



# Tuulivoimaloiden käytön aikainen elinkaaren hallinta ja vikaantuminen Suomessa

Touko Säämänen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2024

Energia- ja ympäristötekniikka

**Säämänen Touko****Tuulivoimaloiden käytön aikainen elinkaaren hallinta ja vikaantuminen Suomessa**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 75 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

**Tiivistelmä**

Tuulivoimaa on rakennettu viimeisten vuosien aikana merkittävästi ja määrän odotetaan vain kasvavan. Vanhempien tuulivoimaloiden jo ikääntyessä, on tuulivoimaloiden kunnossapidon ja elinkaaren hallinnan merkitys tullut yhä ajankohtaisemmaksi. Tuulivoimaloiden huoltoihin ja kunnossapitoon käytön ajalle tarvittavan työvoiman määrä kasvaa jatkuvasti. Alalla toimivissa yrityksissä tästä on huolestuttu ja varsinkin Keski-Suomessa hankkeiden merkittävästä määrästä huolimatta alalla tai sille tulossa ei ole riittävästi osajia kattamaan tarvetta. Tuulivoima-alan tilanne osaavan työvoiman suhteen on siis haastava.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu on toimeksiantajana tässä opinnäytetyössä ja työn tavoitteena toimeksiantajalle on selvitys, mikä on tuulivoima-alan nykyinen tarve osaamiselle ja mitä toimeksiantaja voi tarjota tuulivoimaloiden kunnossapidon henkilöstön osaamisen kouluttamiseen alan toimijoiden tarpeisiin. Työ sisältää laajaan kirjallisuus- ja muuhun lähdemateriaaliin perustuvan tietopohjan tuulivoimaloiden käytön aikaisesta elinkaaren hallinnasta Suomessa, sekä vikaantumisesta, jota voidaan hyödyntää osana toimeksiantajan koulutusta.

Opinnäytetyö sisältää kuvailevaa kirjallisuuskatsausta, mutta pohjimmiltaan se on laadullinen eli kvalitatiivinen tutkimus. Tarkemmin ottaen kyse on vieläpä tapaustutkimuksesta, tyypiltään kumulatiivinen tapaustutkimus. Tutkimus noudattelee myös kriittisen instanssin piirteitä.

Työ itsessään on toimeksiantajan kanssa tavoiteltu lopputulos, sisältäen koottuna yhteen tietoa, jota ei sellaisenaan ole yhdessä julkaisussa koottu yhteen, sekä vastaukset asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuksessa on vikaantumisten osalta keskitytty kahteen eniten vikaantuvaan tuulivoimalan osaan työn laajuuden rajoittamiseksi. Tutkimusta on mahdollista tulevaisuudessa laajentaa koskettamaan koko tuulivoimalaa vikaantumisten osalta.

**Avainsanat (asiasanat)**

Tuulivoimala, tuuliturbiini, vaihteisto, naselli, napa, roottori, lapa, käyttövarmuus, luotettavuus, käytettävyyys, vikaantuminen, värähtely, analyysi, kuluminen, tahmautuminen, kuoppautuminen, särö, halkeaminen, hammas, laakeri, hammaspyörä, rasitus, jarru.

**Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Ei salassa pidettäviä liitteitä

**Säämänen Touko**

### **Wind turbines life cycle management and failures during the use in Finland**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 75 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

Wind power has been built significantly over the past few years, and the amount is only expected to grow. As older wind turbines are already aging, the significance of wind turbine maintenance and life cycle management has become more and more relevant. The amount of labor required for the maintenance and up-keep of wind turbines during operation is constantly increasing. Companies operating in the field are concerned about this, and especially in central Finland, despite the significant number of projects, there are not enough experts in the field or coming into it to cover the need. The situation in the wind power industry in terms of skilled labor is therefore challenging.

Jyväskylä University of Applied Sciences is the client for this thesis, and the aim of the work for the client is to find out what the wind power sector's current need for expertise is and what the client can offer to train wind power plant maintenance personnel for the needs of industry operators. The work includes a knowledge base based on extensive literature and other source material on life cycle management of wind turbines during operation in Finland, as well as failure, which can be used as part of the client's training material.

The thesis contains a descriptive literature review, but basically it is qualitative research. More precisely, it is still a case study, a cumulative case study. Regarding the thesis, the research also follows the characteristics of a critical instance, where the goal is to produce something new, especially useful for the client, based on the information to be obtained.

The work itself is the end result sought by the client, including gathered together information that has not been gathered together in one publication as such, as well as answers to the research questions.

In terms of failures, the research has focused on the two parts of the wind turbine that fail the most in order to limit the scope of the work. In the future, it is possible to expand the research to cover the entire wind farm in terms of failures.

### **Keywords/tags (subjects)**

Wind power plant, wind turbine, gearbox, nacelle, hub, rotor, blade, dependability, reliability, usability, failure, vibration, analysis, wear, scuffing, pitting, distortion, cracking, tooth, bearing, gear, stress, reliability, availability, failure, vibration, brake.

### **Miscellaneous (Confidential information)**

No confidential attachments

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>7</b>
1.1	Tausta .....	7
1.2	Tavoitteet .....	10
1.3	Menetelmät.....	11
<b>2</b>	<b>Käyttövarmuus .....</b>	<b>12</b>
2.1	Mitä käyttövarmuus on ja mikä vaikutus sillä on elinkaaren hallinnassa.....	12
2.2	Käyttövarmuuden osatekijät.....	12
2.2.1	Toimintavarmuus.....	13
2.2.2	Kunnossapidettävyys .....	13
2.2.3	Kunnossapitovarmuus .....	14
<b>3</b>	<b>Elinkaariajattelu .....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Tuulivoimalat Suomessa .....</b>	<b>17</b>
4.1	Tuulivoimaloiden käsitteitä.....	17
4.2	Tuuliturbiinien rakenne Suomen tuulivoimaloissa .....	19
4.3	Tuulivoimaloiden koko Suomessa .....	21
<b>5</b>	<b>Tuulivoimaloiden elinkaaren hallinta .....</b>	<b>24</b>
5.1	Suomessa toimivia yrityksiä .....	24
5.2	Vestas .....	25
5.3	Siemens Gamesa .....	26
5.4	Nordex Acciona .....	27
5.5	Tuulivoimaloiden käyttö ja kunnossapito Suomessa .....	28
5.5.1	Määritelmiä ja tunnuslukuja Suomen tuulivoimatuotannossa ja sijainnin vaikutus	28
5.5.2	Tekninen käyttö .....	31
5.5.3	Käyttäjän vastuut .....	32
5.5.4	Käytettävyys.....	32
5.5.5	Tuulivoimaloiden kunnossapito Suomessa .....	35
<b>6</b>	<b>Tuuliturbiinin vikaantuminen.....</b>	<b>39</b>
6.1	Vikaantumiset Suomessa ja Euroopassa .....	39
6.2	Vikaantuminen tuulivoimalan eri osissa .....	42
6.3	Vaihdelaatikko, vaihteisto eli vaihde .....	47
6.3.1	Kuoppautuminen (pitting) .....	50
6.3.2	Aksiaaliset säröt ( Axial cracks) .....	52
6.3.3	Tahmutuminen (Scuffing) .....	53

6.3.4	Kulumiskorroosio ( Fretting corrosion).....	54
6.4	Siivenkääntö eli lapakulman säätö.....	55
6.4.1	Hydraulinen lapakulman säätö .....	55
6.4.2	Sähköinen lapakulmansäätö.....	57
<b>7</b>	<b>Käytöstä poistetun tuulivoimalan kohtalo.....</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset.....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>Pohdinta.....</b>	<b>69</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>71</b>

## Kuviot

Kuvio 1	Työvoimantarve. (Energiamurros ja osaaminen. 2021.).....	8
Kuvio 2	Opinnäytetyön käsittekartta. (Säämänen Touko. 2024).....	11
Kuvio 3	Käyttövarmuuden osatekijät. (Muokattu. PSK 6201 4.painos. 2022).....	12
Kuvio 4	Mitkä voivat vaikuttaa käyttövarmuuden osatekijöihin. (Säämänen 2024).....	14
Kuvio 5	Elinkaaren määrittely. (Muokattu. Holma 2017.) .....	15
Kuvio 6	Elinkaaren aikaisten kustannusten jakautuminen. (Ahonen, Jännes, Kunttu ym. 2012).....	16
Kuvio 7	Tuuliturbiinin komponentit (Muokattu. Wind Turbine Maintenance Guide. 2012) .....	19
Kuvio 8	Asennettujen voimaloiden keskimääräinen koko (MW) (Tuulivoima Suomessa 2023. 2023) .....	21
Kuvio 9	Tuulivoimavalmistajat -Osuus kumulatiivisesta kapasiteetista (MW) 31.12.2023 (Tuulivoima Suomessa 2023. 2023) .....	22
Kuvio 10	Tuulivoimavalmistajat -Osuus 2023 valmistuneesta kapasiteetista (MW) (Tuulivoima Suomessa 2023. 2023) .....	22
Kuvio 11	Tuulivoimakapasiteetin kokojakauma 2008-2016 (Suomeen asennetaan samanlaisia voimaloita kuin muille vastaaville alueille 2016) .....	23
Kuvio 12	Saksan tuulivoiman kokojakauma 2011.2016 (Suomeen asennetaan samanlaisia voimaloita kuin muille vastaaville alueille 2016) .....	23
Kuvio 13	Suomalaisia tuulivoimakomponenttien valmistajia ja alan palveluntarjoajia. (2023). 24	
Kuvio 14	Vestas elinkaari. (Life Cycle Assessments of our turbines 2024) .....	25
Kuvio 15	Siemens elinkaarimalli (Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD).....	26
Kuvio 16	Nordex Acciona elinkaari (LCA of a Nordex Windfarm with Delta4000 turbines. 2020).....	27
Kuvio 17	Kuva tuulivoimalasta Lapissa (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2024).....	29
Kuvio 18	Jäätynyt tuulivoimalan lapa (Okka 2022).....	30
Kuvio 19	Tuulivoiman kustannukset (Palmu 2016)) .....	33
Kuvio 20	Tuulivoimaloiden vikaantumiset Suomessa (Turkia, Holttinen 2013) .....	40
Kuvio 21	Vikaantumisten aiheuttamat käyttökatkot vuonna 2011 (Turkia, Holttinen 2013) ....	41

Kuvio 22 Tärkeimmät vikatilat 6:sa kriittisimmässä järjestelmässä (Palmu 2016).....	41
Kuvio 23 Tuuliturbiinin laakeroinnit(Corey Bayles 2020.) .....	43
Kuvio 24 Tuuliturbiinin voimansiriron rakenne. (Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing 2011) .....	45
Kuvio 25 Tuulivoimavaihteen välitykset (Fundamentals of Wind Turbines Wind Systems Magazine) .....	47
Kuvio 262 planeettaportaalla olevan tuulivoimavaihteen välitykset (Cui Yi-Fan, Dong Lian-Jun,He Wei-Dong, Zhang Ying-Hui. 2024.).....	48
Kuvio 27. Kuoppautumista hammaspyörässä (Al-Mayali, Maasi & Hutt, S. & Sharif, Kayri & Clarke, A. & Evans, H. 2018.).....	50
Kuvio 28 Mikro- ja makrotason kuoppautuminen (Muokattu. Al-Mayali, Maasi & Hutt, S. & Sharif, Kayri & Clarke, A. & Evans, H. 2018.) .....	51
Kuvio 29 Aksiaalinen särö laakerissa.(Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn, Shields Matt. 2022) .....	52
Kuvio 30 Tahmautuminen hammaspyörässä (Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn, Shields Matt. 2022.) .....	53
Kuvio 31 Kulumiskorroosio hammaspyörässä (Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn Shields Matt. 2022.) .....	54
Kuvio 32 Hydraulinen lapakulmansäätö Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, ym. (2022.)	55
Kuvio 33 Hydraulisen lapakulmansäädön lapakohtaisia komponentteja (Annola 2022).....	56
Kuvio 34 Sähköinen lapakulmansäätö (Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, Pavlík Marek, ym. 2022.) .....	57
Kuvio 35 Lavan laakerin hammastus (Annola 2022) .....	58
Kuvio 36 Erittäin voimakkaasti kulunut hammas. (Annola 2022).....	59
Kuvio 37 Kulunut olake hammaspyörässä, syynä virheellinen linjaus (Annola 2022).....	60
Kuvio 38 Voimakkaasti kiillottunut hammas, aiheuttaja likainen voiteluaine. (Annola 2022)...	60
Kuvio 39 Kierrätysprosentit Pohjoismaissa (Wolf, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. 2022. ....	61
Kuvio 40 Tuulivoimalan raakamateriaalit Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C. 2020. ....	62
Kuvio 41 Poikkileikkaus tyypillisestä tuulivoimalan lavasta lähde( Cao, Zheng & Li, Shujian & Li, Changping & Li, Pengnan & Ko, Tae Jo. 2022.) .....	63

## Taulukot

Taulukko 1 Tuulivoimaloiden käsitteitä. (Muokattu. Wind Turbine Maintenance Guide. 2012)	17
Taulukko 2 Tuulivoimalan valmistuksessa käytettävät materiaalit ja arvio niiden hyödynnettävyydestä. (Tuulivoimalan purkamisen kustannukset. 2023.).....	64

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Tuulivoimaa on rakennettu viimeisten vuosien aikana merkittävästi ja määrän odotetaan vain kasvavan. Vuoden 2023 alkuvuoden aikana kesäkuuhun mennessä Suomessa valmistui 75 uutta tuulivoimalaa, joiden teho on yhteensä 439 megawattia. (Tuulivoimatilastot 6/2023. 2023).

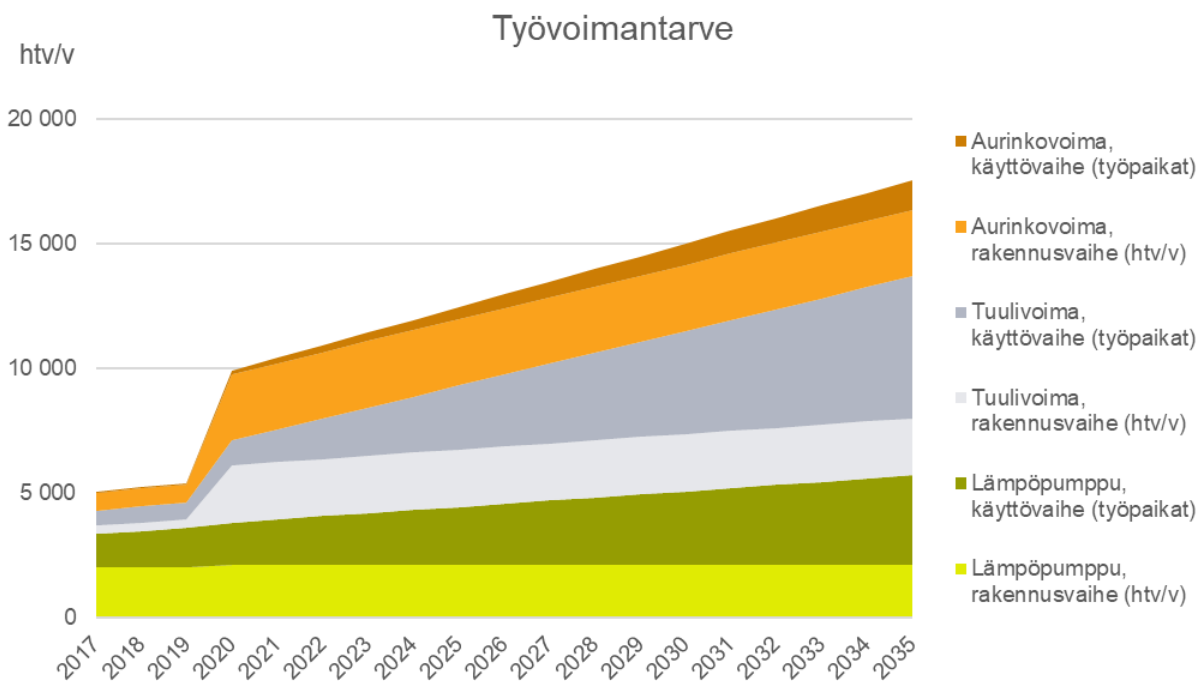
Keski-Suomi on viiden lukumääräisesti suurimman maakunnan joukossa tuulivoimahankkeiden lukumäärissä vuonna 2023. (Tuulivoimahankkeet Suomessa 05/2023. 2023). Tuulivoima-ala on Suomessa suhteellisen nuori, mutta työllistää huomattavan määrän alalle hakeutuneita osaajia.

Vanhempien tuulivoimaloiden jo ikääntyessä, on tuulivoimaloiden kunnossapidon ja elinkaaren hallinnan merkitys tullut yhä ajankohtaisemmaksi. Tuotantokustannusten minimointi ja maksimaalisen käyttöasteen tavoittelu ovat nykyään arkipäivää kaikille energia-alalla toimiville. Puhumattaakaan paineesta, jonka energiamurroksen asettamat uusiutuvan energian tavoitteet aiheuttavat tuotantomäärien kasvulle myös tuulivoiman tuotannossa. Elinehtona tuotantomuodolle, joka on täysin riippuvainen tuulesta, onkin toimintavarmuus tai tarkemmin ottaen, sen ylläpito. Voidaan puhua myös käyttövarmuuden hallinnasta. Avainasemassa tämän kriittisen toiminnon kustannustehokkaassa ylläpidossa on osaava henkilöstö, jokainen toimiva tuulivoimala tarvitseekin siksi tukeen sitä ylläpitävän, asiansa osaavan organisaation. (Walford 2006, 13.)

Tuulivoimaloiden huoltoihin ja kunnossapitoon saatavana olevan työvoiman määrä on kuitenkin rajallinen. Alalla toimivissa yrityksissä tästä on huolestuttu ja varsinkin Keski-Suomessa hankkeiden merkittävästä määrästä huolimatta alalla tai sille tulossa ei ole riittävästi osaajia kattamaan tarvetta. Tuulivoimaa kuitenkin on rakennettu ja rakennetaan kiihtyvään tahtiin ympäri maailmaa ja kansainvälisestäikin ammattitaidon vienti vetää ja asiansa osaavat ammattilaiset kyllä rekrytoidaan aktiivisesti ympäri maailmaa sijaitseviin kohteisiin.

Tuulivoima-alan tilanne osaavan työvoiman suhteen on siis haastava. Alalle kaivataan osaamista kaikenlaisilla taustoilla, läpi tuulivoimahankkeen elinkaaren. Hankekehityksen ja tuulivoimaloiden kunnossapidon puolelle on jatkuvasti paikkoja haussa ja tarve toisiaan täydentäville osaajille. Kuitenkin kaikilla alan toimijoiden työllistämällä hakijoilla toivotaan olevan perustason ymmärrystä tuulivoima-alasta. Hankekehityksen puolelle kaivataan erityisesti korkeamman tason osaamista.

Tekniikan, kaupallisen, geologian, meteorologian, sekä biologian alan asiantuntijoille on kova kysyntä. Hankekehittämisen eräänä erityispiirteenä voidaan todeta sen olevan eräänlaista ajatusten ja ideoiden myymistä. Kohteena voi olla tuulivoimahanketta vastustavia tahoja, joten hankekehityksen puolella on tarve todellakin monenlaisille osaajille. Yhteistä kuitenkin on tarve ymmärtää hankekehittämistä kokonaisuutena. Alla olevassa kaaviossa on esitetty arvio tulevaisuuden työvoiman tarpeesta uusiutuvan energian aloilla, myös tuulivoima-alalla. (Ohrling, Heiskanen & Matschoss. 2021, 20.)



Kuvio 1 Työvoimantarve. (Energiamurros ja osaaminen. 2021.)

Tuulivoimaloita rakennettaessa ja kunnossapidettäessä, niiden työnjohtoon tarvitaan teknistä osaamista omaavaa henkilöstöä. Esimiesosaamiselle on myös tarvetta, sekä projektinhallintaan liittyviin tehtäviin osallistuville, projektiosaamisen taidoilla. Tuulivoima-alalle voi työllistyä monenlaisilla taustoilla ja alalla käytössä olevalle teknologialle, sekä ratkaisuille on ominaista niissä käytettävän tekniikan laaja-alaiset ratkaisut. Tuulivoimalan kunnossapitoon esimerkiksi tarvitaan niin mekaniikan, kuin myös sähkö- ja automaatiotekniikan osaamista.

Projektien hallinnassa ja varsinkin projektipäälliköillä on yhä enenevässä määrin suurempaa vastuuta myös projektien kaupallisen toteuttamisen hallinnasta. Suomessa ei juuri ole tarjolla korkeakoulutasoista koulutusta laaja-alaisemmin liittyen tuulivoima-alaan tai esimerkiksi painottuen tuulivoimaloiden kunnossapitoon ja elinkaaren hallintaan kokonaisuutena. Tuulivoimalan eniten työllistävä elinkaaren vaihe kuitenkin on ylläpitäminen. Tuulivoimalan ylläpitoon kuuluu sen kunnossapito, suunnitellun mukaisesti ja tarpeen vaatiessa yllättävien ongelmien ratkaiseminen, sekä vikojen korjaaminen käyttökunnon palauttamiseksi. (Ohrling, Heiskanen & Matschoss. 2021, 20.)

Pohjoisen Keski-Suomen ammattiopisto paikallisena ammatillisen koulutuksen järjestäjänä on alan toimijoiden toiveesta ja yhteistyössä toimien käynnistänyt hankkeen, jolla omalta osaltaan tavoitellaan tähän ratkaisua. Hankkeen päätavoitteena on luoda uudenlainen hiilineutraalin energiatuotannon huoltotoimien ja kunnossapidon osaamiskeskittymä, joka palvelee koko Keski-Suomen aluetta ja yritysten tarpeita, kertoo kaupunkilehti Äksä artikkelissaan ”Pohjoisen Keski-Suomen ammattiopisto käynnistää lähes 1 400 000 euron hankkeen, jolla rakennetaan tuulivoiman ja aurinkopaneeliratkaisuiden osaamiskeskittymää”, julkaistu 05.09.2023. Jyväskylän ammattikorkeakoulu on saanut myös merkittävästi yhteydenottoja koskien alaan liittyvää koulutusta. Käydyissä keskusteluissa Jyväskylän ammattikorkeakoulun kanssa päädyimme lopputulokseen, että korkeakoululla on potentiaalia tarjota koulutusta alalle ja asiasta on syytä tehdä tarkentavaa tutkimusta.

## 1.2 Tavoitteet

Opinnäytetyön alkuvaiheessa yhtenä osana opinnäytetyöprojektia oli tuottaa tutkimus haastattelujen muodossa, jonka kohderyhmään olisivat olleet tuulivoima-alan toimijat. Haastatteluilla olisi selvennetty mitä tosiasiallisesti alan yritykset toivovat alalle suuntautuvien koulutukselta ja mitä alalla toimivilta vaaditaan. Työn edetessä, lukuisien yritysten jälkeen, alan avaintoimijoita ei tavoitettu tai asiaan ei palattu ensimmäisten keskustelun avausten jälkeen.

