkamp H. (2001) Insects can halve wind-turbine power NATURE | VOL 412 | 5 July 2001 | www.nature.com (s. 42 – 43)

Gurvits F. (2012) Tuulienergia lehti 03/12 ISSN 1798-4297 (s. 12-13)

Hopson C. (2013) Blades lead US insurance claims. recharge news <http://www.rechargenews.com/wind/americas/article1334208.ece> [viitattu 15.09.2013]

IFC International Finance Corporation Environmental (2007), Health, and Safety Guidelines WIND ENERGY April 30 2007

Jones F. & Williams D. (2012) Offshore wind in Finland:

worth a closer look? Tuulienergia lehti 03/2012 (s. 6-8)

Kanaby G. (2006) Economic Benefits of Scheduled Rotor Maintenance
October 4, 2006

Lund Peter & Paatero Jukka (2002) Teknillisen korkeakoulun teknillisen
fysiikan julkaisuja, Espoo 2003 TKK-F-B194 KEHITTYNYT TUULIVOIMA-
TEKNOLOGIA. Tfy-56.173 Ydin- ja energiatekniikan erikoiskurssi I, syksy
2002

Mikkonen A et. al (2013) Mitä suomalaiset ajattelevat tuulivoimasta 15 Ju-
ne, 2013 Kyselytutkimus

Marjaniemi, M., Laakso, T., Makkonen, L ja Wright, J.(2001) Results of
Pori Wind Farm Measurements. VTT Energy Reports 42/2001, 2001. VTT
Energy, Espoo, Finland. ISSN 1457-3350.

Peltonen K. (2013) Siivet jäätyvät - tuulivoimalat ongelmassa sään ta-
kia,saatavilla

<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/siivet+jaatyvat++tuulivoimalat+ongelmissa+saan+takia/a876914> [viitattu 10.10.2013]

Skorczewski J. (2013) Analysis of a hydrophobic coating as passive anti-
ice solution for wind turbines, Bachelor's thesis 2013

Syöttötariffiryhmän väliraportti (2009), Saatavilla
http://www.tem.fi/files/24646/Sy_tt_tariffiryhm_n_v_liraportti_liite_1.pdf
[viitattu 7.8.2013]

Walsh M. (2010) Accretion and Removal of Wind Turbine Icing in Polar Conditions

Wood K (2011) Compositesworld Wind blade repair: Safety and quality 4/1/2011. saatavilla <http://www.compositesworld.com/articles/wind-blade-repair-safety-and-quality> [viitattu 13.6.2013]

Wraith C. (2012) The Value of Rotor Blade End of Warranty Inspections

HAASTATTELUT & KOKOUKSET:

Cursor Renewtech kokous Kotka 19.06.2013

Haastattelu Toimitusjohtaja Bladefence Vantaa tiistai 28.05.2013 (Tuulivoimaloiden huolto)

Kysely Toimitusjohtaja Feodor Gurvits Airice tiistai 11.06.2013 (Tuulivoimaloiden huolto)

Haastattelu Toimitusjohtaja Jouni Valtonen Lappeenranta torstai 02.05.2013 (Tuulivoimaloiden värinän mittaus)

Haastattelu Toimitusjohtaja Vesa Pirttilä Kotkan Energia maanantai 30.09.2013 (Tuulivoimaloiden EOW-tarkastus ja huoltosopimukset)

INTERNETSIVUT:

Suomen tuulivoimayhdistys ry Tuulivoimaloiden rakenne saatavilla
<http://www.tuulivoimatieto.fi/rakenne> [Viitattu 27.8.2013]

Compositeworld Wind blade repair: Safety and quality saatavilla
<http://www.compositesworld.com/articles/wind-blade-repair-safety-and-quality> [Viitattu 13.6.2013]

Rotor Blade Leading Edge Erosion – Real Life Experiences - Wind Systems Magazine.htm saatavilla <http://windsystemsmag.com> [Viitattu 20.6.2013]