Toimeksiantajan kanssa tehtiin päätös opinnäytetyöprojektin toteutuksesta tästä huolimatta, tukeutuen olemassa oleviin tutkimuksiin, julkaisuihin ja alan kirjallisuuteen. Opinnäytetyön tekijän kokemusta tuulivoima-alasta pidettiin myös etuna, joka auttaisi toteutuksessa alun hankaluuksista huolimatta. Työn lopputuloksena syntyvän työn suunniteltiin kuvailevan tuulivoimaloiden elinkaaren hallintaa ja kunnossapitoa prosessina, sekä miten tätä yleensäkin toteutetaan, ketkä ovat toimijoina avainasemassa ja mikä heidän merkittävyytensä on. Lopputuloksena on yhteen koottu selkeä tiivistelmä nimenomaan tuulivoimalan käyttövaiheen näkökulmasta, miten tuulivoimalan elinkaarenhallinta toteutetaan. Tätä voidaan jatkossa hyödyntää osana koulutusta.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu on toimeksiantajana tässä opinnäytetyössä ja primäärinä tavoitteena toimeksiantajalle on tuottaa oppilaitokselle selvitys mikä on tuulivoima-alan nykyinen tarve osaamiselle ja mitä oppilaitos voisi tarjota tuulivoimaloiden kunnossapidon henkilöstön osaamisen kouluttamiseen alan toimijoiden tarpeisiin. Opinnäytetyö tulee sisältämään laajaan kirjallisuus- ja muuhun lähdemateriaaliin perustuvan tietopohjan tuulivoimaloiden kunnossapidosta- ja elinkaaren hallinnasta. Opinnäytetyö pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

*Mitä tuulivoimaloiden elinkaaren hallinta käytännössä on Suomessa?*

*Millaista osaamista tuulivoimaloiden kunnossapidossa vaaditaan Suomessa?*

*Mitä Jyväskylän ammattikorkeakoulu voisi tarjota koulutuksen saralla alalle?*



## 2 Käyttövarmuus

### 2.1 Mitä käyttövarmuus on ja mikä vaikutus sillä on elinkaaren hallinnassa

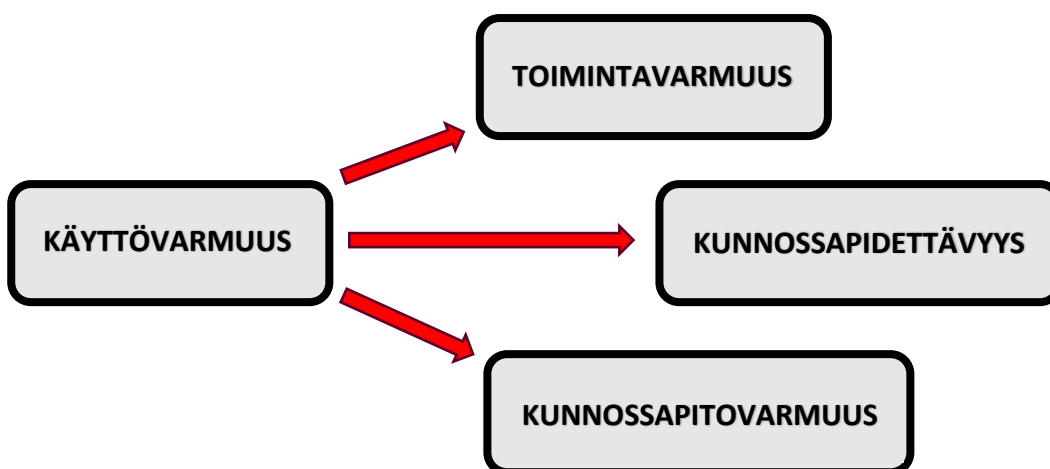
**Käyttövarmuus** on nykyään arvostetuimpien ominaisuuksien joukossa tuotetta, laitetta tai laitosta arvotettaessa. Ominaisuus ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys ja jos sitä ei oteta tavoitteellisesti haltuun jo kehitysvaiheessa, on suuri riski kadottaa hallittavuus sen osalta. Siksi on tärkeää määrittää selkeä protokolla suunnittelun ohjaukselle, joka huolehtii tästä. Näin tiivistetysti toteaa 7-VTT tutkimuksessaan ”Käyttövarmuuden hallinta –standardista käytäntöön” (2012. s3)

Holmaa (2017. s16) mukaillen voidaankin todeta, että käyttövarmuus on erottamaton osa elinkaariajattelua ja liittyy olennaisesti elinkaaren käyttövaiheeseen, sekä sen kustannuksiin.

Käyttövarmuutta kuvataan kykynä toimia vaadittaessa vaaditulla tavalla. Otetaan esimerkiksi kattolamppu. Kattolampun tulisi syttyä ja tuottaa valoa, kun valokatkaisijasta painetaan. Mikäli lamppu tekee jotain aivan muuta, esimerkiksi syttyy ja sammuu saman tien tai ei syty ollenkaan, jos katkaisijaa painetaan, on sen käyttövarmuus todella huono. Käyttövarmuudella on siis suuri merkitys aivan jokapäiväisessä elämässämme.

### 2.2 Käyttövarmuuden osatekijät

Käyttövarmuus jaetaan kolmeen osatekijään: **Toimintavarmuuteen**, **kunnossapidettävyyteen** ja **kunnossapitovarmuuteen**. Näistä ominaisuuksista voidaan suunnittelussa vaikuttaa ainoastaan toimintavarmuuteen ja kunnossapidettävyyteen.



Kuvio 3 Käyttövarmuuden osatekijät. (Muokattu. PSK 6201 4.painos. 2022)

### 2.2.1 Toimintavarmuus

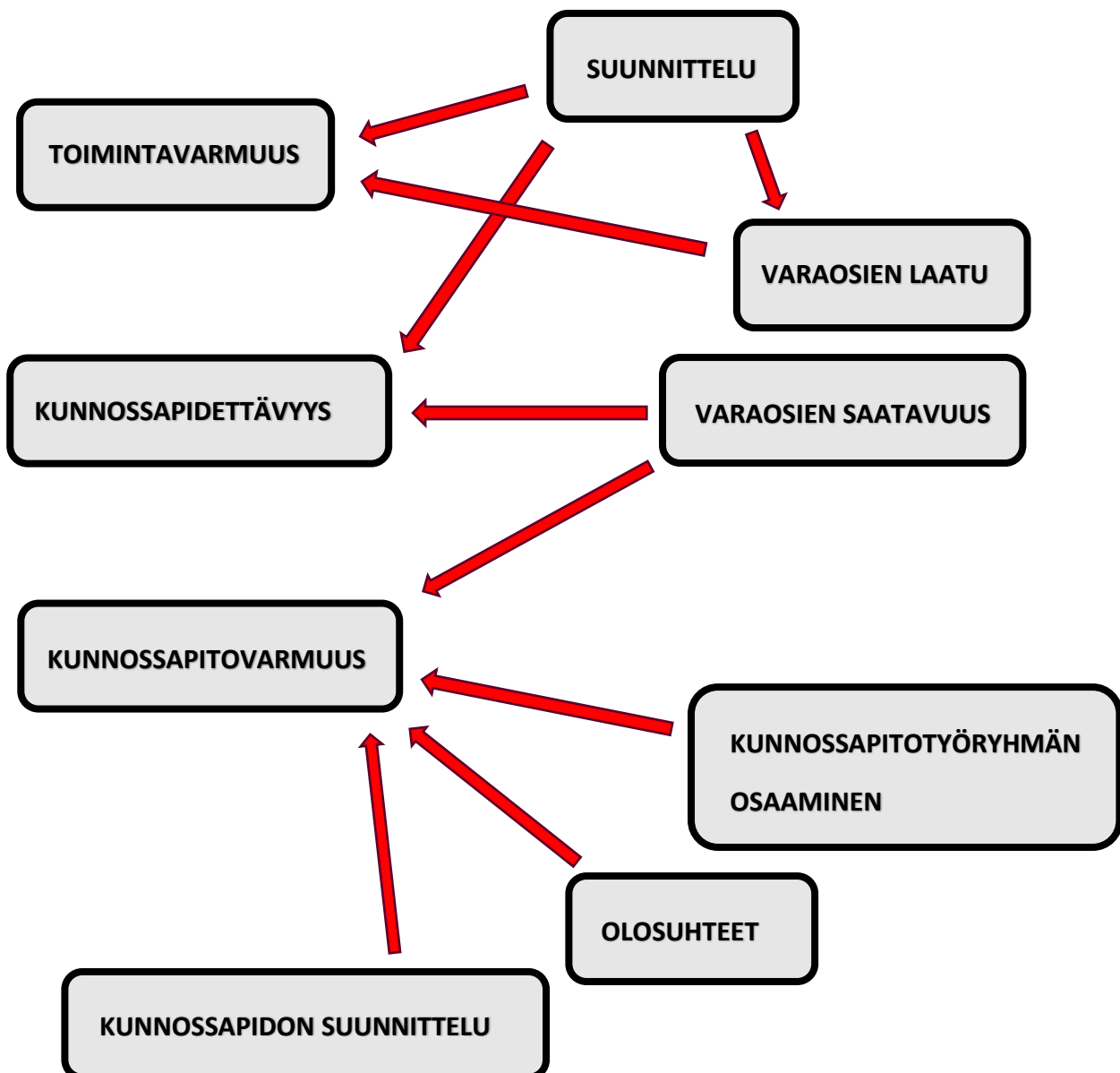
Standardin PSK 6201 4. painoksesta johtaen (2022. s9), **toimintavarmuus** kuvataan laitteen kykyä suorittaa vaadittua toimintoa, vaadittu aika, määrätyissä olosuhteissa. Jos palaamme kattolamppuun, sen vaadittu toiminto on valon tuottaminen, mikäli katkaisijasta kytketään virta. Vaaditun ajan voimme todeta olevan vaikkapa 10 000 tuntia. Määrätyt olosuhteet ovat ne, mitkä voimme kuvitella olevan tavallisessa asunnossa, sisätiloissa. Näillä tiedoilla toimintavarmuutta lampun osalta arvioidaan siis sen perusteella, syttyykö se, mikäli sitä on käytetty alle 10 000 tuntia jos sitä käytetään tavallisessa asunnossa, sisätiloissa. On tärkeää tiedostaa juuri ne asiat mitä vaadimme lampulta, koska sen toimintavarmuutta ei muuten voida arvioida realistisesti, jos käyttöolosuhteita ei ole määritetty. Sama pätee myös myöhemmin tässä työssä käsiteltävään tuulivoimaan ja sen toimintavarmuuteen.

### 2.2.2 Kunnossapidettävyys

Kunnossapidettävyys voidaan tiivistäen standardin PSK 6201 4. painoksesta (2022. s10) määrittää olevan käytännössä laitteen ominaisuus, miten helposti, yksinkertaisesti, nopeasti ja vähimmillä resursseilla laite voidaan pitää kunnossa. Siihen, kuinka tämä käytännössä ilmenee, on useita eri osatekijöitä mm. luokse päästävyys, korjattavuus, korvattavuus ja huollettavuus. Lyhyesti nämä voidaan avata niin, että luokse päästävyydellä tarkoitetaan, kuinka helposti laitetta päästään fyysisesti kunnossapitämään eli tavoittamaan siihen kuuluvat työkohteet. Korjattavuus kuvaa, kuinka laite on korjattavissa. Sen suora vastinpari on korvattavuus ja näitä kahta ominaisuutta usein tasa-painotellaan resurssi- ja kustannustehokkuuden nimissä. Karkeasti voidaan todeta, että jos laite on hyvin kallista korjata, mutta halpa valmistaa, on keskityttävä nimenomaan korvattavuuteen. Vastaavasti tilanne voi olla toisinpäin. Huollettavuus keskittyy siihen, miten laitteen huolto voidaan toteuttaa, onko se helppo vai vaikeaa, hidasta vai nopeaa, kallista vaiko halpaa. Kaikki tärkeitä ominaisuuksia ja kuten aiemmin on todettu, näiden kesken joudutaan väkisin tekemään kompromisseja.

### 2.2.3 Kunnossapitovarmuus

Kunnossapitovarmuus on monimutkaisempi tapaus, koska siihen vaikuttavat varsinaisen tuotteen, laitteen tai laitoksen itsensä ulkopuoliset seikat. Yksinkertaistetusti kunnossapitovarmuuden voidaan ajatella kuvaavan sitä, mikä on kunnossapidon kohteesta vastaavan organisaation kyky pitää sitä kunnossa. Kunnossapitovarmuuteen vaikuttavat kuitenkin ulkoiset, jopa täysin ennakoimattomissa olevat seikat, kuten sää ja luonnonilmiöt. Alla olevassa kuviossa on esitetty joitain vaikuttavia tekijöitä.



Kuvio 4 Mitkä voivat vaikuttaa käyttövarmuuden osatekijöihin. (Säämänen 2024)

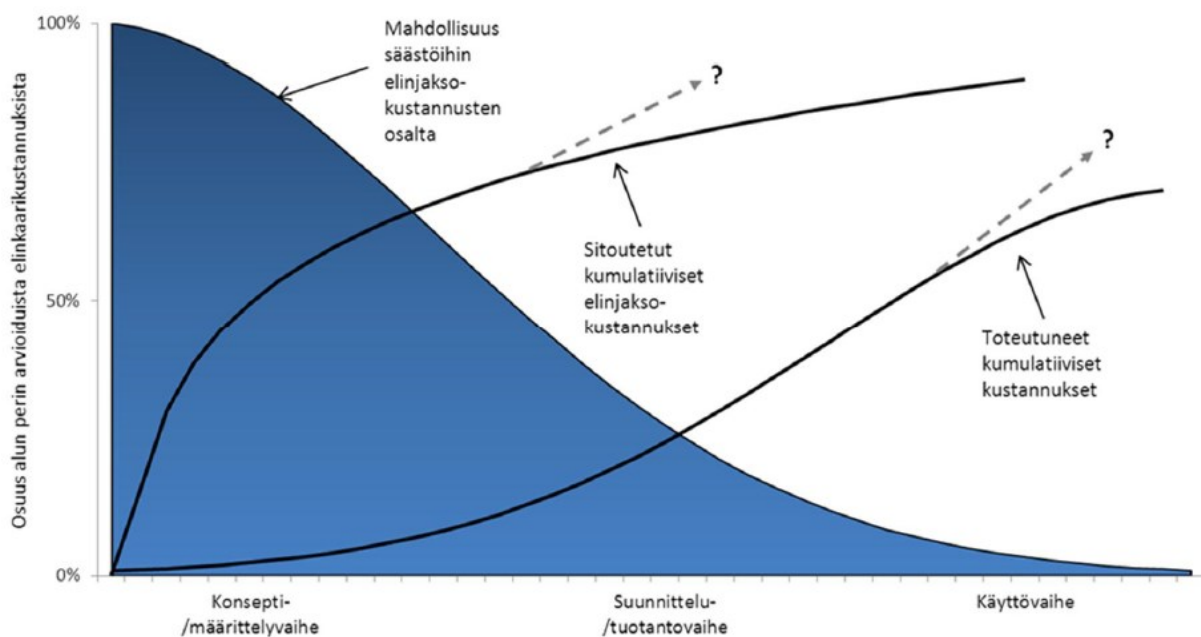
### 3 Elinkaariajattelu

Elinkaariajattelu pohjaa siihen todelliseen ilmiöön mikä vaikuttaa meihin kaikkiin. Me synnymme, elämme ja kuolemme. Elinkaariajattelussa määritetään tuotteen elämä ja siihen liittyvät vaiheet. Milloin se syntyy, mitä vaiheita sen elämässä on ja milloin se kuolee pois. Tuotteen, laitteen tai laitoksen elinkaaren kaikista kriittisimmät vaiheet koetaan lähes poikkeuksetta aivan sen alkumetreillä. On kuitenkin huomioitava, että elinkaaren alun määrittämiseen on useampaa ajattelumallia. Holman (2017, 5) mukaan sen määrittely on jopa ISO/IEC/IEEE ja SFS-EN 12100-standardeissa erilainen Tämä kuvastaa sitä, kuinka yksilöllinen elinkaaren määritelmä on ja itseasiassa se onkin täysin tuote/ laite/ laitoskohtainen. Taulukossa 1 on esitetty standardien määritelmät elinkaaresta, sekä yleistynyt määritelmä. Taulukosta voidaan havaita selkeä ero eri tapojen välillä. Holma (2017, 5) toteaaakin diplomityössään ”*Toiset kattavat koko tuotteen elinkaareen ollen näin kokonaisvaltaisen elinkaariajattelun mukaisia, mutta koneturvallisuusstandardi SF (S-EN 12100 käsittelee elinkaarta tuotteen hankkijan ja loppukäyttäjän näkökannalta.*”

Yleinen määritelmä	ISO/IEC/IEEE 15228 [21]	SFS-EN 12100 [49]
Määrittely Suunnittelu Valmistus	Konseptointi Kehitys Tuotanto	
Asennus	Käyttöönotto	Kuljetus Kokoonpano ja asennus / käyttöönotto
Ylläpito	Tukeminen	Puhdistus / Kunnossapito Vianetsintä / ongelman- selvitys
Käytöstä poisto	Eläköityminen	Purku / Käytöstä poisto

Kuvio 5 Elinkaaren määrittely. (Muokattu. Holma 2017.)

Tuotteen elinkaarelle on ominaista, että sen koko elinkaaren aikaisten kustannusten ja hyötyjen kannalta niihin eniten vaikuttavat päätökset tehdään hyvin aikaisessa vaiheessa elinkaarta. Nämä päätökset tehdään tuotekehityksen aikana. Tuotekehityksen varhaisimmassa vaiheessa syntyneiden virheiden korjaaminen tai tuotekehityksen suunnan muutos eri konseptiin samalla lopputuloksella, kohti virhevapautta on sitä kalliimpaa ja hankalampaa mitä pidemmälle tuotetta on ehditty kehittää. Virheiden korjaaminen voi olla jopa täysin mahdotonta. Siksi on alusta asti tärkeää, että tuotetta koskeva määrittely on mahdollisimman tarkka, jotta lopullinen tuote täyttää sille asetetut vaatimukset. Käyttövarmuuden hallinta voi olla jopa mahdotonta, jos tuotetta ei ole suunniteltu vaatimusten mukaisesti. Käytön aikaisia kustannuksia ei tällöin pystytä hallitsemaan. Käytännössä, kuten muissakin asioissa, hyvä pohjatyö luo siis perustan onnistumiselle. Käyttövarmuuden hallinnan eteen on kuitenkin tehtävä toimia myös elinkaaren myöhemmissä vaiheissa kustannusten hallitsemiseksi. Nämä ovat käyttövaiheen kustannuksia, joihin kuuluvat käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Alla olevasta kaaviosta voimme nähdä kustannusjakauman yleistetyn elinkaari mallin mukaisesti. (Ahonen, Jännes, Kunttu ym. 2012.)



Kuvio 6 Elinkaaren aikaisten kustannusten jakautuminen. (Ahonen, Jännes, Kunttu ym. 2012)

## 4 Tuulivoimalat Suomessa

### 4.1 Tuulivoimaloiden käsitteitä

Tarkasteltaessa tuulivoimalan rakennetta on tärkeää ymmärtää mitä erilaisia osakokonaisuuksia tuulivoimala itse asiassa sisältää. Seuraavassa taulukossa on esitetty ja lyhyesti selitetty keskeisiä tuulivoimalan rakenteeseen liittyviä käsitteitä.

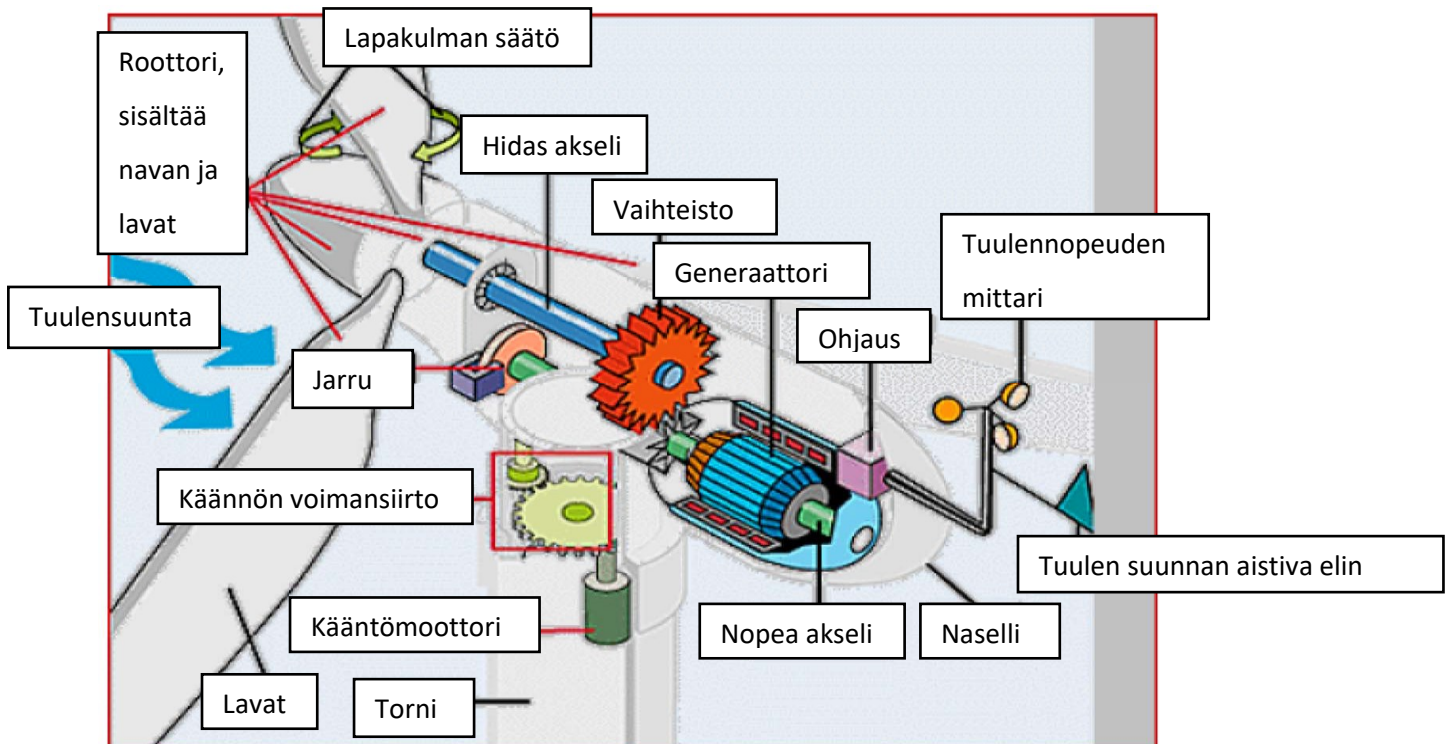
Taulukko 1 Tuulivoimaloiden käsitteitä. (Muokattu. Wind Turbine Maintenance Guide. 2012)

Tuuliturbiini	Laite, jolla ilman, eli tuulen liike-energia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi ja edelleen sähköenergiaksi generaattorina avulla.
Naselli	Tornin yläpäässä sijaitseva tuulivoimalan ”konehuone”, johon roottori kiinnittyy. Sisältää muun muassa vaihteiston, sekä generaattori.
Generaattori	Laite, jolla mekaaninen, pyörivä energia nopealta akselilta voidaan muuttaa sähköenergiaksi magneettikentän avulla.
Hidas akseli	Välittää voiman roottorilta vaihteistoon.
Nopea akseli	Välittää voiman vaihteistolta generaattorille.
Vaihteisto	Kasvattaa välityksen mukaisesti hitaan akselin pyörintänopeuden generaattorille sopivammaksi.
Kytkin	Toimii vaihteiston ja generaattorin välissä joustavana liitoksena.
Laakeri	Kone-elin, joka mahdollistaa vaihteiston ja laitteiden pyörivän liikkeen vähäisellä kitkalla.

Jarru	Mekaaninen kitkajarru, jolla voidaan pysäyttää tuuliturbiinin roottorin pyöriminen seisokkien ajaksi.
Roottori	Kokonaisuus, joka sisältää lavat ja niiden kääntöön tarvittavan laitteiston. Kiinnittyy voimalan pääakselille ja välittää sen kautta voiman vaihteiston hitaalle akselille.
Roottorin lavat	Lavat ottavat nosteen periaattein tuulen liike-energian vastaan ja muuntavat sen pyöriväksi mekaaniseksi energiaksi.
Lapakulman säätö	Laitteisto, jolla säädetään roottorin lapojen kulmaa tuulta vasten. Perustuu lavan pinta-alan muuttamiseen, jolloin tuulen vaikutus lapaan muuttuu.
Napa	Roottorin keskiö, johon lavat ovat kiinnitettyinä. Sisältää lapojen säätömekanismin. On laakeroitu vapaasti pyörivälle akselille, joka välittää voiman vaihteistolle.
Torni	Yleensä teräksestä valmistettu putkimainen rakenteeltaan oleva tuulivoimalan osa, jonka yläpähän naselli kiinnittyy. Asennetaan tuulivoimalan perustusten varaan.
Perustukset	Tukevat tornia ja siirtävät rasitukset tornista ympäröivään maaperään tai peruskallioon. Materiaali on yleensä teräsvahvisteista betonia.

## 4.2 Tuuliturbiinien rakenne Suomen tuulivoimaloissa

Nordexin ja Vestaksen valmistamissa tuulivoimaloissa Suomessa ja Pohjoismaissa käytännössä kaikki tuuliturbiinit ovat rakenteeltaan vaaka-akselisia (**Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT**). Vaaka-akselisessa tuuliturbiinissa roottorin akseli on saman suuntainen maan kanssa ja vastakkaisuuntainen tornin kanssa. Historiassa on nähty kilpailevaa rakennetta markkinoilla, jossa roottorin akselin pyörintäsuunta on yhdensuuntainen maan kanssa. Näin ollen roottorin akseli on samansuuntainen tornin kanssa. Tällöin puhutaan pystyakselisesta turbiinista. (**Vertical Axis Wind Turbine, VAWT**) Valtakunnallisen sähköntuotannon mittakaavassa näitä turbiineja ei ole Suomessa yhtään käytössä ja maailmanlaajuisestikin se on kadonnut markkinoilta. (Wind Turbine Maintenance Guide. 2012). Vaaka-akseliset, Suomessa ja Pohjoismaissa käytössä olevat turbiinit noudattavat seuraavaan kuvion rakennetta (Säämänen 2024):



Kuvio 7 Tuuliturbiinin komponentit (Muokattu. Wind Turbine Maintenance Guide. 2012)

Kuviosta voidaan tunnistaa muutamia erityispiirteitä:

- Roottori suunnattu tuulta vasten
- Lapakulmien säätöjärjestelmä
- Nasellin kääntöjärjestelmä
- Voimansiirto, jossa pääakseli, vaihteisto, sekä generaattori.
- Jarru seisokkeja varten estämään roottorin pyörinnän.
- Generaattori
- Naselli ja päärunko. -Sisältää turbiinin koteloinnin, petilevyn ja kääntöjärjestelmän.
- Torni ja perustukset
- Ohjausjärjestelmä

Vaaka-akselisten tuuliturbiinien toteutuksessa on kuitenkin hyödynnetty maailmalla erilaisia variaatioita, useimmiten variaatiot kohdistuvat kuitenkin vain seuraaviin osa-alueisiin rakenteessa ker-  
too Hietala (2020):

- Lapojen lukumäärä, yleensä 2–3
- Ohjaustavat– Lapakulmien säätö, säädettävät aerodynaamiset pinnat, nasellin kääntö
- Roottorin sijoitus tuulensuuntaan tuulta vasten.
- Roottorin pyörintänopeus, vakio vai muuttuva nopeuksinen
- Kääntömekanismi – Ohjattu kääntö, vapaa kääntö vai kiinteä roottorin suuntaus tuuleen.
- Navan tyyppi ja muoto
- Jarrujen lukumäärä

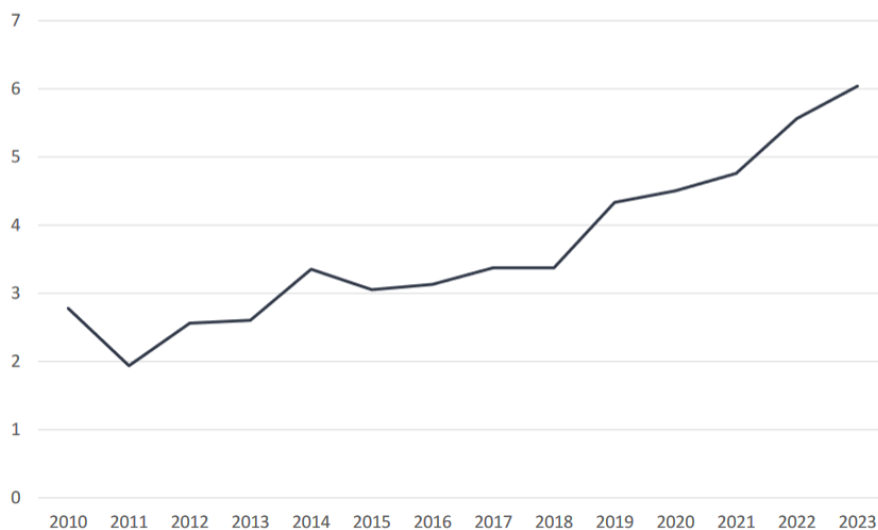
Edellä mainitun rakenteen tuuliturbiinit, joita Saksassakin on asennettu 2011 mennessä, ovat saman tyyppisiä ja samojen valmistajien toimittamia, joita Suomeen asennetaan juuri nyt ja on asennettu 2011 lähtien. Saksassa käytössä olevien voimaloiden osalta vielä 2010-luvulla kerätty vikaantumisdata ja siihen liittyvät tutkimukset ovat siis sellaisenaan käyttökelpoisia verratessa Suomen voimaloihin. (Suomeen asennetaan samanlaisia voimaloita kuin muille vastaaville alueille. 2016.)

### 4.3 Tuulivoimaloiden koko Suomessa

Suomessa ja Pohjoismaissa tuulivoimaloiden koon kehitys on ollut maltillisempaa kuin muualla maailmassa, mutta silti jatkuvaa. Tuulivoimaloiden elinkaareksi lasketaan useimmissa tapauksissa 25 vuotta, joskin nykyisellään valmistajat tähtäävät teknologian kehittyessä yhä pidempään käyttöikänsä. Merkittävällä osalla tuulivoimaloista on Suomessa vielä yli vuosikymmenen käyttöikää jäljellä ja vaikkakin tuulivoimaloiden koot ovat jatkuvassa kasvussa, niiden osalta ollaan Suomessa kuitenkin tilanteessa, jossa suurin osa voimaloista on kooltaan alle 6 MW. Voimaloiden keskikoko on samaa luokkaa, joskin trendi on nouseva uusien voimaloiden koon kasvaessa.

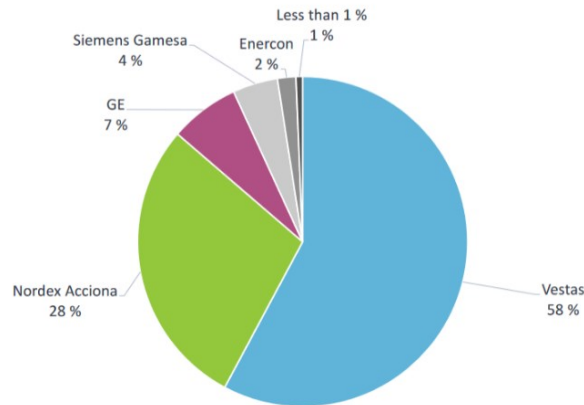
(Tuulivoima Suomessa 2023. 2023)

#### Asennettujen voimaloiden keskimääräinen koko (MW)



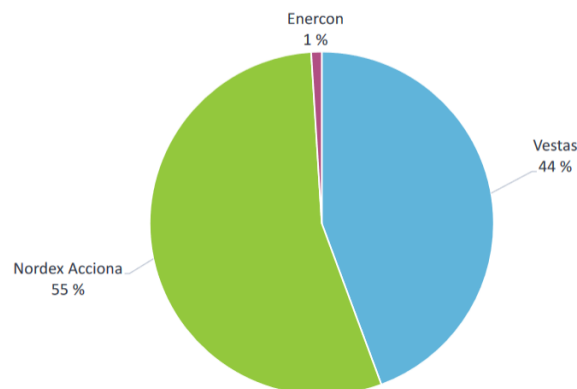
Kuvio 8 Asennettujen voimaloiden keskimääräinen koko (MW) (Tuulivoima Suomessa 2023. 2023)

### Tuulivoimalavalmistajat – Osuus kumulatiivisesta kapasiteetista (MW) 31.12.2023



Kuvio 9 Tuulivoimavalmistajat -Osuus kumulatiivisesta kapasiteetista (MW) 31.12.2023 (Tuulivoima Suomessa 2023. 2023)

### Tuulivoimalavalmistajat – Osuus 2023 valmistuneesta kapasiteetista (MW)

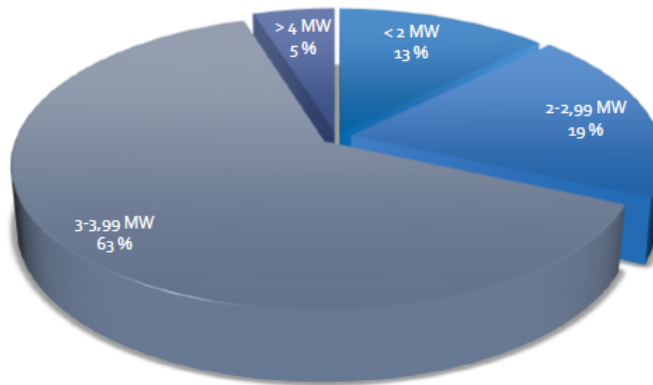


Kuvio 10 Tuulivoimavalmistajat -Osuus 2023 valmistuneesta kapasiteetista (MW) (Tuulivoima Suomessa 2023. 2023)

Kuten yllä olevista kuvioista voidaan havaita, tämän kokoluokan voimaloissa Nordex Acciona ja Vestas ovat huomattavalla osuudella tuulivoimavalmistajina mukana Suomen kapasiteetissa. Kummallakin valmistajalla voimaloiden tuuliturbiinin rakenne on hyvin samanlainen, sisältäen samat pääkomponentit ja perusrakenteen, kuin aiemmin on käsitelty.

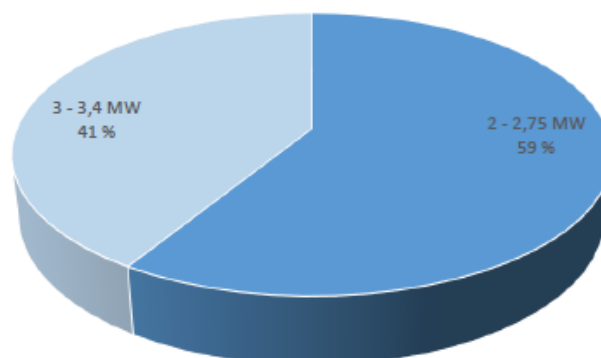
Huomionarvoista on se, että Suomessa viime vuosien aikana rakennetut voimalat ovat samaa kokoluokkaa, kuin Tanskaan ja Viroon on asennettu jo 2000-luvun alussa. Suomen Tuulivoimayhdistys ry kertoo julkaisussaan Voimalakoot 2016, että Suomi, Ruotsi, Baltia, Saksa ovat kaikki metsäisiä alueita ja näillä alueilla sijaitsevat voimalat ovat käytännössä kaikki saman tyyppisiä rakenteeltaan. Alla olevista kaavioista voidaan havaita yhteneväisyyksiä voimaloiden kokojakoumassa Suomessa ja Saksassa.

Suomeen asennetun tuulivoimakapasiteetin kokojakauma 2008 – 2016, yhteensä 552 kpl



Kuvio 11 Tuulivoimakapasiteetin kokojakauma 2008-2016 (Suomeen asennetaan samanlaisia voimaloita kuin muille vastaaville alueille 2016)

Wpd:n ja ABO Windin vuosina 2011-2016 Saksaan asentaman tuulivoimakapasiteetin kokojakauma, yhteensä 432 kpl

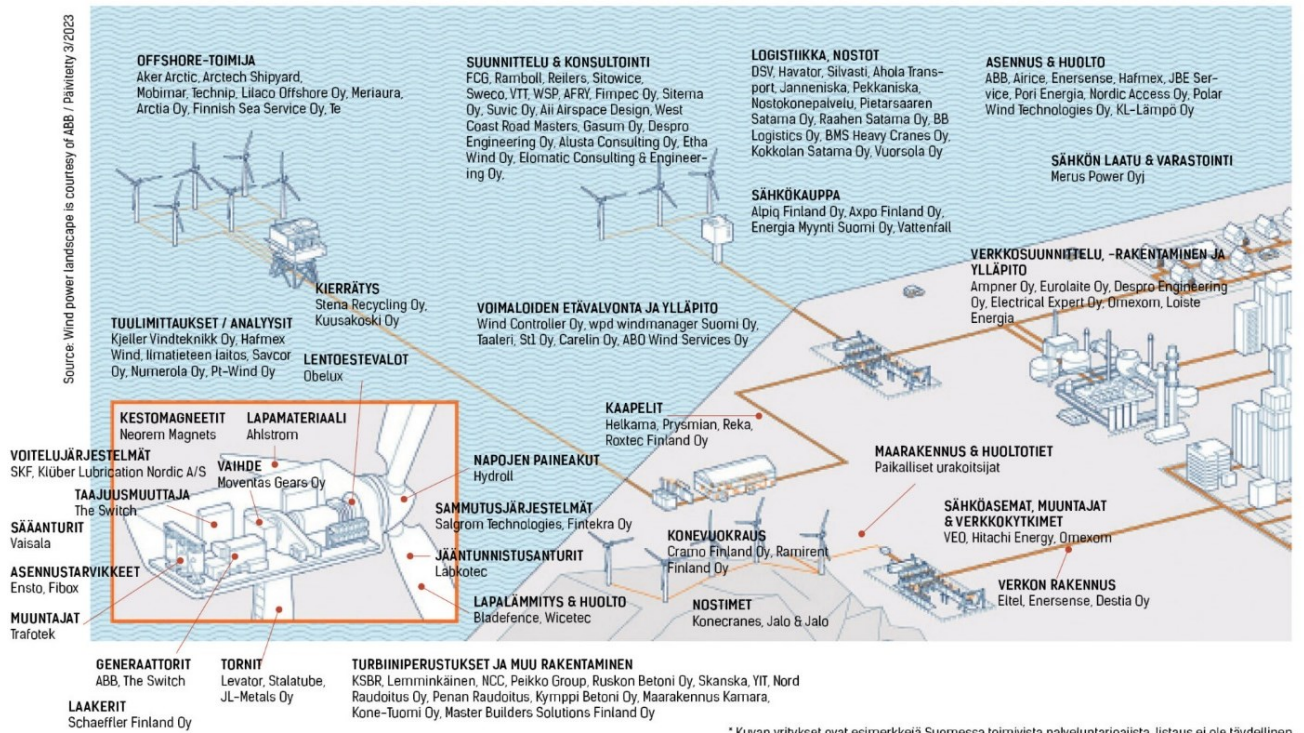


Kuvio 12 Saksan tuulivoiman kokojakauma 2011.2016 (Suomeen asennetaan samanlaisia voimaloita kuin muille vastaaville alueille 2016)

## 5 Tuulivoimaloiden elinkaaren hallinta

### 5.1 Suomessa toimivia yrityksiä

# Suomalaisia tuulivoimakomponenttien valmistajia ja alan palveluntarjoajia<sup>\*</sup>



Kuvio 13 Suomalaisia tuulivoimakomponenttien valmistajia ja alan palveluntarjoajia. (2023)

Yllä olevassa kuvassa on esitettyä Suomalaisia tuulivoimakomponenttien valmistajia ja alan palveluntarjoajia. Moni saattaa tunnistaa nimeltä useampiakin alan yrityksiä, useat näistä toimivat nimittäin myös muilla aloilla. Onkin niin, että tuulivoimalat, omista erityisominaisuuksistaan huolimatta, sisältävät pitkälti samanlaisia komponentteja, kuin mikä tahansa muu teollisuuden laitos. Huomionarvoista on, että voimaloiden käytön ajalle palveluita tarjoavien yritysten määrä on kohtuullisen pieni. Puhuttaessa varsinkin huollosta, on ajatuksia herättävää miksi määrä ei ole suurempi. Tähän kysymykseen paneudutaan tarkemmin myöhemmin tässä työssä.

## 5.2 Vestas

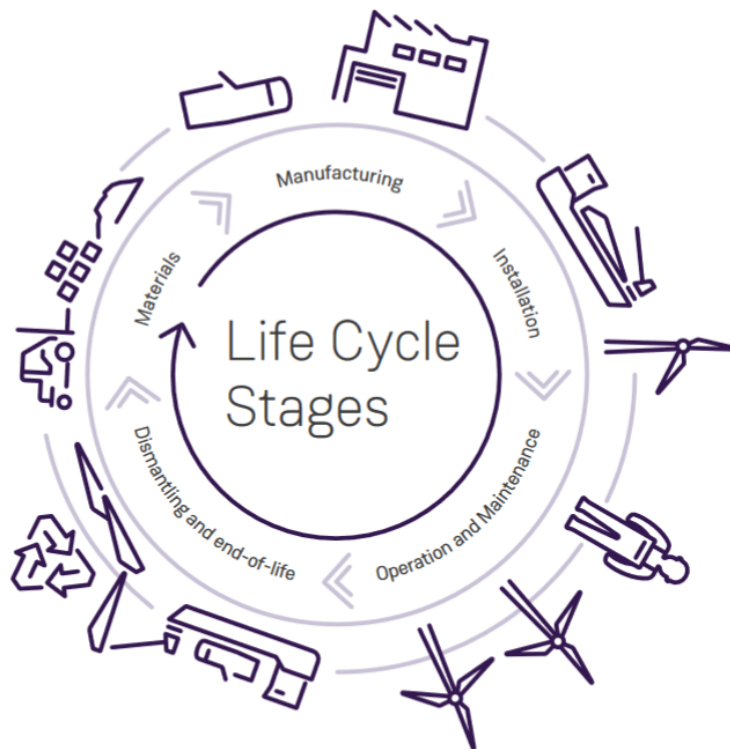


Kuvio 14 Vestas elinkaari. (Life Cycle Assessments of our turbines 2024)

Vestas määrittää tuulivoimaloidensa elinkaaren yllä olevan kuvan mukaan seuraavasti neljään päävaiheeseen:

<b>Valmistus:</b>	Turbiinin valmistus, perustusten valmistus, ulkoisten komponenttien ja järjestelmien valmistus
<b>Asennus:</b>	Komponenttien ja järjestelmien osien kuljetus työmaalle. Komponenttien ja järjestelmien asennus
<b>Käyttö:</b>	Tuotanto, huolto ja kunnossapito.
<b>Elinkaaren loppu:</b>	Purkaminen, kierrätys, kierrätyskelvottoman jätteen loppusijoitus, hävitys tai käyttö energiantuotannossa. (Life Cycle Assessments of our turbines 2024.)

### 5.3 Siemens Gamesa

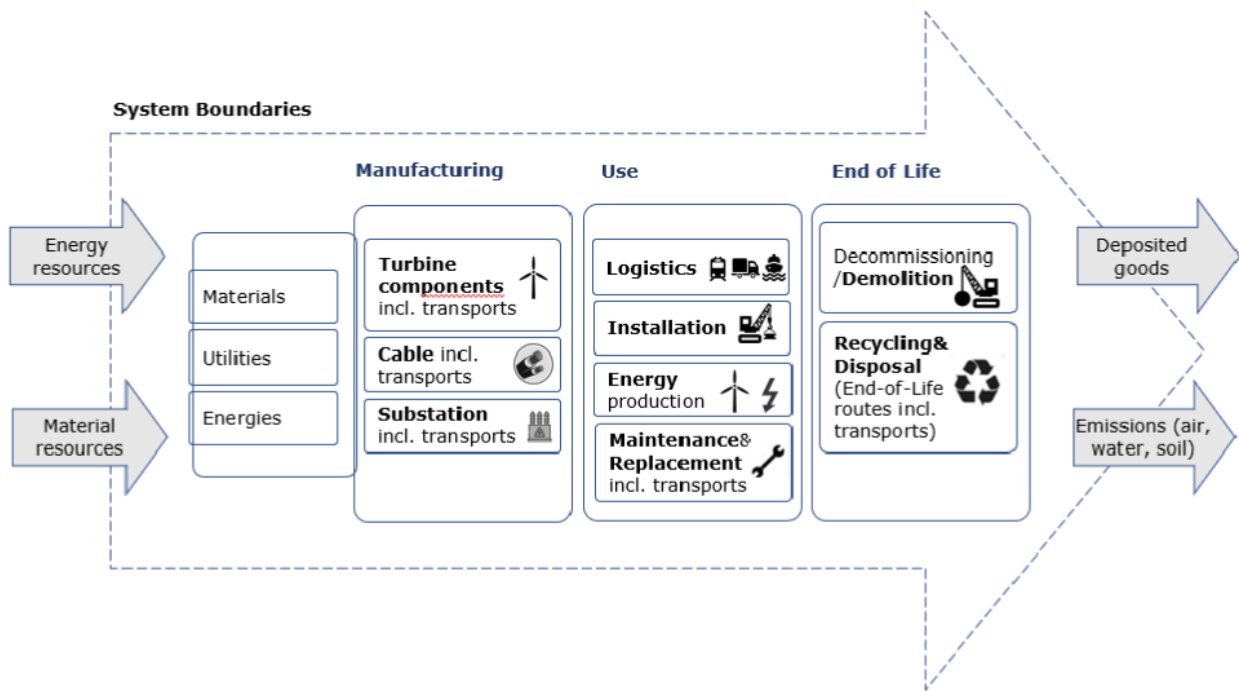


Kuvio 15 Siemens elinkaarimalli (Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD)

Siemens Gamesa jakaa yllä olevan kuvan mukaan tuulivoimalan elinkaaren viiteen päävaiheeseen:

<b>Materiaalit:</b>	Tuulivoimalan valmistamiseen vaadittavien materiaalien tuotanto
<b>Valmistus:</b>	Tuulivoimalan pääosien valmistus.
<b>Asennus:</b>	Asennus sisältää työmaan valmistelun, turbiinien pystyttämisen ja turbiinien liittämisen verkkoon.
<b>Käyttö ja huolto:</b>	Tuulivoimalan huolto ja ylläpito
<b>Elinkaaren loppu:</b>	Tuulivoimalan käyttöään saavuttaessa loppunsa, on myös sen elinkaaren lopun aika. Tuulivoimala puretaan ja kierrätyskelpoiset materiaalit kierrätetään, kierrätyskelvoton materiaali joko poltetaan tai sijoitetaan kaatopaikoille. (Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD.)

## 5.4 Nordex Acciona



Kuvio 16 Nordex Acciona elinkaari (LCA of a Nordex Windfarm with Delta4000 turbines. 2020)

Nordex Acciona jakaa yllä olevan kuvan mukaan yksinkertaistetummin tuulivoimalan elinkaaren kolmeen päävaiheeseen. Näitä ovat:

**Valmistus:** Sisältää materiaalien tuotannon, turbiinin komponenttien valmistuksen, kaapelien valmistuksen, sekä perustusten valmistuksen sisältäen myös näiden kuljetukset.

**Käyttö:** Käyttöön liittyvän logistiikan, tuulivoimalan asennukset, energian tuotannon ja huollon, sekä kunnossapidon.

**Elinkaaren loppu:** Alasajo ja purku, materiaalien kierrätys, sekä loppusijoitus kuuluvat tähän vaiheeseen. (LCA of a Nordex Windfarm with Delta4000 turbines. 2020.)

## 5.5 Tuulivoimaloiden käyttö ja kunnossapito Suomessa

### 5.5.1 Määritelmiä ja tunnuslukuja Suomen tuulivoimatuotannossa ja sijainnin vaikutus

Tuulivoimalat ovat kokoluokaltaan Suomessakin erikokoisia. Tämä aiheuttaa haasteita eri kokoluokan voimaloiden vertailuille toisiinsa nähden. Siksi tuulivoimalaitosten tuotantolukujen vertailuun käytetään apuvälineenä yleisimmin kahta eri tunnuslukua:

Tuotanto suhteutetaan nimellistehoon

$$\text{Huipunkäyttöaika} = \frac{\text{Tuotanto}}{\text{Nimellisteho}} = \frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$$

Tuotanto suhteutetaan roottorin pyörähdyspinta-alaan

$$\frac{\text{Tuotanto}}{\text{Roottorin pyörähdyspinta - ala}} = \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Näiden lukujen osalta pidetään rajapyykkeinä huipunkäyttöajalta 2400 h ja 1000 kWh/m<sup>2</sup>. Mikäli tuulivoimala ylittää nämä tunnusluvut, on se tuottanut poikkeuksellisen hyvin. Heikompiin tunnuslukuihin voi olla useita eri syitä. Näinä voidaan pitää esim. huonoja tuuliolosuhteita, suuria häiriötuntimääriä ja teknisiä vikaantumisia. Tuuliolosuhteisiin voivat vaikuttaa laitoksen sijoituspaikka tai vuosittain muuttuvat keliolosuhteet. Huomioon pantavaa on se, että mikäli laitos on suunniteltu heikoille tuulille eli siinä on poikkeuksellisen suuri roottori suhteessa generaattorin kokoon, antaa tällaisen laitoksen data edellä mainittujen kaavojen laskutoimituksista suuren huipunkäyttöajan, mutta pienen tuotannon pyörähdyspinta-alaa kohti. Vastaavasti tuulisille paikoille suunnitellun laitoksen data antaa täysin päinvastaiset luvut. Tuulisille paikoille suunnitellussa laitoksessa roottori on pieni suhteessa generaattorin kokoon. (Turkia, Holttinen 2013.)

Tuulivoimalaitoksen käytettävyyttä ja muita ominaisuuksia laskettaessa käytetään myös seuraavia tunnuslukuja:

**Seisokkiaika**, jonka yksikkö on tunti (h). Kaikki aika, jolloin tuulivoimalaitos ei ole käytössä. Sähköverkon aiheuttamat häiriöt lasketaan mukaan seisokkiaikaan, mutta siihen ei kuitenkaan lasketa, mikäli seuraavien syiden vuoksi voimala ei ole tuotannossa:

- Tuulennopeus alle laitoksen käynnistymisnopeuden
- Tuulennopeus yli myrskyrajan
- Lämpötila alle laitoksen toimintalämpörajan

**Tekninen käytettävyys**, jonka yksikkö on prosentti (%).

$$\text{Tekninen käytettävyys} = \frac{\text{Tunnit} - (\text{Seisokkiaika} - \text{Sähköverkkohäiriöt})}{\text{Tunnit}}$$

Normaalina kokonaisena vuotena tuntien arvo on 8760 tuntia (h).



Kuvio 17 Kuva tuulivoimalasta Lapissa (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2024)

Suomen maantieteellisen sijainnin ja keliolosuhteiden vaikutus käyttöön on merkittävä. Kylmyys asettaa omat tekniset vaatimuksensa Suomeen rakennettaville voimaloilla, tästä johtuen Suomeen asennettavat voimalat ovat lähes poikkeuksetta ns. "Cold Climate"- version voimaloita. Tästäkin huolimatta kylmyys aiheuttaa ongelmia laitosten toimintaan. Näistä yleisimpiä ovat esimerkiksi laitojen ohjausjärjestelmien tuulennopeuden mittaukseen tarkoitettujen mittaelinten jäätyminen, lapoihin kertyvä jää, sekä vaihteistoöljyn jäykistyminen pakkasessa. Tuulivoimalaitoksilla on määritetyt käyttölämpötilarajat. Mikäli alin käyttölämpötila alittuu, laitos pysäytetään. Suomessa käytössä olevilla tuulivoimaloilla alin käyttölämpötila voi olla jopa vain -15 celsiusastetta. Hiljattain ja nykyään Suomeen rakennettavissa laitoksissa, alin käyttölämpötilavaatimus valmistajalle on vähintään -25 celsiusastetta. Jos lämpötila alittaa laitokselle asetetun alimman käyttölämpötilan ja laitos pysäytetään, tätä ei lasketa mukaan seisokkiaikaan vaan se on ns. kylmäaikaa, joka lasketaan mukaan laitoksen suunniteltuun toimintaan. Turkia, Holttinen 2013.)



Kuvio 18 Jäätynyt tuulivoimalan lapa (Okka 2022)

### 5.5.2 Tekninen käyttö

Palmun (2017. s10) mukaan tuulivoiman käyttö jaetaan tekniseen ja kaupalliseen vastuualueeseen. Kaupallisella vastuualueella ovat sopimusasiat, rahoitukseen, laskentaan ja laskutukseen liittyvä, sekä tuotetun sähkön myynti. Tekninen käyttö, johon myös kunnossapito kuuluu, vastaa käytännössä siitä, että tuulivoimala pysyy käynnissä tavoitteita vastaavalla tasolla. Saksassa, jossa tuulivoimalla on pidempi historia, kuin meillä Suomessa, on tuulivoima-alalla tilanne, jossa tuulivoimaloiden huollosta vastaavat pääasiallisesti voimalavalmistajat. Tuulivoimaloiden käyttöään jatkuessa toiselle vuosikymmenelle, on kuitenkin syntynyt tilaa toimia myös riippumattomille huoltoyrityksille.

Suomessa tilanne on jokseenkin samankaltainen. Poikkeuksellisempaa verraten Saksaan on kuitenkin nyt rakentuvien ja viimeisten vuosien aikana rakennettujen voimaloiden osalta melko harvalukuinen määrä voimalavalmistajia. Tarkalleen ottaen käytännössä 2 eri valmistajaa on tällä hetkellä toimittajana valmistuvissa projekteissa. Näitä ovat Nordex Acciona ja Vestas. Kumpikin tuulivoimalavalmistajista tarjoaa omille tuotteilleen koko elinkaaren ajalle huolto- ja kunnossapitopalveluita ympärivuorokautisella etävalvonnalla. Luonnollisesti valmistajat myyvät myös varaosat tuotteisiin koko toimituslaajuudella. Vestas nettisivuillaankin mainiten, on maailman johtavia multibrändit hallitsevia tuulivoimaloiden huoltoa ja kunnossapitoa tarjoavia yrityksiä. Vestaksen huoltojen ja kunnossapidon piiriin kuuluu yli 57 000 tuulivoimalaa yli 77 eri maassa ympäri maailman. Brändejä, joihin Vestas tarjoaa kunnossapitopalveluita ja osamyyntiä ovat mm. Gamesa, Senvion, GE, Alstom, Suzlon, Nordex, sekä Siemens. (Vestas 2024)

Tuulivoimaloiden valmistajat ovat monessakin mielessä etulyöntiasemassa huolto- ja kunnossapitopalveluita tarjotessaan. Valmistajilla on yksinoikeus kaikkien valmistamiensa tuulivoimaloiden käyttötietoihin ja teknisiin dokumentteihin. Valmistajat ovat myös solmineet sopimuksia komponenttien toimittajien kanssa ja ovat ylivoimaisessa asemassa varaosien jälkimyynnissä verratessa muihin alalla toimiviin. (Palmu 2016.)

### 5.5.3 Käyttäjän vastuut

Tuulivoimalan teknisen käyttäjän vastuuseen sisältyy luonnollisesti itse tuulivoimalan käyttö. Tämän lisäksi tekniseen käyttöön lasketaan yleisesti kuuluvaksi Palmun (2017. s10) mukaan:

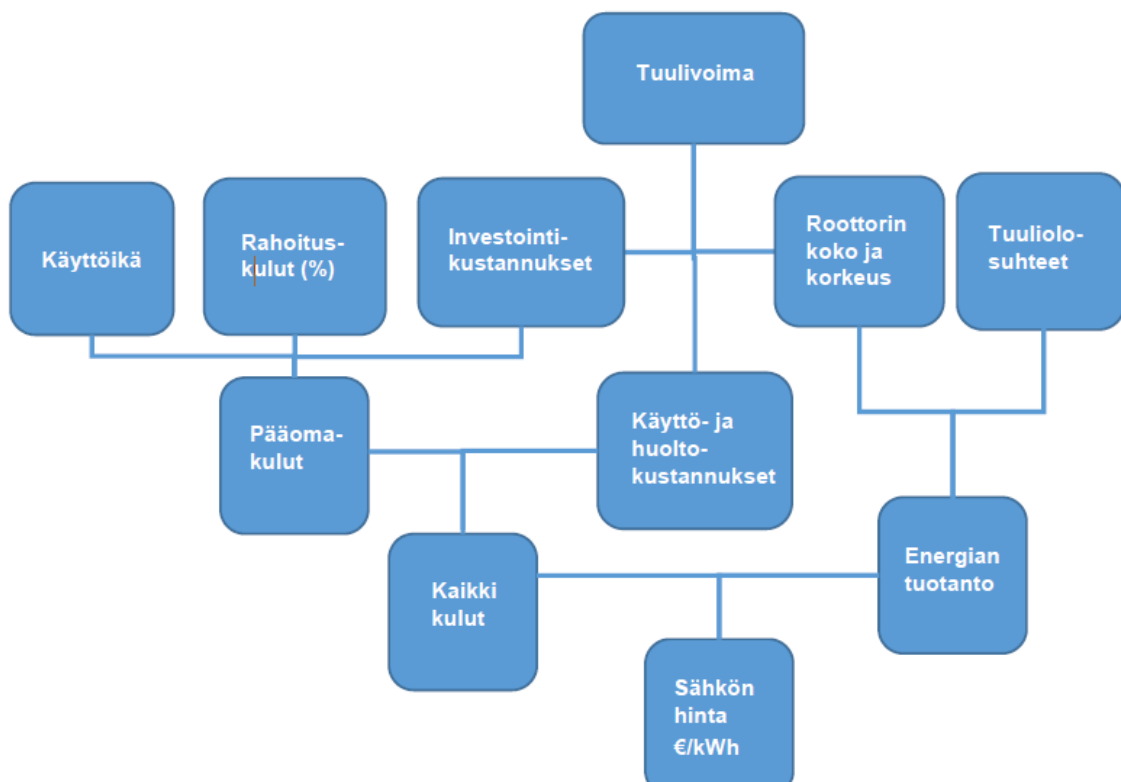
- Kunnossapidon ja tarkastusten organisointi ja mahdollisesti toteutus
- Puolivuotistarkastus
- Lapojen tarkastus
- Isommat kunnossapito- ja parannus toimenpiteet
- Kuntoon perustuva kunnossapito
- Kunnanvalvonta
- Valmistajan huolto-ohjelman seuraaminen
- Kuukausittainen raportointi
- Käytettävyyden optimointi

### 5.5.4 Käytettävyys

Kaikkien laitteiden luotettavan ja turvallisen toiminnan varmistamiseksi, on niitä huollettava säännöllisesti. Tuulivoimalat eivät ole poikkeus tässäkin asiassa ja niitäkin on huollettava. Huoltoihin kuuluu muun muassa öljyjen ja komponenttien vaihtoja. Tuulivoimaloidenkin kohdalla elinkaaren varhaisimmissa vaiheissa vikaantumisen riski on suurin, kun ilmaantuvat ensimmäiset viat, jotka yleensä johtuvat valmistus- ja rakennusvaiheessa tehdyistä virheistä. Näiden vikojen esiintyminen rajoittuu useimmiten takuuajalle ja ne jäävätkin valmistajan vastuulle. Ensimmäisen käytönaikaisen vaiheen, eli takuuajan jälkeen voimalat toimivat käytännössä havaitun mukaan parhaimmalla käytettävyydellä, vähäisesti vikaantuen. Ajallisesti puhutaan **2–10 vuodesta** voimalan käyttöön-oton jälkeen. On myös poikkeuksia, mutta useimmiten nämä vikaantumiset johtuvat ulkoisista syistä, kuten myrskytuulista tai linnuista törmätessään lapoihin. Vikojen määrä alkaa nousta voimalan iän ylittäessä ensimmäisen **10 vuotta**, viimeistään voimalan iän saavuttaessa **15 vuotta**.

Tuulivoimalan iän ylittäessä **15 vuotta**, on tehtävä päätös siitä, onko käyttöä tarkoitus jatkaa. Suuremmat kunnossapidolliset investoinnit ovat yleensä tarpeen tässä vaiheessa. 2000-luvulla valmistetut ja asennetut 1–3 MW tuulivoimalat ovat kuitenkin tämän päivän mittapuullakin moderneja ja niiden käyttöikää jatketaan usein kolmannelle vuosikymmenelle. (Palmu 2016)

Tuulivoimalan tekninen käytettävyys on useamman eri tekijän vaikutuksen tuottama tulos. Näitä ovat voimalan vikaherkkyyden lisäksi teknisen käyttäjän kyky reagoida muuttuviin tilanteisiin, varaosien ja resurssien saatavuus, sekä kunnossapidon suunnittelu, sekä organisointi. Teknillinen käyttäjä on vastuullisessa asemassa puhuttaessa vaikutuksista laitoksen käyttöikään. Käyttäjän odotetaan pitävän yllä selkeää ja täydellistä dokumentaatiota laitosta koskevista toimenpiteistä ja sen kunnosta. (Palmu 2016.)



Kuvio 19 Tuulivoimalan kustannukset (Palmu 2016))

Yllä olevasta kuviosta näemme tuulivoimalan kustannusten jakautumisen. Hyvin suunniteltu ja ajallaan toteutettu kunnossapito pitää yllä hyvää käyttökuntoa kaikissa voimaloissa ja laitoksissa. Tuulivoimala on arka kustannusten hallitsemattomalle kasvulle, mikäli sen käytettävyys on huono.

Tuulivoimala ikääntyy seisoessaankin ja ainut tapa millä voimala tuottaa tulosta kustannusten kattamiseksi, on energiantuotanto. Tekninen käyttäjä vaikuttaakin suoraan tuulivoimalan kannattavuuteen. On teknisen käyttäjän vastuulla saada käytettävyyttä maksimoitua, kuitenkin kunnossapitokustannukset huomioon ottaen. Kunnossapidossa tämä on se ikuinen kysymys, johon ainut reaali maailman vastaus on tasapainon ylläpitäminen, jotta toiminta on taloudellisesti kannattavaa. (Wind turbine maintenance guide 2012.)

Palmun (2016) mukaan, tuulivoimaloiden huoltojen ja kunnossapidon organisointi on ensimmäinen askel käytettävyyden varmistamisessa. Ennen käytön aloittamista, jotta käytettävyyden todentaminen on myöhemmin mahdollista, on tunnettava mitkä voimalan pysäytykset otetaan huomioon laskelmissa laskettaessa todellista käytettävyyttä. Kuten aiemmin kävimme läpi, esimerkiksi sähköverkon häiriöt eivät ole mukana laskelmissa, koska ne ovat voimalasta riippumattomia seikkoja. Saksassa on vuosien varrella tehty paljon tutkimusta tuulivoimaloiden luotettavuudesta ja vikojen yleisyydestä. Tilastointi näiden osalta ei ole onnistunut kovinkaan kattavasti.

Saman tyyppisiä havaintoja tehtiin tätä työtä varten suoritetuissa tutkimuksissa Suomen tuulivoimaloista. VTT: tehdessä vuosittaiset raportit aina vuoteen 2011 asti, on raportointi asiallista ja kattavaa. Nykyään Suomen Tuulivoimayhdistyksen vastatessa raportoinnista, kiinnitettiin huomiota, että tutkimusdataan ja voimaloiden käyttötietoihin perustuvaa tietoa ei enää ole julkisesti saatavana ja se mitä on saatavana, on kohdennetusti vain tuulivoimaa tukevaa. Palmu (2016) epäilee raportissaan tuulivoimavalmistajien pelkäävän silmätikuksi joutumista, voisiko sama olla Suomessa syynä, tätä ei tiedetä.

### 5.5.5 Tuulivoimaloiden kunnossapito Suomessa

Tuulivoimaloita koskee sama, kuin kaikkia muitakin koneita ja laitteita. Huolimatta siitä, että voimalan laitteistoilla ja niihin kuuluvilla osilla on omat huolto-ohjelmansa, tulee silti yllättäviä rikkoontumisia. Tuulivoiman kunnossapidolle suurimpia haasteita Suomessa onkin verrattain pitkän matkat verrattuna Saksaan ja Keski-Eurooppaan, kuten toteaa myös Palmu (2016) Suomessa omat vaatimuksensa kunnossapidolle asettaa myös vallitseva keli ja se tosiasia, että pääosa vuodesta on huomattavasti kylmempää verrattuna Keski-Eurooppaan. Kylmyys vaikuttaa myös huolto- ja korjauskustannuksiin, koska se rajoittaa suoraan esimerkiksi lasikuitua sisältävien tuulivoimalan lapojen korjausmahdollisuuksia. Korjaus kylmempään vuodenaikaan vaatii tällöin vähintään lämmitystyn teltan. Kylmyys vaikuttaa myös kunnossapitoa suorittavaan henkilöstöön, kylmässä väsy nopeammin ja paksu vaatetus haittaa liikkumista. Tuulivoimaa koskevat erityisvaatimukset kylmässä ilmanalassa huoltotarpeen ja käyttöiän määrittämiseksi eivät ole nykytietämyksen mukaan vielä selkeästi määritettyjä. VTT on tutkinut muun muassa jään kertymistä tuulivoimalan rakenteisiin, mutta tästä ei ole tehty selkeitä selvityksiä, kuinka jää vaikuttaa voimaloiden käyttöikään ja elinkaaren hallintaan Suomessa. Käytännössä ei ole olemassa tietoa, kuinka kylmä ilmanala ja jää rasittaa tuulivoimaloita verrattuna Keski-Euroopan voimaloihin. (Okka 2022 s15)

Olosuhteiden asettama vaatimustaso tuulivoimaloille onkin Suomessa korkeampi, kuin Baltiassa ja Keski-Euroopassa. Tämä kasvattaa kunnossapidon merkitystä ja Palmun (2016) sanoin *”ehkäpä voisi ottaa oppia merituulivoimasta, jonka yksi päätavoitteista on vähentää huoltokerrat kahdesta yhteen vuodessa”*.

Nykyaikainen tekniikka on mahdollistanut voimaloiden monitoroinnin etänä ja tarjoaa erinomaisia apukeinoja kunnossapidon toteuttamiseksi, kun voimalan komponenttien tilaa voidaan seurata reaaliaikaisesti etäyhteydellä. Tämä ei kuitenkaan korvaa säännöllisten määräaikaistarkastusten merkitystä, eikä jaksotetusta ja korjaavasta kunnossapidosta voida tuulivoiman osaltakaan luopua nyt, eikä tulevaisuudessa. Chan ja Mo:n (2017) sanoin *”Tuulipuistot ovat epäluotettavia energiantuotantolähteitä, jotka vaativat säännöllistä huoltoa.”*

Organisoitaessa tuulivoimalan kunnossapitoa primääritavoitteena on se, että tarvittava oikeassa paikassa oikeaan aikaan. (Palmu 2016) Tietysti mukana täytyy olla myös työhön tarvittavat työkalut ja materiaalit. Kunnossapidon vastuuseen kuuluu myös kustannusten minimointi ja asiakkaan toiveisiin vastaaminen mahdollisuuksien rajoissa parhaan kyvyn mukaan.

Tiivistäen Chan ja Mo:n (2017) tutkimuksesta, tuulivoimaloiden kunnossapidossa on tärkeää priorisointi. Asiakkaan vaatimukset, vikaantumishistoria, suunnitellut seisokit ja vallitsevat sääolosuhteet on tunnettava, jotta tämä onnistuu. Tuulivoimaloiden kunnossapito on luonteeltaan liikkuvaa työtä, sen omine erityispiirteineen. Tämä asettaa omat vaatimuksensa varaosat ja materiaalit työkohteeseen tai työryhmälle järjestävälle taholle. Lisäksi on vielä otettava huomioon huolto- ja kunnossapitotöissä syntyneen jätteen käsittely ja toimitus kierrätyspisteisiin.

Tuulivoimalan huolto-ohjelmaan kuuluu tyypillisesti kaksi huoltoseisokkia vuodessa. Näistä toinen on pienempi puolivuosihoito ja toinen suurempi varsinainen vuosihuolto. Seisokin pituus voi olla puolivuosihoitossa lyhimmillään jopa puoli päivää, mutta käytännössä voimalalle varataan kunnossapidon työryhmälle seisokkijaksi aina vähintään kokonainen päivä. Todellinen seisokin kesto voi olla lyhyempi. Varsinaisessa vuosihuollossa seisokin pituus on pidempi, mahdollisesti jopa 2 päivää. Kunnossapidon työryhmä, joka suorittaa tuulivoimaloiden huoltoja, on suuruudeltaan yleensä 2 henkilöä, jotka liikkuvat samalla ajoneuvolla. (Chan, Mo 2017 s330)

Kaikissa laitoksissa, kuten myös tuulivoimaloissa, on huoltoseisokin aikana erityisen tärkeää työryhmän pysyä valppaana ja tarkastusten lisäksi huoltoa suorittaessaan kiinnittää huomiota ympäristöön: Oudot äänet, valumat, kulumisen jäljet, ylimääräiset kappaleet turbiinihuoneessa... jne jne. Kaikki nämä ovat seikkoja, jotka voivat kieliä pian tapahtuvasta odottamattomasta vikaantumisesta. Tuulivoimaloita hallitaan käytännössä kokonaan etänä ja tähän kuuluu myös laitteistojen etämonitorointi, sekä kunnonvalvonta. Aiemmin jo totesimme, että fyysisesti paikalla olevan työryhmän suorittamille tarkastuksille ei kuitenkaan ole korvaajaa. Onkin ensiarvoisen tärkeää, että tuulivoimaloiden saadessa suhteellisen vähän tällaista huomiota käyntijaksojensa aikana, käytetään kaikki huoltohenkilöstön läsnäolotunnit tehokkaasti hyödyksi. Tarkastuskäyntien määrää on

hankala lisätä, koska tällöin kustannukset karkaavat helposti käsistä. (Palmu 2016) Tuulivoimalan huoltoon kuuluvat myös öljynvaihdot. Hydraulikkaöljyt vaihdetaan yleensä 2 vuoden välein ja vaihteistoöljyt 3 vuoden välein. Käytännössä vaihteistoöljyjen osalta ei kuitenkaan varsinkaan meillä Suomessa noudateta orjallisesti tällaista järjestelyä, vaan öljyt vaihdetaan jopa useammin ja nimenomaan öljyn kuntoon perustuen. Vaihteistoöljy on kaikissa moderneissa voimaloissa kytetty kunnonvalvonnan piiriin ja sitä voidaan monitoroida etänä. (Mäkinen 2019.)

Lavat ovat tuulivoimalan ehkä ulospäin näkyvin osa ja niillä on myös tärkeä rooli voimalan toiminnassa. Lapojen kunnolla on suora vaikutus voimalan suorituskykyyn sähköntuotannossa. Lapakulmat tulee olla synkronoitu lapojen kesken, sekä kalibroitu ohjausjärjestelmässä. Jos lapojen välillä on samassa säädössä eroavaisuuksia lapakulmissa, se aiheuttaa ennen aikaista kulumista voimalan komponenteissa ja heikentää tuotantotehokkuutta. Lapojen kunto tarkastetaan useimmiten laskeutumalla köysien varassa lapaa pitkin ja silmämääräisesti arvioiden lavan kunto. Lapoja myös koputellaan sisäisten ja rakenteellisten vaurioiden havaitsemiseksi. Mikäli lavassa on lämmitys, sen toiminta tarkastetaan samalla, sekä lapoihin asennettujen ukkosenjohtimien kunto. Lavat tarkastetaan yleensä 2 vuoden välein, mutta tässäkin on vaihtelua. Tuulisemmilla paikoilla ja varsinkin merituulivoimaloissa lavat tarkastetaan vähintään vuosittain. Lapojen tarkastuksessa käytetään apuna myös kehittyneitä menetelmiä, kuten ultraäänimittaus, lasermittaus, sekä kameralla varustetulla dronella kuvaaminen. Näiden teknologioiden kehitys lapojen diagnostiikkaan on kuitenkin vasta alkusuoralla ja lavan tarkastaminen lapaa pitkin laskeutumalla on toistaiseksi luotettavimpana pidetty menetelmä. (Palmu 2016)

Kappaleessa 5.5.1 käsiteltiin Suomen maantieteellisen sijainnin vaikutusta tuulivoimatuotantoon. Suomeen rakennettavat tuulivoimalat ovatkin lähes poikkeuksetta cold climate- malleja. Valmistajilla on omat jaksoitettuun kunnossapitoon perustuvat huolto- ja tarkastussuunnitelmat kaikille eri voimalatyypeille ja -malleille. Suomessa on pyritty ottamaan mahdollisuuksien mukaan kunnonvalvonnan piiriin tuulivoimaloiden järjestelmiä. Näin komponenttien kuntoa pystytään seuraamaan etänä reaaliaikaisesti. Esimerkiksi vaihteisto, generaattori ja voimansiirron akselit ovat vahvasti etämonitoroituja. Puhutaan online Condition Monitoring:ista. Voimansiirto on kriittinen osa tuulivoimalaa ja vaikka määräaikaistarkastuksessa vaihteiston todettaisiin olevan määrättyjen toleranssien rajoissa, on mahdollista, että tarkastusten välillä tapahtuu odottamatonta kulumista, joka johtaa kriittisiin vaurioihin, jos sitä ei havaita ajoissa. CMS onkin tärkeässä asemassa laitoksen

toiminnan kannalta, näin voidaan ennalta ehkäisevillä toimenpiteillä saada aikaan merkittäviä kustannussäästöjä. Kerättyä dataa voidaan hyödyntää myös tulevaisuuden huoltojen suunnittelussa. Tornia, lopoja ja muita voimalan rakenteellisia osia monitoroidessa, terminä käytetään Structural Health Monitoring:ia. Suuria haasteita kerätyn datan analysoinnille asettaa kuitenkin tuulivoimaloissa tuulen mukaan muuttuva tuotantoteho, jonka takia voimalan rasitus muuttuu koko ajan. Referenssiarvoihin vertaaminen voi olla jopa mahdotonta tai vähintään vaatii laajaa kokemusta analysoijalta. (Walford 2006) Euroopassa ja Suomessa on kuitenkin saatu myönteisiä kokemuksia molempien järjestelmien käytöstä, ja ne ovat parantaneet todistetusti laitosten kustannustehokkuutta, toteaa Palmu (2016).

Tuulivoimalan käyttöiän aikana siihen liittyvät vastuu- ja omistajuussuhteet saattavat joskus muuttua. Vastuun siirtyminen on yleisesti luonnollinen osa voimalan elinkaarta, kun sen takuu-aika päättyy. Voimalalle on voitu myös solmia huoltosopimuksia, joilla on tietyt määräajat. Määräaikaisten päättyessä vastuu siirtyy takaisin omistajalle tai omistajan osoittamalle taholle. Tuulivoimalan laskennallisen eliniän kunnossapidon kannalta kriittisimmät vuodet ovat oikeastaan sen viisi viimeistä, kun on aika tehdä päätöksiä, jatketaanko laitoksen käyttöä. Tässä laitoksen elinkaaren vaiheessa kantaa hedelmää, jos laitos on pidetty hyvässä käyttökunnossa ja kaikki huollot on suoritettu asianmukaisesti, sekä dokumentoitu tarkasti. Tuulivoimaloissakin pätee se tosiseikka, että vaikka kaikki valmistajan määräämät huollot ja korjaukset on suoritettu, ei se välttämättä vielä kerro todellisuutta laitoksen oikeasta käyttökunnosta. Tuulivoimalan komponentit ovat jatkuvassa rasituksessa, eivätkä pelkästään huolloissa kerätty dokumentaatio kerro tarkkaa kuvaa kulumisesta tai korroosiosta laitoksen osissa. Parhaimman kuvan laitoksen kunnosta antaa sen koko käyttöiän aikainen CMS ja SHM-dokumentaatio. Laitoksen takuun loppuessa ja vastuun siirtyessä valmistajalta omistajalle, voi pahimmassa tapauksessa koko laitoksen kunnonvalvonnalla kerätty dokumentaatio olla omistajan saavuttamattomissa. Valmistajat eivät nimittäin jaa tietoa ja dokumentaatiota kovinkaan helposti, jollei siitä ole sopimuksellisesti sovittu. (Palmu 2016)

## 6 Tuuliturbiinin vikaantuminen

### 6.1 Vikaantumiset Suomessa ja Euroopassa

Tuulivoimalat ovat luotettavuudeltaan heikkoja energiantuotannon lähteitä, jotka vaativat säännöllistä huoltoa ja jatkuvaa monitorointia. Voimaloiden on sopeuduttava jatkuvasti erilaisiin kuormiin, muuttuvien ja arvaamattomien tuuliolosuhteiden vuoksi. Tuulivoimaloiden järjestelmävikoja aiheuttavat usein jo pelkästään käyttöolosuhteet. Tuuliturbiinien luotettavuus on täysin riippuvainen yksittäisistä pääkomponenteista. Vaihteisto on tuuliturbiinin voimansiirron vikaantuvimpia osia, voimalan toiminnan kannalta se on erittäin kriittinen, koska vaihteiston vikaantuessa, tuotanto lakkaa. (Chan, Mo 2017 s329) Vaihteiston odottamattoman vikaantumisen aiheuttamat seikat ovat myös kokonaiskustannuksiltaan kalliita. (Palmu 2016)

Tuuliturbiinin luotettavuuteen vaikuttavat pääasiassa suunnittelu ja valmistuksen laatu. Käyttöympäristö asettaa kuitenkin omat vaatimuksensa turbiinille, joita ei välttämättä aina voida täysin ottaa huomioon etukäteen. Tuulivoimaloissa esiintyvien vikaantumisten moninaisuus, kattaen käytännössä koko turbiinin voimansiirron, kertoo osaltaan luotettavuuden ylläpidon haastavuudesta tuulivoimaloissa, ja siitä ettei kaikkia syitä vikaantumisiin ole todella vielä ymmärretty, toteaa Walford (2017 s15)

Pohjoisessa ilmastossa sijaitsevien tuulivoimaloiden osalta turbiinien voimansiirron raskat osat ovat suhteellisesti vielä raskaampia. 90-luvun alkupuolelta asti tuulivoimaloiden voimansiirron akselien ja laakerointien vaurioiden vikaantumistutkimuksissa on todettu merkittävimmäksi tekijäksi, yli 50 % tapauksista, raskuus. (Palmu 2016)

Turkia ja Holttinen (2013) esittävät raportissaan Suomen tuulivoimalaitosten komponenttien vikaantumisia ajalta 1996–2011, josta on poimittu seuraavan sivun taulukko.

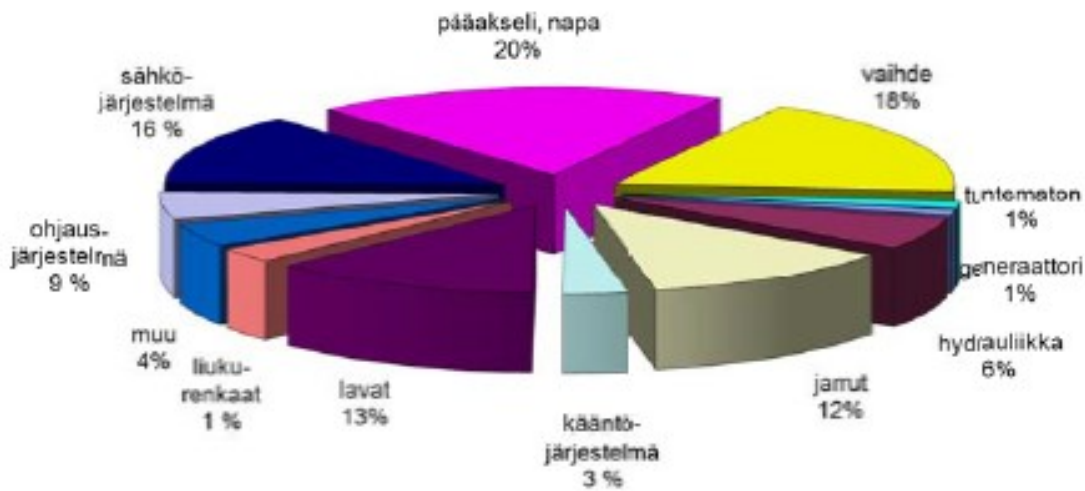
Komponentti	Vika-aika yhteensä	% vika-ajasta	Vikojen lkm
anturit	550	1.3 %	12
gen. laakerit	448	1.0 %	3
generaattori	5	0.0 %	1
hydrauliikka	2593	6.0 %	13
ilmajarrut	2869	6.6 %	8
jäähdytys	915	2.1 %	9
kaapelit	120	0.3 %	1
kondensaattorit	81	0.2 %	1
kääntöjärjestelmä	1193	2.7 %	10
kääntömoottori	157	0.4 %	4
lapa	1731	4.0 %	5
lapakulman säätömekanismi	8476	19.5 %	60
lavan pultit	429	1.0 %	3
liukurenkaat	1230	2.8 %	4
mekaaninen jarru	5327	12.3 %	10
muu	1908	4.4 %	17
ohjausjärjestelmä	447	1.0 %	10
ohjausyksikkö	327	0.8 %	3
roottori	528	1.2 %	1
roottorin laakerit	115	0.3 %	2
tehoelektroniikka	3555	8.2 %	40
tehomuuntaja	1828	4.2 %	8
vaihdelaatikko	6956	16.0 %	22
vaihteen akseli	954	2.2 %	2
verkkoonkytkentä	104	0.2 %	2
tuntematon	606	1.4 %	14
<b>Yhteensä</b>	<b>43452</b>	<b>100.0 %</b>	<b>265</b>

Kuvio 20 Tuulivoimaloiden vikaantumiset Suomessa (Turkia, Holttinen 2013)

Taulukkoa tarkastellessa voidaan havaita kolme tuulivoimalan komponenttia, joiden vika-aika on merkittävästi muita korkeampi, useimpiin seuraavaksi suurimmat vika-ajat omaaviin verrattuna, jopa kaksinkertainen. Näitä ovat

- Lapakulman säätömekanismi 19,5 %
- Vaihdelaatikko eli vaihteisto 16,0 %
- Mekaaninen jarru 12,3 %

Vikojen aiheuttamat käyttökatkot vuonna 2011  
yhteensä 43452 h, 58 laitosta, 101 MW (keskiarvo 9 % ajasta)



Kuvio 21 Vikaantumisten aiheuttamat käyttökatkot vuonna 2011 (Turkia, Holttinen 2013)

Turkia ja Holttinen esittävät raportissaan yllä näkyvän kaavion vikojen aiheuttamista käyttökatkoista suomen tuulivoimaloissa vuonna 2011. Alla on vuonna 2016 julkaistussa Palmun (2016) tutkimuksessa esitetty taulukko yleisimmistä vioista tuulivoimaloissa vuosina 1990–2006 Saksassa.

Järjestelmä	Vikatyyppi 1	Vikatyyppi 2	Vikatyyppi 3	Vikatyyppi 4	Vikatyyppi 5	
Lapa- säätö (Pitch)	Sähk.:	Akku	Moottori	Invertteri	Lavan laakeri	Lämpö- tai kosteus-antura
	Hydr.:	Proportio- naaliventtiili vuotaa	Magneetti- venttiili vuotaa	Sylinteri vuotaa	Paikannus- anturan	Öljynpaine- anturan
Invertteri	Generaattorin - tai verkonpuo- leinen vika	Generaattorin nopeussig- naali	Suojaus (crowbar)	Jäähdytys	Ohjaus- järjestelmä	
Nasellin ohjaus (yaw)	Voitelussa vika	Tuulen suunnan signaali	Ohjain	Hydrauliikka- sylinteri	Jarrun venttiili	
Ohjaus- järjestelmä	Lämpö- anturassa vika	PLC:n analog. Input	PLC:n analog. Output	PLC:n digit. Input	PLC:n digit. output	
Generaattori	Kuluneet harjakset	Staattorin lämpöantura	Encoder	Laakeri	Tuuletin	
Vaihde- laatikko	Planeet- tavaihde	Nopean akselin laakerit	Keskinopean akselin laakerit	Planeetta- vaihteen laakerit	Voitelussa vika	

Kuvio 22 Tärkeimmät vikatilat 6:sa kriittisimmässä järjestelmässä (Palmu 2016)

Verrattaessa näitä kaikkia edellä esitettyjä taulukoita ja kaavioita keskenään voidaan havaita, että samat vikaantumiskohteet ovat edustettuina, sekä Saksassa, että Suomessa. Kappaleessa 4.2, jossa on käsitelty Suomessa käytössä olevien tuulivoimaloiden rakennetta, kerrotaan rakenteen olevan yleisesti vastaavanlainen, kuin Saksassa. Tämä selittää osaltaan yhteneväisyydet vikaantumistilastoissa.

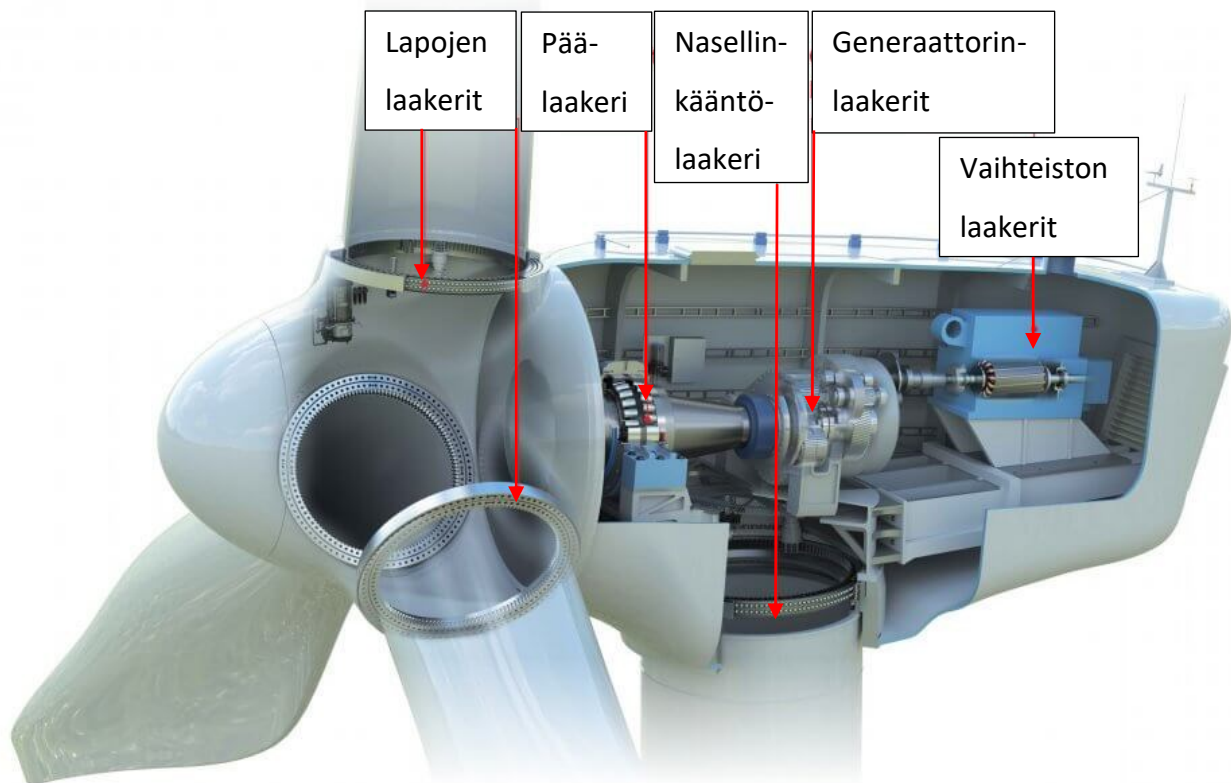
## 6.2 Vikaantuminen tuulivoimalan eri osissa

Tuulivoimalan torni, perustus, lavat, sekä napa ovat voimalan osia, jotka ovat rakenteellisen kunnon monitoroinnin piirissä. Näissä voimalan osissa esiintyviä rakenteellisia vikoja ovat pääasiassa materiaalin väsymisestä johtuvat halkeamat ja niin kutsuttu delaminaatio. Delaminaatio on termi, jolla tarkoitetaan Orantie, Kuosa, Häkkä-Rönholm:ia (2001 s6) lainaten, *että pinnoite irtoaa alustastaan tai erilliset pinnoitekerrokset irtoavat toisistaan*. Tämän tyyppiset viat voivat kehittyä pitkänkin ajan kuluessa ja edetä täysin ennustamattomalla nopeudella johtuen tuulivoimalaan kohdistuvista epäsäännöllisistä ja suuruisista kuormituksista. Käynnistymisen voivat aiheuttaa jään kertyminen voimalan rakenteisiin, poikkeuksellisen voimakkaat tuulet tai tuulen voimakkuuden ja suunnan vaihtelu, muutamia mainiten. Jarrujen vikaantuminen tai voimalan osissa olevat valmistusvirheet, kuten hitsaussaumojen virheet ovat suhteellisen yleisiä tapauksia. Voimalan rakenteen liitoksien kiinnityspulttien löystyminen tai särkyminen on myös huomioon otettava riskitekijä, joka voi johtaa merkittäviin vaurioihin. (Chan, Mo.2017 s173).

Tornin huipulla sijaitsee nasellin kääntöjärjestelmä. Sen tehtävänä on pitää roottori optimaalisesti tuuleen suunnattuna. Nasellin kääntö voi olla toteutettu sähköisesti tai hydraulisesti. Kääntöjärjestelmää ohjaa tuulen suuntaa tunnusteleva mittaelin, sekä anemometri. Anemometrilla mitataan tuulen nopeutta. Vikaantuminen näissä laitteissa voi aiheuttaa merkittäviä kuormituksia tuulivoimalalle, koska tällöin voimalaan kohdistuu suuria rasituksia, joita rakenteelle ei ole suunniteltu. Syynä tähän on tuulivoimalan lapoihin kohdistuvan tuulen aiheuttama suuri vääntömomentti nasellin kääntömekanismille, mikäli naselli ei ole suunnattu oikein tuulta vasten, tiivistäen mitä Hietala tuo ilmi opinnäytetyössään (2020 s45). Mahdollista on myös, ettei voimalan automaatio aja voimalaa alas tuulenopeuksien kasvaessa liian suureksi tai lapojen kulma ei säädy tuulenopeuksien mukaan. Tällaisessa tilanteessa voimalan voidaan ajatella olevan ”tuuliajolla” ja sen rakenteeseen voidaan olettaa kohdistuvan hallitsemattoman suuria rasituksia, mikäli normaalia käytitilannetta ei palauteta. Tästä syystä tuulivoimaloiden etähallinnassa huomioidaan myös alueella

sijaitsevien muiden voimaloiden mittaamia säätietoja ja viime kädessä voimalaa valvova henkilö tekee päätöksen voimalan alasajosta. (Blaabjerg, Liivik 2018 s18)

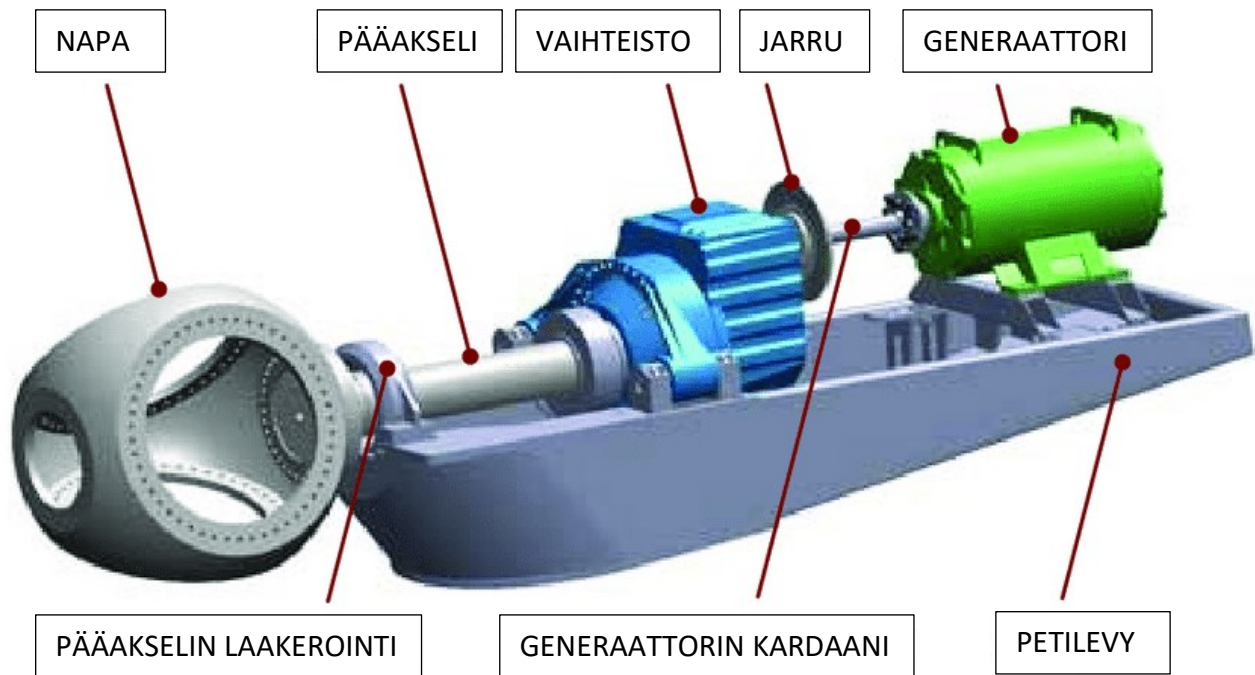
Lavat ja napa muodostavat yhdessä turbiinin roottorin. Lapojen kiinnitys napaan on laakeroitu, jotta niitä voidaan kääntää suhteessa napaan. Napa on kiinteästi kiinnitetty pääakseliin. Lapakulman säätö on yksi vikaherkimmistä tuuliturbiinin osista ja sisältää useita kuluvia osia, eritoten, jos se on toteutettu sähköisesti. (Annola 2022 s16)



Kuvio 23 Tuuliturbiinin laakeroinnit (Muokattu. Corey Bayles 2020.)

Roottorin napaan kohdistuu raskaita ja vaihtelevia kuormia. Tämä jatkuva kuormitusten muuttuminen voi aiheuttaa vaurioita navan kiinnitykseen pääakselille, katkoa kiinnityspultteja tai aiheuttaa nopeaa ennenaikaista kulumista navan laakerointeihin. Lapojen kiinnitys saattaa löystyä, lapojen rakenne kiinnityspisteen lähellä halkeilla tai lavan laakerointi vaurioitua. Laakerointien vierintäelimet voivat muun muassa lohkeilla, sirpaloitua, naarmuuntua, valssautua tai ylikuumentua ja menettää lujuutensa. Lapojen säätöjärjestelmässä on suuri määrä liikkuvia osia ja pääasiassa vikaantumissyitä ovatkin voitelusta johtuvat syyt ja/ tai korrosio. Lavoissa voi esiintyä rakenteellisia vikoja, jotka pääasiassa liittyvät komposiittirakenteen väsymiseen. Näitä vikoja ovat halkeamat, eroosio ja delaminoituminen, jota käsitelimme tämän osion alussa. (Blaabjerg, Liivik 2018 s174) Halkeamia löydetään yleensä lapojen juuresta, johon kohdistuu suurin vääntömomentti lavassa suuren vipuvarren vuoksi. Lapojen merkittävämmät vauriot saattavat syntyä lapakulman säätöjärjestelmän vikaantuessa, jolloin yksittäisen lavan vastus tuulta vasten saattaa lisääntyä merkittävästi. Lapakulman säätöjärjestelmän vikaantuminen voi johtua tuulennopeuden tai suunnan mittauksen häiriöstä tai vikaantumisesta. Vaihtelevat tuulennopeudet ja myrskytuulet aiheuttavat kuitenkin suurimman osan lapojen merkittävästä vioittumisesta.

Nasellin sisällä sijaitsevat generaattori, sekä laitoksen ohjausjärjestelmä ja voimasähköjärjestelmä. Nopealle akselille kiinnittyvä generaattori muuntaa pyörivän liikkeen sähköenergiaksi. (Hietala 2020 s25). Generaattorin viat voivat johtua kahden erityyppisestä syystä, joko sähköisistä tai mekaanisista syistä. Yleisimmät sähköiset vikaantumiset ovat generaattorin käämien oikosulut tai vaurioituneet piirit. Mekaanisesti generaattori vikaantuu useimmissa tapauksissa laakeroinneistaan. Laakeroinnin vikaantumiseen johtavia syitä voivat olla laakerielinten halkeilu tai voitelun pettämisestä johtuva kuluminen. Mikäli voimansiirto on epätasapainossa, esimerkiksi akselien linjauksivirheen vuoksi tai roottoriin kertyneen jään vuoksi, on mahdollista, että epätasapainotilanne vaurioittaa generaattorin laakerointeja. Korrosio ja/ tai lika aiheuttaa myös vikaantumisia generaattoreissa. (Blaabjerg, Liivik 2018 s174)



Kuvio 24 Tuuliturbiinin voimansiirron rakenne. (Muokattu. Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing 2011)

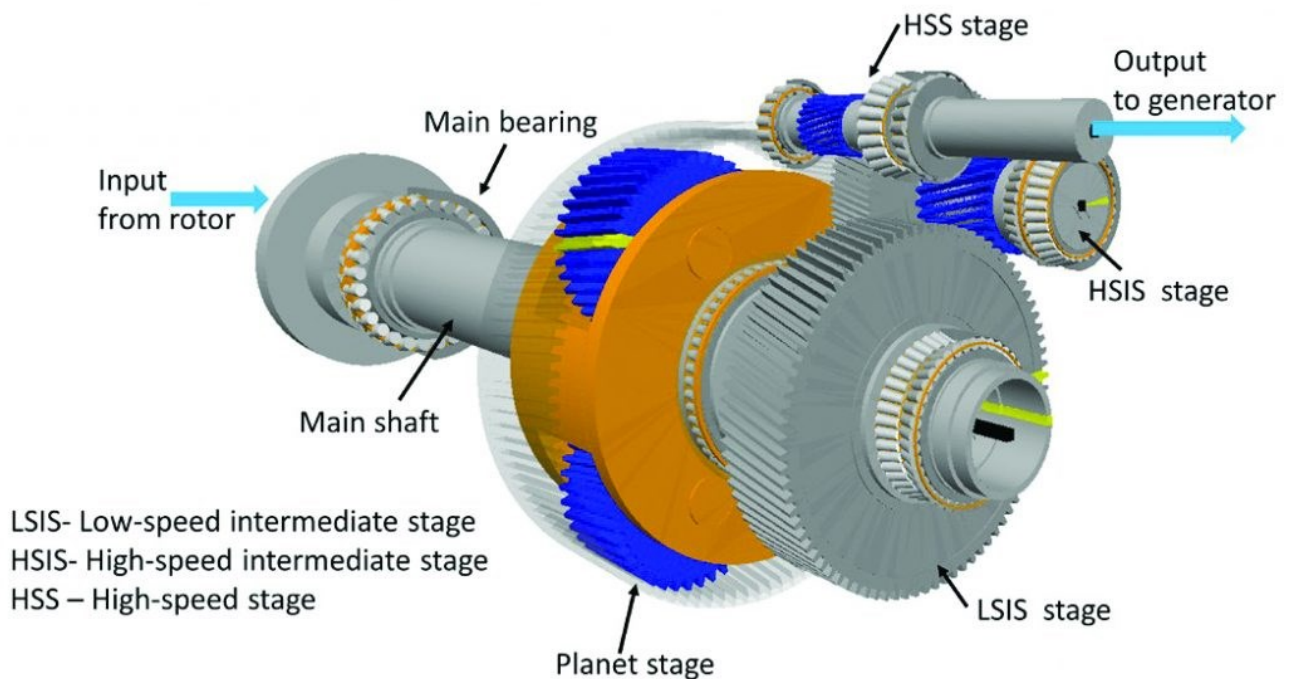
Hietalan mukaan (2020 s25) turbiinin voimansiirron pääelementit ovat hidas voimansiirto, vaihteisto ja nopea voimansiirto. Roottorin pyörintäliike on välitetty turbiinin **pääakselin** kautta vaihteiston hitaalle akselille, puhutaan myös holkkiakselista. **Hitaan akselin, sekä roottorin**, pyörimisnopeus on yleensä **5–30 kierrosta minuutissa** ja **nopean akselin, sekä generaattorin** pyörimisnopeus **750–1500 kierrosta minuutissa**. Vaihteiston tehtävänä on muuttaa roottorin hidas pyörintänopeus generaattoria varten suuremmaksi. Vaihteistolta suurempi pyörintänopeus siirtyy generaattoriin nimenomaan nopean akselin välityksellä, puhutaan myös HSS, eli **High Speed Shaft**:ista. Nopealle akselille on useimpien valmistajien turbiineissa asennettu **mekaaninen jarru**, joka on tarkoitettu toissijaiseksi turvajärjestelmäksi, eli lähinnä roottorin pyörinnän estämiseen seisokkien aikana. Sitä ei ole tarkoitettu pysäyttämään käynnissä olevaa tai ryntäävää tuulivoimaa ja kuten Annola (2022) mainitsee opinnäytetyössään, siivet ovat käytännössä ainoa tekijä, jolla voimaa voidaan tarvittaessa pysäyttää. Voimansiirron kaikissa osissa voi ilmetä havaittavaa värinää, mikäli minkä tahansa komponentin laakeroinneissa tai muissa pyörivissä osissa on epätasapainoa, yli toleranssien tapahtunutta kulumaa tai muita mekaanisia vaurioita, kuten halkeilua. Tätä värinää voidaan havainnoida värinämittausvälineillä ja tuloksia käyttää apuna vian diagnosoinniseksi.

Vaihteiston vikaantuminen on yleisin tuuliturbiinin tuotannon pysäyttämisen tai pysähtymisen aiheuttava vikaantuminen. Vaihteiston vikaantumisten aiheuttamien suurten kustannusten ja tuotantotappioiden vuoksi vaihteistoista on tehty paljon tutkimusta ja niiden kehittämiseen on panostettu merkittävästi. (Chan, Mo 2017 s329) Vaihteiston hammasvälitysten vikaantumisen yleisimpiä syitä ovat voitelun virheet, puutteellinen tiivistys/ vuodot, öljyn alhaisen määrän aiheuttama öljyn nopea likaantuminen, nopea kuluminen, komponenttien materiaalien väsyminen, sekä pyörivien akselien epätasapaino. Vaihteiston osista useimmin kriittisesti vikaantuva osa on planeettavälitys ja sen osat. (Blaabjerg, Liivik 2018 s175)

Seuraavissa osioissa on käyty läpi tarkemmin kahta vikaantumisiltaan merkittäväntä ja kriittisintä tuulivoimalan komponenttia ja niissä esiintyviä vikoja, vikojen syntymekanismeja, sekä niihin liittyviä ilmiöitä.

### 6.3 Vaihdelaatikko, vaihteisto eli vaihde

Nykypäivänä tuulivoimaloissa käytettävät vaihteistot ovat tyypillisesti planeettavaihteistoja. Kokoluokasta riippuen, planeettavälityksiä voi olla 1 tai vaihtoehtoisesti planeettavälitys voidaan porrastaa useampaan vaiheeseen. Tyypillisesti 2 MW kokoluokassa planeettavälityksiä on 1. Huolimatta siitä montako porrasta modernissa tuulivoimavaihteessa on, sisältää se silti useita välitystä kasvattavia välitysportaita. (Wind Turbine Maintenance Guide 2012 s36)

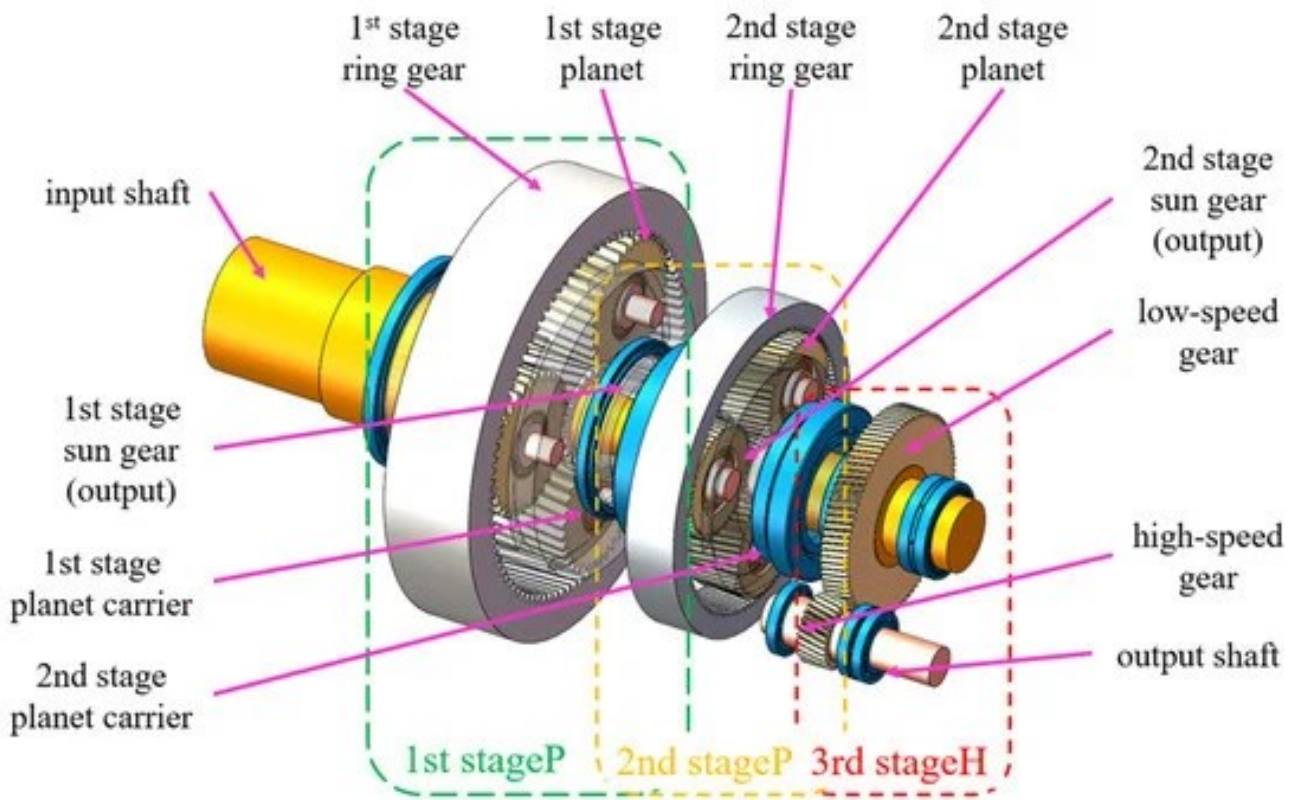


Kuvio 25 Tuulivoimavaihteiden välitykset (Fundamentals of Wind Turbines Wind Systems Magazine)

Yllä olevasta kuvista voidaan tunnistaa vaihteiston hammasvälityksiä ja seuraavat vaihteiston ja voimansiirron pääkomponentit:

- Main shaft	=	Pääakseli
- Main bearing	=	Pääakselin laakerointi
- Planet stage	=	Planeetta välitys/ -porras
- Low-speed Intermediate stage	=	Hitaan väliakselin välitys
- High Speed Intermediate Shaft	=	Nopea väliakselin välitys.
- High Speed Shaft Stage	=	Nopean akselin välitys

Mikäli tuulivoimavaihteessa on useampia planeettaportaita, jakaantuu vaihteiston rakenne esimerkiksi alla olevan kuvion mukaan:



Kuvio 26 Kahdella planeettaportaalla olevan tuulivoimavaihteen välitykset (Cui Yi-Fan, Dong Lian-Jun, He Wei-Dong, Zhang Ying-Hui. 2024.)

- Input shaft	=	Pääakseli
- 1 <sup>st</sup> stage ring gear	=	1 portaan hammaskehä
- 1 <sup>st</sup> stage planet carrier	=	1 planeettaportaan planeetankantaja
- 1 <sup>st</sup> stage planet	=	1 planeettaportaan planeettahammaspyörä
- 1 <sup>st</sup> stage sun gear	=	1 planeettaportaan aurinkoakseli
- 2 <sup>st</sup> stage ring gear	=	2 portaan hammaskehä
- 2 <sup>st</sup> stage planet carrier	=	2 planeettaportaan planeetankantaja
- 2 <sup>st</sup> stage planet	=	2 planeettaportaan planeettahammaspyörä
- 2 <sup>st</sup> stage sun gear	=	2 planeettaportaan aurinkoakseli
- Low speed gear	=	Hidas hammaspyörä
- High speed gear	=	Nopea hammaspyörä
- Output shaft	=	Ulosottoakseli = HSS

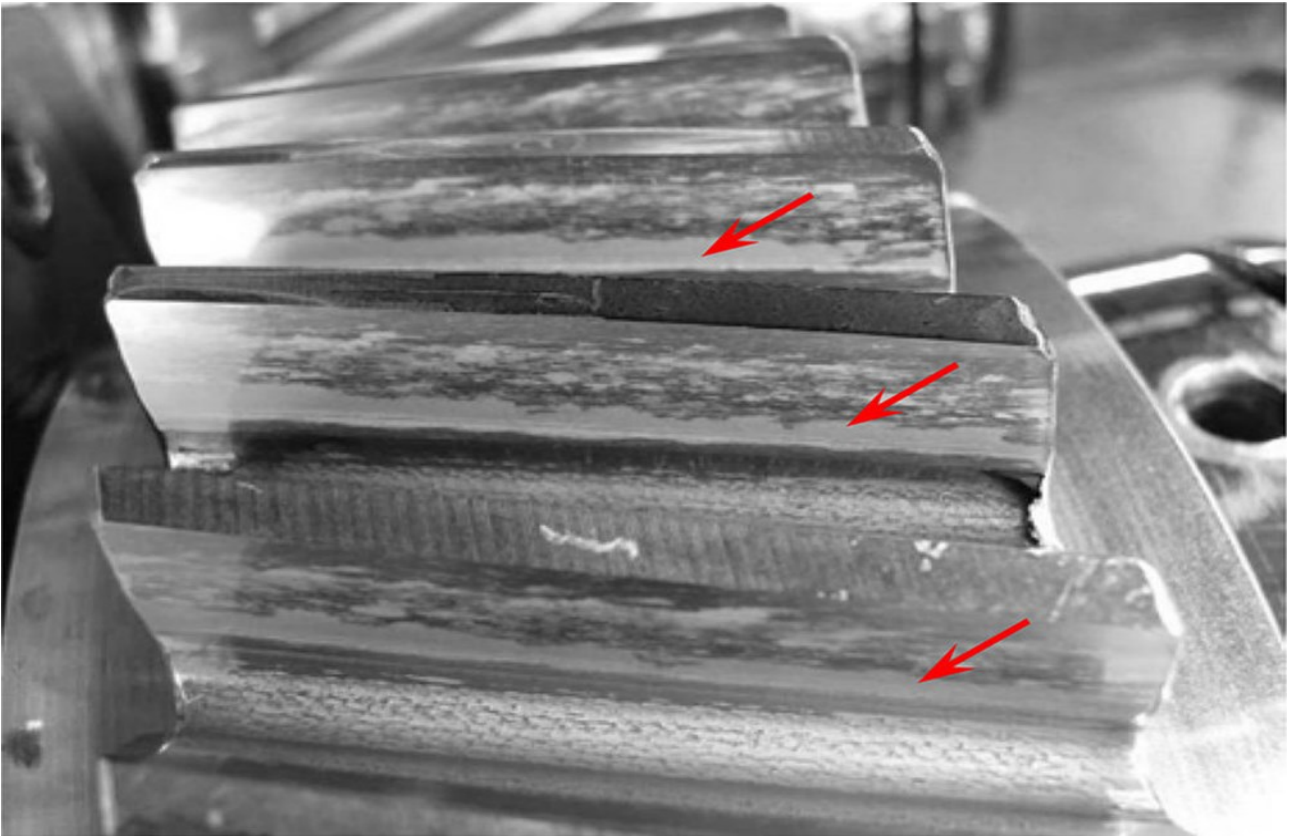
Vaihteisto on yksi suurimmista, todellisilta elinkaaren aikaisilta kustannuksiltaan oleva yksittäinen osa tuuliturbiineissa. Se on myös yksi epäluotettavimmista tuuliturbiinin osista. Saksalaiset vakuutusyhtiöt vaativat näiden komponenttien olevan kunnonvalvonnan ja monitoroinnin piirissä. Vaihteistoisesti vaatimus on täydellinen kunnostus 5 vuoden tai 40 000 tunnin välein, riippuen kumpi tulee ensin. Ongelmat kustannusten ja luotettavuuden kanssa ovat johtaneet useiden erityyppisillä rakenteilla olevien turbiinien kehitykseen ja Enerconin tuoteperheeseen, jossa ei käytetä vaihteistoa ollenkaan, vaan generaattori on ns. suoravetoinen ja sitä pyörittää suoraan roottori. (Wind Turbine Maintenance Guide. 2012) Tämän tyyppinen ratkaisu mahdollistaa laakerointien määrän vähentämisen turbiinissa jopa vain kahteen hitaasti pyörivään laakerointiin. Kaikista merkittävin heikentävä tekijä vaihteiston luotettavuudelle on hammasvälitysten ja laakerointien ennenaikainen vaurioituminen.

Vaurioitumisia aiheuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi:

- Vaihteistoöljyssä kiertävät hiukkaset ja partikkelit. Epäpuhtauksia voi päätyä vaihteiston öljynkiertoon kokoonpantaessa vaihdetta, huoltojen yhteydessä tai korroosion vaikutuksesta.
- Roottorista voimansiirtoon välittyvät pyörintänopeuden vaihtelut, värinä, sekä epätasapaino.
- Hammasvälitysten valmistusvirheet. Esimerkiksi hammaspyörien ja akseleiden virheellinen lämpökäsittely, koneistuksen pinnanlaatu, mitta- ja profiilivirheet
- Vääränlainen tai huonolaatuinen materiaali hammasvälitysosissa
- Häiriöt öljynkierrossa, väärän laatuinen öljy tai liian vähäinen öljymäärä

Näiden edellä mainittujen tekijöiden oireita ovat lisääntynyt värinä tai epätasapaino voimansiirron osissa ja usein myös lisääntynyt partikkelimäärä, sekä suurentunut partikkelikoko kiertävässä öljyssä. (Sheng Shawn, Fields Jason, Cooperman Aubryn, Shields Matt. 2022) Seuraavissa osioissa on esitetty erilaisia hammasvälitysten ja laakerointien vikaantumisisissa esiintyviä ilmiöitä.

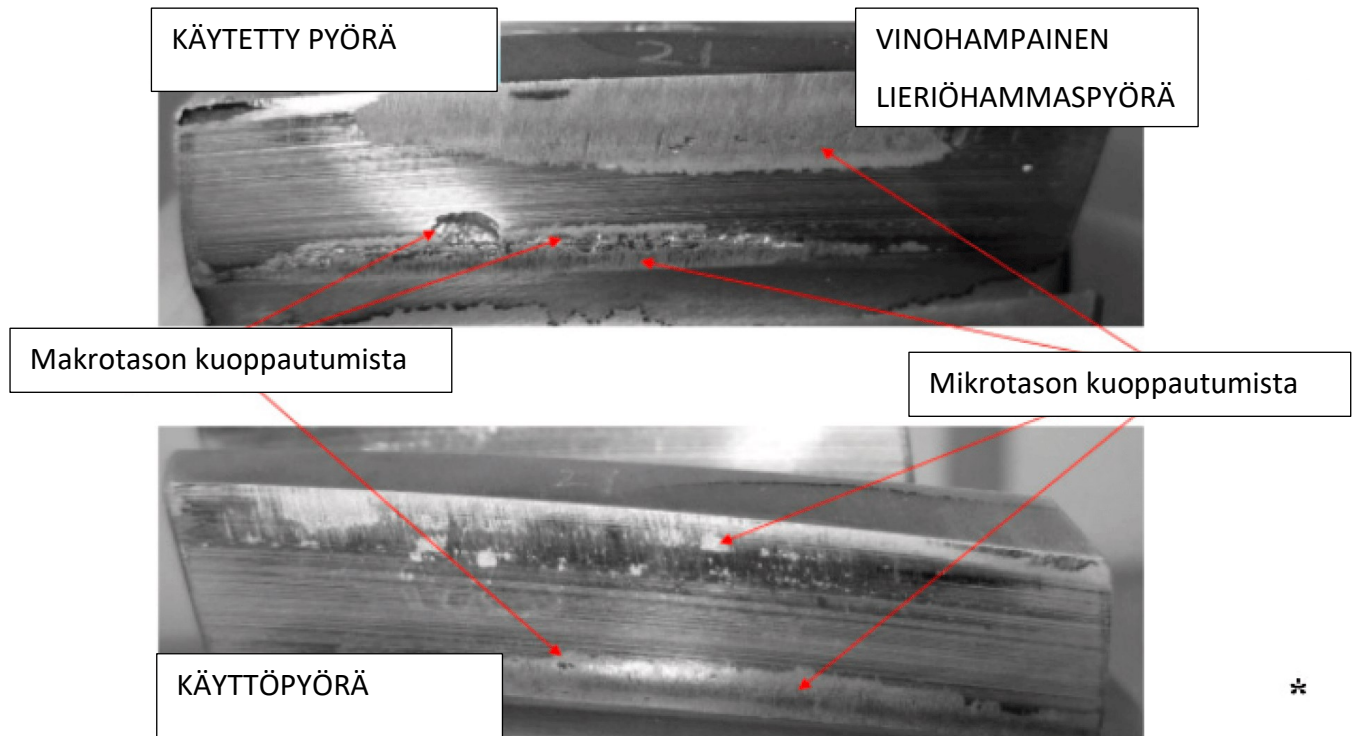
### 6.3.1 Kuoppautuminen (pitting)



Kuvio 27. Kuoppautumista hammaspyörässä (Al-Mayali, Maasi & Hutt, S. & Sharif, Kayri & Clarke, A. & Evans, H. 2018.)

Kuoppautuminen on termi, jolla kuvataan pinnan väsymisen ilmiötä. Väsymisilmiö ilmenee kuoppina hammaspyörän pinnoilla, yleensä kosketuspinoilla. Riippuen kuoppautumisen kuoppien koosta, ilmiötä kutsutaan joko mikro- tai makrotason kuoppautumiseksi. Pintojen kuoppautuminen lisää kosketuspainetta pinnoilla mikä pahentaa ongelmaa ja aloittaa osien kuntoa huonontavan kierteen, jossa lopulta tapahtuu koko vaihteistolle kriittisiä vaurioita, mikäli siihen ei puututa ajoissa. Kuoppautuminen voi toimia käynnistäjänä esimerkiksi tahmautumiselle, jota käsitellään osiossa 6.3.3.

Mikrotason kuoppautuminen (*micropitting*) on hankala ongelma, johon on etsitty ratkaisua vuosien ajan. Ilmiö ei ole materiaalista riippuva vaan syntyy kuormituksen, pintojen viimeistelyn tason ja voiteluaineen laadun yhteisestä vaikutuksesta. Oikeanlainen suunnittelu ja voiteluaineen valinta ovat osoittautuneet parhaiksi vastatoimenpiteiksi ilmiötä vastaan.



Kuvio 28 Mikro- ja makrotason kuoppautuminen (Muokattu. Al-Mayali, Maasi & Hutt, S. & Sharif, Kayri & Clarke, A. & Evans, H. 2018.)

Mikrotason kuoppautuminen voi kehittyä makrotason kuoppautumiseksi (*macropitting*), kun öljynkiertoon päässyt metalli kulkeutuu hammaskosketusten läpi. Makrotason kuoppautumista aiheuttaa myös heikko materiaalin laatu välitysosissa tai valmistusvirheet välitysosissa, kuten lämpökäsittelyn virheet, jotka voivat jättää materiaalin turhan pehmeäksi ja aiheuttaa kuoppautumista. (Al-Mayali, Maasi & Hutt, S. & Sharif, Kayri & Clarke, A. & Evans, H. 2018.)

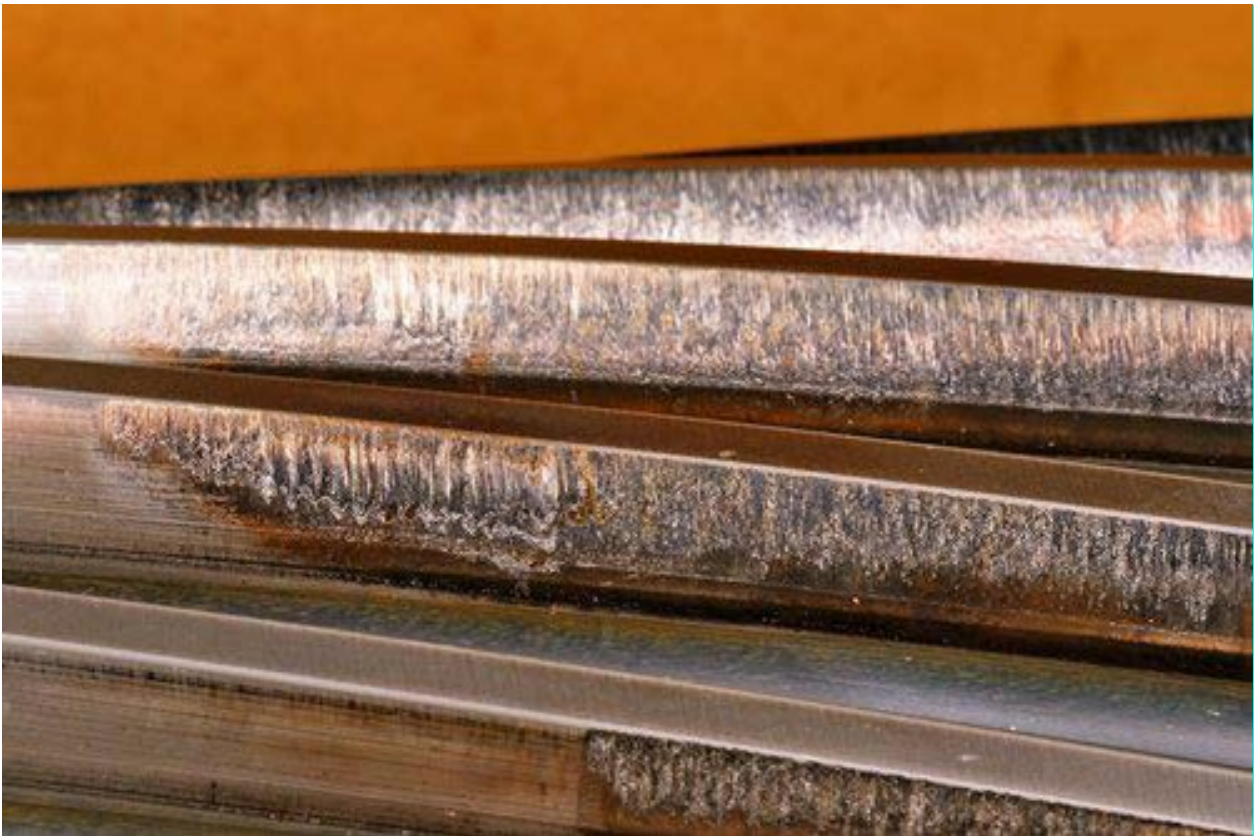
### 6.3.2 Aksiaaliset säröt ( Axial cracks)



Kuvio 29 Aksiaalinen särö laakerissa.(Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn, Shields Matt. 2022)

Yleisin vikatyyppe vaihteistojen laakeroinneissa ovat niin kutsutut aksiaaliset säröt. Vikaa esiintyy pääasiassa vaihteistojen väliakselin ja nopean akselin laakereissa. Jopa 60 % kaikista vaihteistojen vikaantumista on laakerivikoja ja näistä yli 70 % esiintyy aksiaalisia halkeamia. ”Aksiaalinen” tarkoittaa tässä tapauksessa särön syntysuuntaa, joka on akselin pituussuuntainen, yleensä laakerin sisäkoolissa. Tällaiset säröt voivat aiheuttaa koolin sirpaloitumisen ja johtaa koko koolin halkeamiseen. Vikaantumiset, joissa aksiaalisia säröjä on edustettuina, tapahtuvat yleensä huomattavan aikaisessa vaiheessa tuuliturbiinin käyttöikä. Vian syntymiselle ei ole löydetty tutkimuksista huolimatta yksiselitteistä syytä. (Jonathan Keller, Gould Benjamin, Greco Aaron. 2019.)

### 6.3.3 Tahmautuminen (Scuffing)



Kuvio 30 Tahmautuminen hammaspyörässä (Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn, Shields Matt. 2022.)

Tahmautuminen on vaurio, jossa kahden eri komponentin pintojen välillä syntyy kovassa kosketuspaineessa ja kohonneessa lämpötilassa pintojen yhteen hitsautuminen. Pintojen jatkaessa liikettä toisiinsa nähden hitsautuminen ja liitoksen irtoaminen toistuu jatkuvasti, mikä saa aikaan pintojen kulumisen. Vaurio aiheuttaa kosketuspintojen pinnanlaadun nopean heikkenemisen. Tunnusomaista vialle on, että se etenee erittäin nopeasti, varsinkin nopeasti pyörivissä osissa, kuten tuuli-voimavaihteen nopealla välityksellä. Tahmautumisen juurisyy on usein voitelun katoaminen syystä tai toisesta, jonka seurauksena osien välistä häviää voiteleva öljykalvo, kuvaa Savolainen (2019).

### 6.3.4 Kulumiskorroosio ( Fretting corrosion)



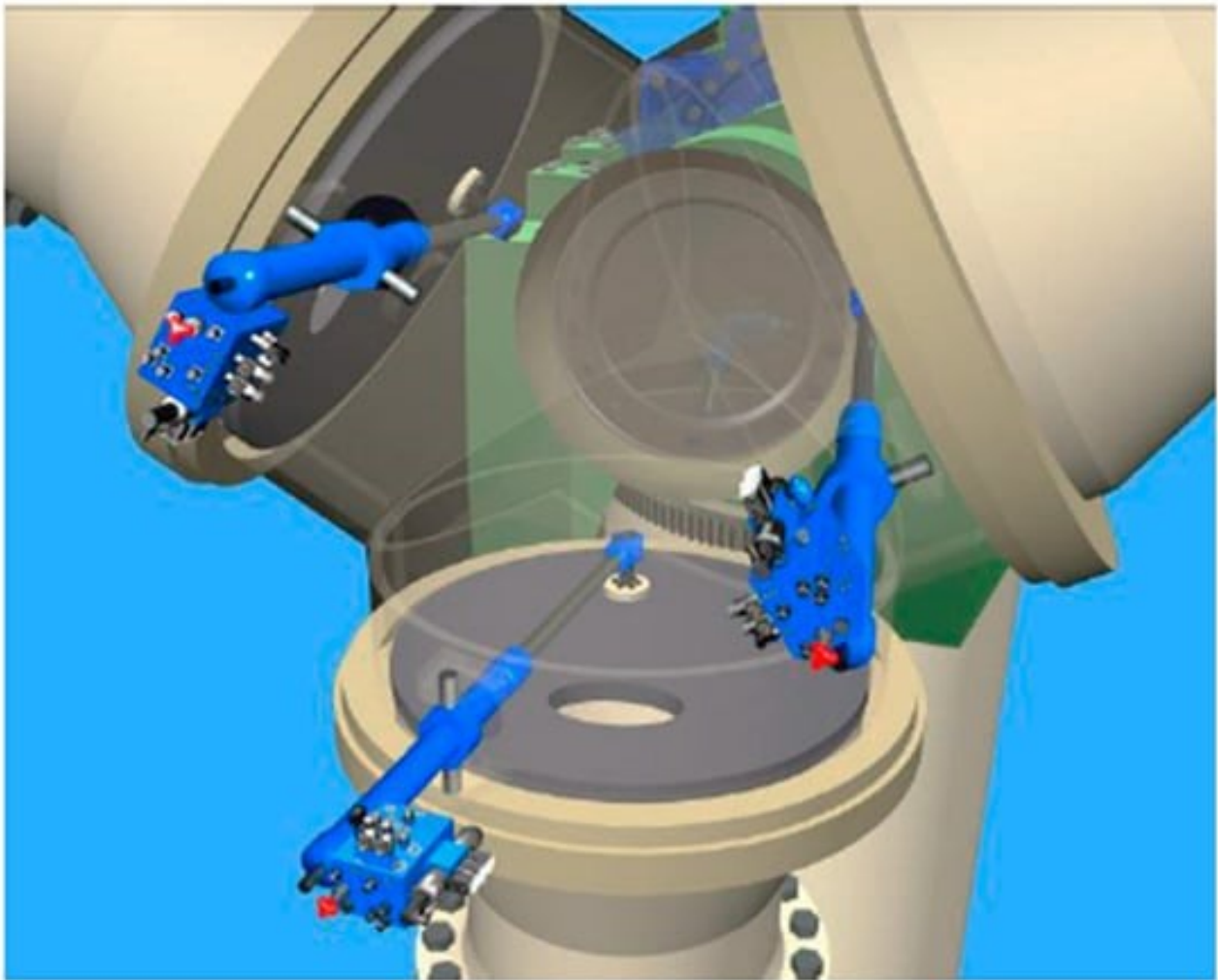
Kuvio 31 Kulumiskorroosio hammaspyörässä (Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn Shields Matt. 2022.)

Kulumiskorroosio on ilmiö, joksi kutsutaan mekaanisen kulumisen ja korroosion yhteisvaikutusta. Kulumiskorroosiota voi esiintyä vaihteiston kaikissa välitysosissa, yleensä se on nähtävissä eri toten hampaiden kosketuspinoilla. Kulumiskorroosiossa osatekijänä syntymiselle voi olla kondensoitunut vesi tai kokoonpanon jälkeen puutteellisesta suojauksesta alkaneen korroosion jatkuminen yhdessä kulutuksen kanssa. (Sheng Shawn, Fields Jason , Cooperman Aubryn Shields Matt. 2022.)

## 6.4 Siivenkääntö eli lapakulman säätö

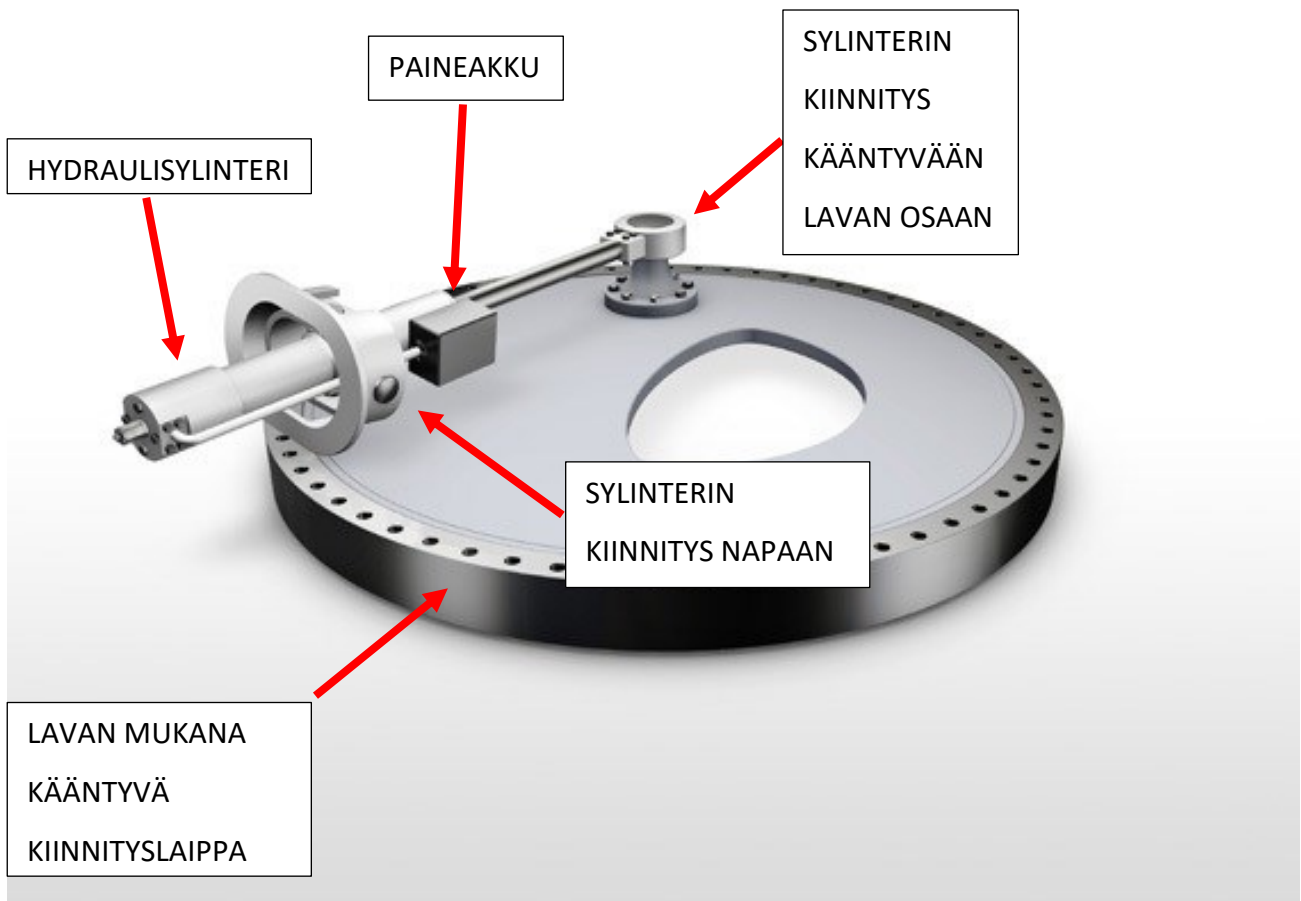
Tuulivoimalan roottori on se laitoksen komponentti, joka varsinaisesti ottaa tuulen energian vastaan. Roottorin lavat, jotka ovat laakeroituja turbiinin napaan, toimivat tuotannon tehonsäädön lisäksi myös voimalan pysäyttävänä elementtinä. Lapakulman säädön tarkoitus on pitää voimalan toiminta optimaalisena tuulennopeuteen nähden, mahdollisimman tehokkaan tuotannon varmistamiseksi. Lapakulman säätömekanismi on yleensä toteutettu joko sähköisesti tai hydraulisesti. On myös toteutuksia, jotka ovat näiden kahden yhdistelmiä ns. hybridijärjestelmiä kuvaavat tiivistäen Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, Pavlík Marek, Holcsik Peter & Pálfi Judith (2022.). Tuulivoimalan roottori on ainoa voimalan komponentti, jolla voimala todellisuudessa voidaan pysäyttää. Lapakulman säätöjärjestelmä sisältääkin hätätilanteiden varalle oman hätäjärjestelmänsä.

### 6.4.1 Hydraulinen lapakulman säätö



Kuvio 32 Hydraulinen lapakulmansäätö Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, ym. (2022.)

Hydraulinen lapakulman säätöjärjestelmä on verrattain yksinkertainen. Tämä sisältää hydraulisen sylinterin jokaiselle lavalle, sekä hätäjärjestelmän paineakun. Hätätilanteessa paineakusta vapautetaan paine hydraulisynteriin, joka ajaa roottorin lavan roottorin pyörinnän pysäyttävään asentoon. Hydrauliikkaöljyn kierto tuodaan napaan turbiinin voimansiirtoa pitkin, pyörivien liitinjärjestelmien kautta, sylinterien ohjaukselle ja eteenpäin sylintereille. (Annola 2022) Alla olevassa kuvassa on esitetty lavan hydraulisen kääntömekanismin rakennetta tarkemmin.



Kuvio 33 Hydraulisen lapakulmansäädön lapakohtaisia komponentteja (Annola 2022)

Lapakulman hydraulisessa säätöjärjestelmässä on pienempi määrä mekaanisesti kuluvia osia, kuin sähköisesti toteutetussa. Hydraulinen hätäjärjestelmäkin on rakenteeltaan yksinkertainen, sisältäen käytännössä vain paineakut, sekä niiden laukaisuventtiilit sylintereitä varten. Hydraulisten järjestelmien varjopuolia ovat usein vuotoriskit, sekä hydrauliikan paineen jatkuva tarve. Tuuliturbiinin lapakulman hydraulinen säätöjärjestelmä ei tee tässä poikkeusta. Hydrauliikkaöljyn vuoto roottorin navan sisällä voi olla katastrofaalinen, mikäli sitä ei havaita ajoissa. Matalaviskositeettinen hydrauliikkaöljy leviää pyörivän roottorin sisällä ja voi sekoittaa lapojen laakerointien voitelu-

rasvan kanssa, ohentaen sitä kriittisesti. Hydraulisia järjestelmiä on käytetty tuulivoimaloiden lapakulman säätöön jo pitkään ja ne on todettu luotettaviksi, sekä pitkäikäisiksi. Edellä mainituista haitoista huolimatta, hydraulisissa järjestelmissä ei juurikaan esiinny merkittäviä vikaantumisia, mikäli ne huolletaan säännöllisesti. (Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, Pavlík Marek, Holcsik Peter & Pálfi Judith 2022.).

#### 6.4.2 Sähköinen lapakulmansäätö

Sähköinen lapakulman säätöjärjestelmä toimii nimensä mukaan, sähköisellä voimalla. Lapojen kulman säätöön tarvittava voima tuotetaan tasajännitesähkömoottorilla. Tyypillisesti järjestelmässä on jokaiselle lavalle oma säätömoottori. Tasavirtamoottori synnyttää suuren vääntömomentin, jonka voimalla se kääntää lapaa hammastetun siipilaakerin välityksellä. Alla olevassa kuviossa on esitetty sähköisen järjestelmän komponentteja, joista hammasvälitys on erotettavissa. Tarkemmin hammaskosketus on esitetty kuviossa 35.



Kuvio 34 Sähköinen lapakulmansäätö (Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, Pavlík Marek, ym. 2022.).

Hätätilanteessa hätäjärjestelmään kuuluvilta akuilta syötetään käyttöjännite tasavirtamoottoreille, jotka kääntävät lavat pysäyttävään asentoon. Hätäjärjestelmään kuuluvat akkujen lisäksi itse käyttömoottori, joka sisältää jarrun. Moottorissa on myös asentoanturi ja se on kytketty laitoksen ohjausjärjestelmään. Käyttörattaalle on oma voitelujärjestelmänsä. Hätäjärjestelmän akuille on valvonta, josta on yhteys laitoksen monitorointiin. Akkuja varten on Suomessa asennetuissa voimaloissa myös akkujen lämmitysjärjestelmä. Luonnollisesti itse lavalle on myös lapakulman asentoanturi. Sähköisellä järjestelmällä on omat etunsa, paineenalaisia hydraulijärjestelmiä ei ole, eikä näin ollen vuotoriskiä. Järjestelmällä on myös haittapuolensa, liittyen nimenomaan järjestelmän komponenttien vikaantumisiin. Akkuongelmat ovat yleisimpiä näistä, varsinkin pohjoisessa ilmastossa alhaiset lämpötilat aiheuttavat akkujen kunnan heikkenemistä lämmitysjärjestelmien käytöstä huolimatta. Käyttöikä Suomessa akuilla on n. 2–3 vuotta. Suurimpia haasteita sähköisen järjestelmän toiminnalle ovat kuitenkin hammasvälitteisen järjestelmän pienet siirtymät lapakulman säädössä. Hammasvälityksen riittävän voitelun käytännön toteutus onkin osoittautunut erittäin haastavaksi tästä johtuen ja useimmat ratkaisut ovat monimutkaisia, sekä vikaherkkiä. (Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, Pavlík Marek, Holcsik Peter & Pálfi Judith 2022.).



Kuvio 35 Lavan laakerin hammastus (Annola 2022)

Kääntöjärjestelmän hammasvälitykset vikaantuvat pääasiassa puutteellisen voitelun vuoksi. Kuluminen vuoksi likaantunut voiteluaine myös kiihdyttää kulumista. Hampaiden kuluessa riittävästi, niiden kosketuskulma ja hampaaseen kohdistuvat kuormitukset muuttuvat. Tällaisessa tilanteessa hampaat voivat vaurioitua samoin tavoin, kuin voimalan vaihteistossakin. Erona vaihteiston ja lapakulman säädön hammasvälityksiin on kuitenkin yksittäisiin hampaiseen kohdistuva voima. Lavan välittämä tuulen aiheuttama kuormitus käännön hammastuksessa on melkoinen. Vaihtelevat tuuliolosuhteet voivat muuttaa radikaalisti tätä kuormitusta hampaissa ja jopa aiheuttaa murtumia hampaisiin. Yleisin syy hammasvälitysten vaurioitumiseen on kuitenkin hampaista kulumisen seurauksena irronneiden partikkeleiden vaikutus kulkeutuessaan hammaskosketusten välissä. Hampaat voivat säröytyä muuttuvien paikallisten jännitysten vuoksi, jotka aiheutuvat hampaiden välissä olevista partikkeleista. Vika voi muuttua nopeasti kriittiseksi vikaantumiseksi, mikäli säröytyminen kehittyy hampaan halkeamiseksi. Tuulivoimalan lapakulman säädön hammastukset kuluvat yleensä hyvin pieneltä alueelta hammastusta, pahimmillaan vain kahden hampaan osalta. Seuraavissa kuvissa on esitetty erilaisia kulumisen aiheuttamia vaurioita lapakulman säädön hammasvälityksessä.



Kuvio 36 Erittäin voimakkaasti kulunut hammas. (Annola 2022)



Kuvio 37 Kulunut olake hammaspyörässä, syynä virheellinen linjaus (Annola 2022)



Kuvio 38 Voimakkaasti kiillottunut hammas, aiheuttaja likainen voiteluaine. (Annola 2022)

## 7 Käytöstä poistetun tuulivoimalan kohtalo

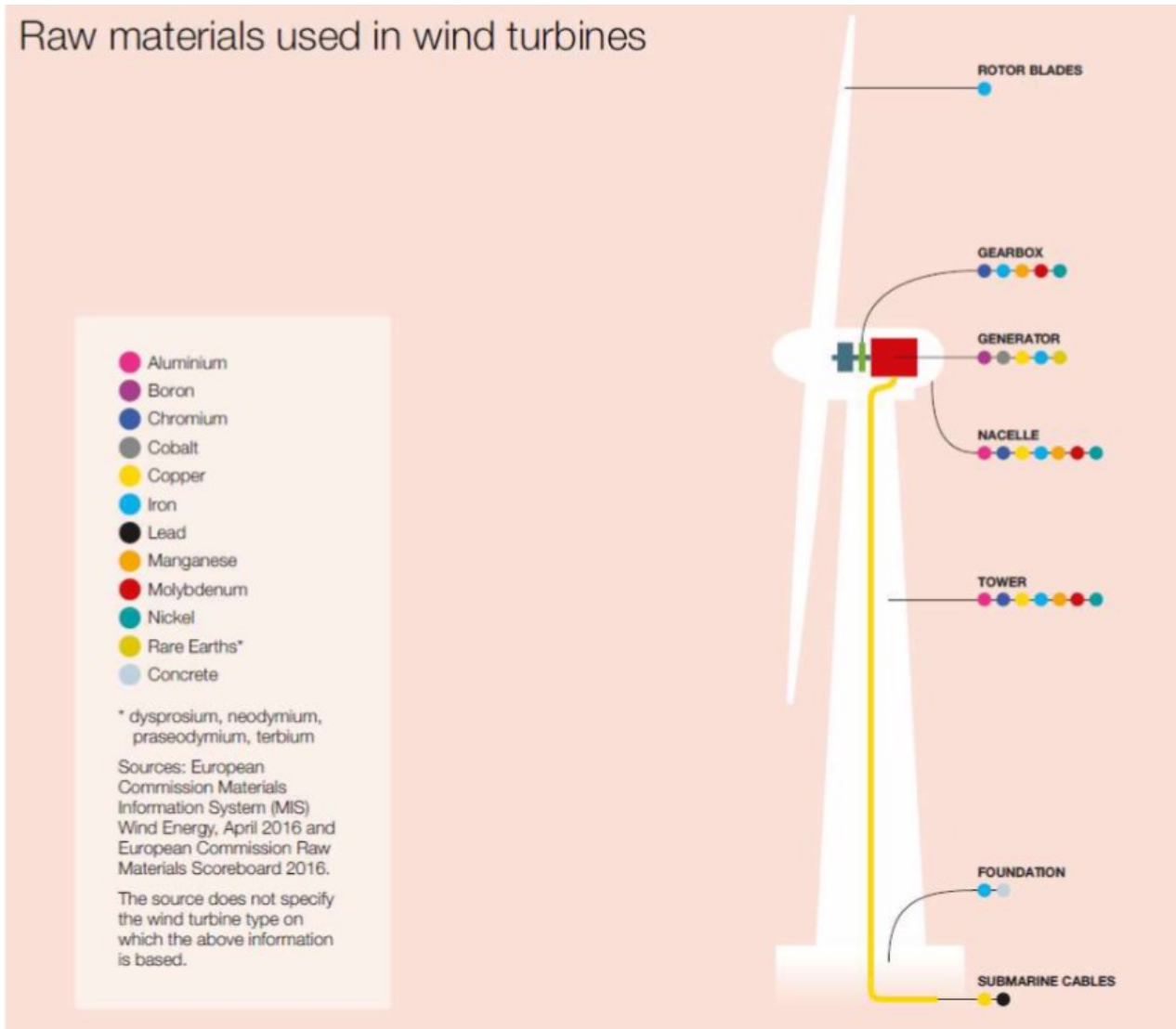
Pohjois-Euroopassa ollaan vahvasti mukana kierrätyksessä. Environmental Performance Index (EPI) tarjoaa dataan perustuvan yhteenvedon kestävä kehityksen tilasta eri puolilla maailmaa. Suomi, Ruotsi, Norja ja Tanska ovat kaikki 25 suurimman kierrättäjän joukossa. (Wolf, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. 2022.)

Sweden	15	39.70
Estonia	17	39.10
Poland	18	38.30
Czech Republic	19	37.30
Moldova	20	36.90
Austria	21	36.00
Denmark	22	35.40
Finland	22	35.40
Norway	24	35.30

Kuvio 39 Kierrätysprosentit Pohjoismaissa (Wolf, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. 2022.

Tuulivoimaloiden kierrättäminen on ollut haastavaa ja tähän etsitään ratkaisuja tänäkin päivänä. On otettava huomioon, että nykyisessä markkinatilanteessa, kun turbiini puretaan, se ei välttämättä ole saavuttanut käyttöikänsä loppua. Turbiini korvataan usein suuremmalla ja pois purettu pienempi turbiini voidaan kunnostaa ja myydä eteenpäin asennettavaksi. Tämä on yksi parhaimmista skenaarioista, tällöin vältytään uusien materiaalien tuotannolta. On kuitenkin huomioitava, että edelleenkin tästä huolimatta merkittävä osa purkujätteestä loppusijoitetaan tai poltetaan käyttöiän päätyttyä. Poltettavia jätteitä ovat mm. epoksista ja lasikuidusta valmistettujen lapojen purkujäte. Poltossakin kuitenkin voidaan ottaa talteen epoksin palamisen tuottamaa energiaa. Lasikuitu ei palaessaan tuota energiaa juurikaan, mutta sen palamisjätettä voidaan hyödyntää sementin tuotannossa. Tuulivoimala sisältää paljon arvokkaita metalleja, kuten kuparia, joka voidaan kierrättää ja käyttää uusiomateriaalina. Näitä voidaan tarkastella kuvasta 14. Sama koskee

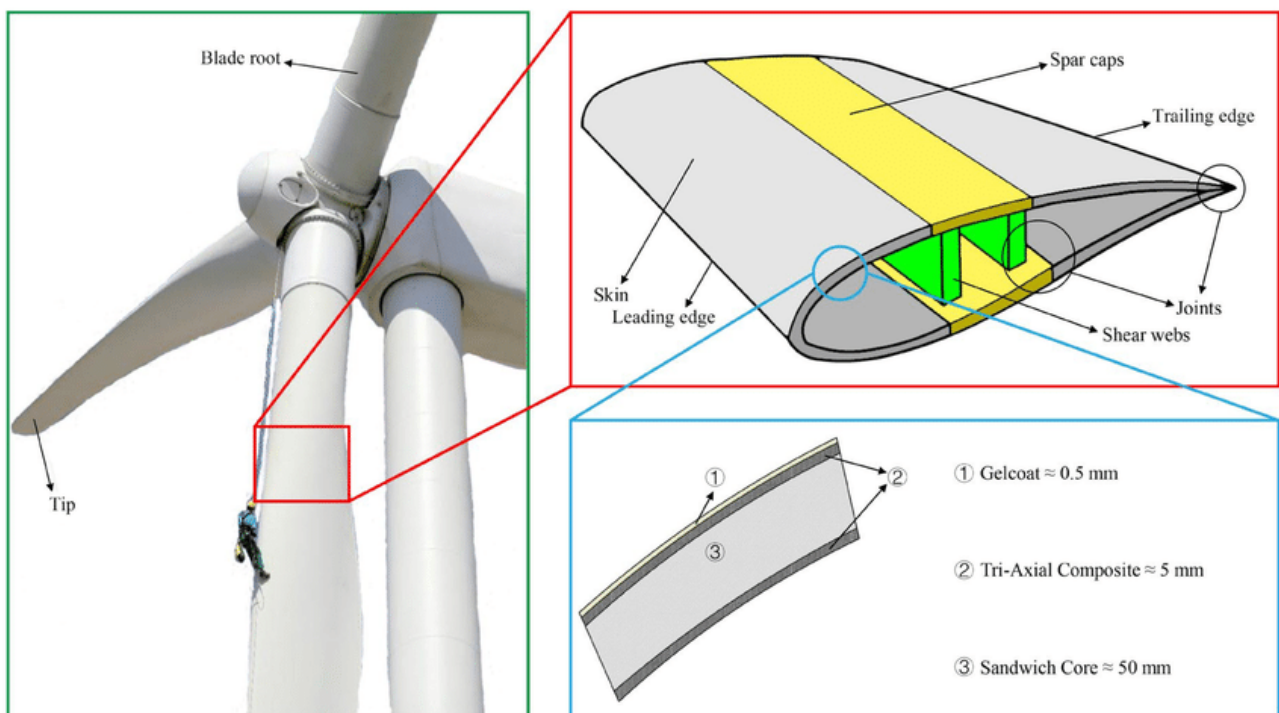
mutakin voimalan metallimateriaaleja, kuten teräksistä tornia ja vaihteistoa. Voimalan perustus on hankalampi tapaus, mikäli paikalle asennetaan uusi voimala, vanha perustus joudutaan aina purkamaan, vaihtoehtoisesti se voidaan maisemoida paikalleen. Tämä toki ei poista sitä tosiasiaa, että perustus on silti olemassa voimalan purun jälkeen. Betoniset tornin ja perustuksen osat voidaan käyttää murskauksen jälkeen täyttömateriaalina, muttei niistä ole käytännössä uusiokäyttöön. (Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C. 2020.)



Kuvio 40 Tuulivoimalan raakamateriaalit Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C. 2020.

Mattila (2021) kertoo artikkelissaan tuulivoimaloista, että kierrätyksen kannalta kaikkien hankalin osa on lapa. Tuulivoimalan lapa on pisimmältä ulkoiselta mitaltaan mitattuna sen pisin yksittäinen osa, painoltaan keskimäärin 12 000–15 000 kiloa. Lapoihin kohdistuu suuria rasituksia käytössä ja siksi ne joudutaan valmistamaan mahdollisimman kestävästä materiaaleista, kuitenkin myös keveysmassojen optimoinnin takia. Lavat edustavat käytännössä tuulivoimalan moderneinta teknologiaa ja sen jatkuvasti kehittyessä käytöstä poistetusta voimalasta purettuja lapoja ei ole kannattavaa siirtää toiseen voimalaan. Kokonaisille lavoille ei ole vielä keksitty myöskään muuta käyttöä, kuin niiden käyttö tuulivoimalassa.

Lapa sisältää hyödynnettäviä raakamateriaaleja merkittävän vähän suhteessa kierrätyskelvottomiin materiaaleihin ja niiden erottelu on vaikeaa. Lapoja onkin päätynyt kaatopaikoille ja niitä on jopa haudattu voimaloiden ympäristöön. Tämä riski toiminnan lieveilmiöistä on onneksi hyvin tiedostettu Suomessa, jossa on sitouduttu kaatopaikkakieltoon tuulivoimaloiden osalta.



Kuvio 41 Poikkileikkaus tyypillisestä tuulivoimalan lavasta lähde( Cao, Zheng & Li, Shujian & Li, Changping & Li, Pengnan & Ko, Tae Jo. 2022.)

Mattila (2012) mainitsee myös, että eurooppalainen tuulivoima-alan järjestö WindEurope julkaisi kesäkuussa 2021 toivovansa kaatopaikkakieltoa tuulivoimaloiden lavoille vuodesta 2025 alkaen. Ala on siis herännyt etsimään ratkaisuja kierrätyksen haasteisiin. Tilanne onkin jo akuutti, kuten artikkeli kertoo, yli kolmasosa Saksan tuulivoimasta tuotetaan yli 15 vuotta vanhoilla voimaloilla. Tilanne on kehittymässä hiljalleen samaan suuntaan myös Suomessa ja arvellaan, että viimeistään 2040-luvulla on tulossa suuremman luokan purkuaalto tuulivoimaloille. Alla olevassa taulukossa on esitetty tuulivoimalassa käytettyjen materiaalien kierrätettävyyssasteita.

Taulukko 2 Tuulivoimalan valmistuksessa käytettävät materiaalit ja arvio niiden hyödynnettävyydestä. (Tuulivoimalan purkamisen kustannukset. 2023.)

Materiaali	Arvio kierrätettävyydestä [%]	Hyödyntämismenetelmä ja huomioita
<b>Betoni</b>	50 – 100	Hyödyntäminen maarakentamisessa murskeena tai loppusijoittaminen kaatopaikalle
<b>Teräs ja rauta</b>	80 – 100	Kierrätys raaka-aineena uuden teräksen valmistuksessa
<b>Alumiini</b>	80 – 100	Kierrätys raaka-aineena uuden teräksen valmistuksessa
<b>Kupari</b>	80 – 100	Kierrätys raaka-aineena uuden teräksen valmistuksessa
<b>Polymeerit</b> (mm. kaapelien muovit)	0	Poltto tai kaatopaikka
<b>Lasi- ja hiilikomposiitit</b>	0 – 65 <sup>1</sup>	Poltto, hyödyntäminen sementin valmistuksessa (energiana ja raaka-aineena), komposiiteissa tai loppusijoitus poikkeusluvalla kaatopaikalle
<b>Elektroniikka</b>	0 – 86 <sup>2</sup>	SER-jätteen toimitus hyödyntäjille. Murskaus, materiaalien erottelu, materiaalien kierrätys (erityisesti metallit) ja hyödyntämiskelvottoman jakeen poltto.
<b>Magneetit</b>	0 – 80	Kestomagneetit voidaan hyödyntää pienenä määränä joko suoraan uusien magneettien tuotantoprosessissa tai toimittaa raaka-aineen jalostajille, jolloin ne sulatetaan puhtaammaksi raaka-aineeksi.
<b>Öljy- ja jäähdytysneste</b>	0 – 80 <sup>3</sup>	Poltto tai jäteöljyn kierrätys

**Kustannusarvioiden lähteet:**

<sup>1</sup> Hyödynnettävyys raaka-aineena sementin valmistuksessa (WMW, 2021).

<sup>2</sup> SER kierrätysaste materiaalina Suomessa 2017 (Asano-Ulmonen & Haavisto, 2020).

<sup>3</sup> Kerätyn jäteöljyn kierrätysaste Suomessa 2020 (Ympäristöministeriö, 2020).

## 8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tuulivoima on energiantuotannon muoto, joka on hankala asettaa samalle viivalle muiden muotojen kanssa sen erityisten haasteiden ja sille ominaisten tuotannollisten vaihtelujen vuoksi. Tuulivoiman luotettavuus ja käytettävyys ovat suuria haaste, huolimatta suurista panostuksista voimaloiden kehitystyöhön. Valtion tukemana tuulivoima on saanut Suomessa jalansijaa ja voimaloita rakennetaan kiihtyvään tahtiin yhä enemmän. Tuulivoimaloille on ominaista jatkuvasti muuttuvat kuormitukset. Tämä asettaa tuotantomuodolle erityisiä vaatimuksia voimaloiden suunnittelussa. Pohjoisessa ilmastossa, joka Suomessa vallitsee, on myös tekijöitä, joiden todellista vaikutusta tuulivoimaloiden luotettavuuteen, käyttöikään tai kestävyYTEEN, ei ole pystytty käytännössä selvittämään. Merkittävin näistä on Suomen talvi ja pakkanen. Jään kertymisen vaikutuksista tuulivoimaloiden rakenteisiin on tehty ja on käynnissä tutkimuksia, mutta tämän opinnäytetyön toteutuksen aikana käytettävissä olevien tietojen pohjalta, asiasta ei ole laajempia julkistettuja selvityksiä.

Tuulivoimala on suhteellisen yksinkertaisesta perusrakenteestaan huolimatta varsin monimutkainen ja useita erilaisia teknologisia ratkaisuja yhdistävä kokonaisuus. Tuulivoimalat ovat osoittautuneet varsin epäluotettaviksi laitoksiksi, jotka käyttöolosuhteissaan voivat vikaantua käytännössä mistä tahansa voimansiirtonsa osasta kriittisesti ja odottamattomasti, mikäli voimaloita ei monitoroida jatkuvasti ja suoriteta säännöllisiä laajamittaisia tarkastuksia. Huomioon pantavaa on myös, että voimalan käyttöikäksi lasketaan 25 vuotta, vaikka suuri osa pääkomponenteista vaihdetaan uuteen tai kunnostetaan uutta vastaavaksi useita kertoja voimalan käyttöiän aikana. Vakuutusyhtiöiden käytäntö jopa on, että esimerkiksi voimalan vaihteisto on vaihdettava uuteen 5 vuoden välein. Huolimatta siitä, että vaihteisto on yksi niistä voimalan komponenteista, jonka kehitystyöhön on panostettu eniten, on se osoittanut myös yhdeksi vikaantuvimmista komponenteista.

Voimalan turbiinin koko voimansiirrossa esiintyvien vikojen laaja-alaisuus ja lukumääräisyys näennäisesti selittämättöminä tiheyksinä ja määrinä, osaltaan kertoo, ettei tuulivoimaloiden kaikkien rasituksia aiheuttavien tekijöiden juurisyitä vielä tunneta tarkasti. Vaihteiston osalta tämä on johtanut siihen, että jotkut valmistaja ovat kehittäneet ns. suoravetoisia malleja, joissa vaihteistoa ei ole ollenkaan.

Tuulivoimaloissa esiintyvät kriittisimmät viat esiintyvät pääasiassa voimansiirron eri osissa ja johtuvat useimmissa tapauksissa rasituksen aiheuttamasta mekaanisesta kulumisesta, sekä rakenteiden ja materiaalien väsymisestä. Merkittävänä riskitekijänä kulumiselle ovat puutteellinen voitelu, likaantunut voiteluaine, tai voitelun puuttuminen kokonaan. Samoja juurisyitä esiintyy vikaantumisille niin lapakulman säätöjärjestelmässä, kuin myös muussa voimansiirrossa, vaihteisto ja generaattorin mekaaniset osat mukaan lukien.

Voitelulle aiheuttavat haasteita lapakulman säätöjärjestelmässä lähinnä rakenteen itsensä monimutkaisuus, muuttuvat rasitukset, sekä hammasvälitysten lyhyt työalue. Voimansiirrossa eritoten vaihteiston osalta haasteita asettaa seikka, että Suomen käyttölämpötilat ovat alhaisemmat verrattuna Keski-Eurooppaan. Se asettaa kovempia vaatimuksia voiteluaineiden ominaisuuksille. Useimmissa ratkaisuissa vaihteiston ja voimansiirron voiteluaineelle onkin olemassa lämmitysjärjestelmiä. Mainittakoon lämpötilan osalta, että tuulivoimatuotanto on siinä mielessä erityisessä asemassa käytettävyyden osalta, että voimaloiden automatiikan tai käyttäjän ajaessa voimalat alas liian alhaisen lämpötilan vuoksi, tämä lasketaan osaksi laitoksen normaalia toimintaa. Joidenkin turbiinimallien osalta tämä voi olla vain -15 celsiusastetta.

Tuulivoimaloiden kunnonvalvonnassa ja kunnossapidon suunnittelussa merkittävässä asemassa on laitoksen voimansiirron monitorointi, CMS = Continuous Monitoring System. Suuri osa ennalta-arvaamattomista voimansiirron vikaantumisista voidaan välttää tulkitsemalla oikein voimansiirrossa esiintyviä värinöitä ja lämpötiloja. Lähestulkoon kaikki turbiinin voimansiirron kuluneet tai muutoin rasituksesta vaurioitumassa olevat osat synnyttävät normaalista poikkeavaa värinää, ääniä tai kohonneita lämpötiloja. Ehdottomasti yksi tärkeimmistä käytettävissä olevista menetelmistä voimaloiden kunnonvalvonnassa ja käyttövarmuuden hallinnan työkaluna, ovatkin värinämittaukset, sekä niiden analysointi. Värinämittaukset ovat kuitenkin haastavia mittausmenetelmiä. Värinämittaukset on mitattava juuri oikeista mittauspisteistä mitattavassa rakenteessa tai komponentissa, sekä mittalaitteet on kalibroitava säännöllisesti, jotta saatu data on uskottavaa ja todenmukaista. Suuri haaste on kuitenkin saadun datan tulkinta. Useimmissa tapauksissa laitetoimittajat, kuten vaihteistojen valmistajat, toimivat asiantuntija-apuna dataa tulkitessa, sekä arvioitaessa kunnossapidon tarpeita ja suunniteltaessa tulevia seisokkeja.

Voiteluaineiden analysointi on myös tärkeä menetelmä tuulivoimaloiden kunnonvalvonnan apuvälineenä ja toimii vahvasti osana ennakoivan kunnossapidon suunnittelua. Voiteluaineen ominaisuuksien muuttuminen, siinä esiintyvien partikkelien laatu, määrä ja koko kertovat indikaattoreina mahdollisesta kiihtyvistä kulumisesta tai jo syntyneistä vaurioista sisäisissä osissa. Voiteluaineiden analyysiin on olemassa etämonitorointiinkin kytkettäviä järjestelmiä ja tällaisia laitoksissa yleensä onkin asennettuna. Tästä huolimatta yleisesti luotettavimpana menetelmänä pidetään kuitenkin säännöllisten näytteiden ottamista. Näytteet toimitetaan useimmiten riippumattomalle, voiteluaineiden analysointiin erikoistuneelle toimijalle.

Voimansiirron sisäisiä osia, kuten hammasväliä tarkastellessa, endoskooppaus on osoittautunut nopeaksi ja nykyaikaisten videoendoskooppausvälineiden avulla myös informatiiviseksi tavaksi saada diagnostiikkatietoa osien kunnosta. Lämpökuvasta käytetään jonkin verran tuulivoimaloiden kunnossapidossa, mutta vikaantuvien osien ollessa usein sisäisiä ja niiden tuottamien lämpöjälkien ollessa hankalasti saavutettavissa kameralla, on sen merkitys jäänyt kohtuullisen pieneksi. Äänimittaukset, joilla voidaan tarkastella epänormaaleja ääniä käytön aikana, ovat värinämittausten ohella tärkeitä menetelmiä arvioitaessa sisäisten osien kuntoa.

Tuulivoimaloiden kunnossapidossa on tarve monenlaiselle osaamiselle, mutta huolimatta teknologian erityispiirteistä, siihen pätevät samat kunnonvalvonnan peruseriaatteen kolmesta indikaattorista vikojen kehittämisessä.

### **Värinä      Ääni      Lämpö**

Kulunut osa voi synnyttää värinää, ensin pientä, mutta myöhemmin selkeästi havaittavaa. Erilaisia epänormaaleja ääniä saattaa olla havaittavissa jo alusta lähtien. Lämpeneminen on voi esiintyä missä tahansa vaiheessa vikaantumista, joskus jopa aivan ennen kriittistä vaurioitumista.

Ammattikorkeakoulutasolla tuulivoimaloiden voimansiirtoon ja lapakulman säätöjärjestelmään liittyvien komponenttien vikaantumismekanismien osalta on mahdollisuuksia tarjota hyvinkin syventävää koulutusta ja koulututtuneet voivat antaa teknistä tukea, jota huoltoja suorittavat ja asentajatasolla toimivat henkilöt voivat hyödyntää suorittaessaan huoltoja- ja kunnossapidollisia toimia

tuulivoimaloissa. Mitattua käyntidataa tuulivoimaloiden teknisillä käyttäjillä on nykypäivänä runsaasti kerättyä käytössä olevista voimaloista ja sen analysointi on taito, jonka sisäistämistä tukeva koulutus tulee yhä ajankohtaisemmaksi tarpeeksi Suomen tuulivoimaloiden ikääntyessä ja lähestyessä viimeistään lähivuosisikymmenien aikana elinkaarensa loppupäätä.

Jyväskylän ammattikorkeakoulu voisi järjestää koulutusta seuraavilla osa-alueilla:

*Väriämittaukset ja mittausdatan analysointi*

*Hammasvälitysten peruseriaatteen, vikaantumismekanismit, sekä kulumisen tunnistaminen*

*Laakeroinnit, niiden vikaantuminen ja siihen johtavat syyt*

*Rasitukset, niitä synnyttävät tekijät ja vaikutukset pyörivissä voimansiirron osissa*

*Akseleiden linjauksen vaikutukset rasitukseen*

*Voiteluaineiden ominaisuudet, lämpötilan vaikutus ominaisuuksiin, sekä oikean valinta määrättyihin käyttöolosuhteisiin laitteelle*

*Lämpötilan vaikutus hammaspyörävaihteistoissa käytettäviin materiaaleihin*

*Hydrauliikan peruseriaatteen ja niiden soveltaminen*

*Sähkö- ja automaatiotekniikan perusteet*

## 9 Pohdinta

Työn alkuperäisessä toteuttamissuunnitelmassa tarkoituksena oli käyttää alan toimijoiden haastatteluista kerättyä materiaalia. Yrityksistä huolimatta alan toimijoita ei saatu mukaan tämän työn toteutukseen. Toimeksiantajan kanssa tehtiin päätös suorittaa työn toteutus käyttäen olemassa olevia tutkimuksia ja julkaisuja lähdemateriaalina.

Alkuvaiheessa tutkimuksen eteneminen hidastui edellä mainituista syistä, mutta kaikesta huolimatta se eteni johdonmukaisesti koko opinnäytetyöprojektin ajan omaa tahtiaan. Merkille pantavaa on vähäinen luotettavan suomenkielisen materiaalin määrä nimenomaan liittyen tuulivoimaloiden luotettavuuteen ja vikaantumisiin. Tuulivoimaloiden vikaantumiseen liittyvien raporttien laatu on myös heikentynyt merkittävästi raportoinnin siirtyessä VTT:ltä Suomen Tuulivoimayhdistys ry:lle. Huomasin materiaalia kerätessäni ja tutustuessani Suomen Tuulivoimayhdistyksen tuotamaan aineistoon sen olevan vahvasti tuulivoimaa tukevalla tavalla tuotettua, siltä osin pyrin rajaamaan kyseisen toimijan materiaalin käytön lähteinä mahdollisimman niukaksi, sekä tarkastelin sitä kriittisesti. Vieraskielistä aineistoa on runsaasti tarjolla ja se on paremmin faktoihin pohjautuvaa, eikä poliittisesti väritynyttä. Projektin edetessä todettiin, että tuulivoimalan komponenttien vikaantumista tarkemmin esitellessä tässä työssä, joudutaan rajaamaan se korkeintaan muutama voimalan komponenttiin. Komponenteiksi valikoituivat vaihteisto, sekä lapakulman säätöjärjestelmä, näiden korkean vikaantumisherkkyden vuoksi. Työkokemukseni Moventas Gears Oy:ssä, sekä Flender Finland Oy:ssä osoittautui hyödylliseksi eritoten koskien vaihteiston osuutta.

Pidän tässä työssä esitettyjä tyypillistä Suomessa käytössä olevaa tuulivoimalaa koskevia tunnuspiirteitä, tuulivoimaloiden käytön aikaista elinkaaren hallintaa, sekä voimaloiden komponenttien vikaantumisesta käytyjä asioita luotettavina, sekä valideina. Työn toteuttamiseen kerätty lähdemateriaali on hyvin kattava ja sisältää erityyppisiä julkaisuja, useilta alalla toimivilta ”vastapuolilta”, sekä valtiollisilta tutkimuslaitoksilta. Työ mielestäni vastaa toimeksiantajan asettamia tavoitteita ja tarjoaa toimeksiantajalle mahdollisuuden hyödyntää sitä suoraan sellaisenaan osana heidän koulutustaan.

Tutkimus jouduttiin rajaamaan sisällön laajuuden vuoksi keskeisimpiin tuulivoimalan komponentteihin vikaantumisten osalta, mutta on laajennettavissa kattamaan koko voimalaa ja sen kaikkia komponentteja. Tällaiselle laaja-alaisemmalle tutkimukselle olisi mielestäni tarvetta, koska tuulivoimaloiden ikääntyminen tulee asettamaan merkittäviä haasteita alalle tulevaisuudessa.

Kehittämistyötä voidaan pitää eettisesti kestäväenä, sen pääasiallisena tarkoituksena tuottaa koulutuksellista hyötyä toimeksiantajan mahdollisille loppuasiakkaille, tarjoten myös parempaa palvelua toimeksiantajan asiakasrajapinnalle. Tutkimuksessa käytettävä lähdeaineisto on varsin laaja ja alan arvostettujen nimien tuottama. Aineisto sisältää niin kirjallisuutta, opinnäytetöitä, kuin myös valtiollisten toimijoiden laajoja raportteja. Opinnäytetyötä koskien on laadittu salassapitosopimus.

## Lähteet

Tuulivoimatilastot 6/2023. 2023. Toiminnassa olevat ja puretut voimalat. Excel-laskentataulukko. Suomen Tuulivoimayhdistys.

Viitattu 21.01.2024

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot\\_6\\_2023\\_nettiin.xlsx](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_6_2023_nettiin.xlsx)

Tuulivoimahankkeet Suomessa 05/2023. 2023. Yhteenveto Suomeen suunnittelussa olevista hankkeista. Powerpoint-esitys. Suomen Tuulivoimayhdistys ja Sweco.

Viitattu 21.01.2024

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-06\\_2023.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-06_2023.pdf)

Walford Christopher. 2006. Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine Operation and Maintenance Costs. Raportti. Sandia National Laboratories.

Viitattu 21.01.2024

<https://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/SAND-2006-1100.pdf>

Ohrling Tiina, Heiskanen Eva & Matschoss Kaisa. 2021. Energiamurros ja osaaminen. Tarkastelu energiamurroksen avainalojen ammatillisista osaamis- ja koulutustarpeista. Aalto-yliopisto.

Viitattu 29.01.2024

<https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/1c9a2f4e-e53b-4b14-a28e-50cccb66d7d5/content>

Pohjoisen Keski-Suomen ammattiopisto käynnistää lähes 1 400 000 euron hankkeen, jolla rakennetaan tuulivoiman ja aurinkopaneeliratkaisuiden osaamiskeskittymää. 2023. Artikkeliverkkolehdessä. ÄÄNEKOSKEN KAUPUNKISANOMAT OY.

Viitattu 21.01.2024

<https://aksa.fi/pohjoisen-keski-suomen-ammattiopisto-kaynnistaa-lahes-1-400-000-euron-hankkeen-jolla-rakennetaan-tuulivoiman-ja-aurinkopaneeliratkaisuiden-osaamiskeskittymaa/>

Becker, Bronwyn, Dawson, Patrick, Devine, Karen, Hannum, Karla, Hill, Steve, Leydens, Jon, Matuskevich, Debbie, Traver, Carol ja Palmquist, Mike. 2005. Case studies. Writing@CSU. Colorado State University Department of English.

Viitattu 29.01.2024

<https://writing.colostate.edu/guides/guide.cfm?guideid=60>

Ahonen, Jännes, Kunttu ym. 2012. Käyttövarmuuden hallinta – standardista käytäntöön. Raportti. VTT.

Viitattu 13.04.2024

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T69.pdf>

Holma Jussi. 2017. Tuotteen elinkaaren hallinta. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

Viitattu 14.04.2024.

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/25391/holma.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

PSK 6201 - KUNNOSSAPITO: KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT 2022. Standardi. PSK-Standardisointiyhdistys Ry.

Viitattu 14.04.2024

<https://psk-standardisointi.fi/psk-6201-2/>

Wind Turbine Maintenance Guide. 2012. Technical report. Electric Power Research Institute.

Viitattu 29.01.2024

<https://www.epri.com/research/products/1024891>

Hietala Petri. 2020. Tuulivoimatekniikka - perustietoa tuulivoimasta. Opinnäytetyö. Centria ammattikorkeakoulu.

Viitattu 30.01.2024.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335088/Hietala\\_Petri.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335088/Hietala_Petri.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Tuulivoima Suomessa 2023. 2023. Powerpoint-esitys. Suomen Tuulivoimayhdistys.

Viitattu 30.01.2024.

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot-2023-2.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-2.pdf)

Suomeen asennetaan samanlaisia voimaloita kuin muille vastaaville alueille. 2016. Powerpoint-esitys. Tuulivoimayhdistykset tutkimukset ja julkaisut. Suomen Tuulivoimayhdistys ry.

Viitattu 06.05.2024

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/931-voimalakoot\\_2016\\_final\\_15\\_2\\_pptx.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/931-voimalakoot_2016_final_15_2_pptx.pdf)

Suomalaisia tuulivoimakomponenttien valmistajia ja palveluntarjoajia. 2023. Infograafi. Tuulivoimayhdistyksen aineistopankki. Suomen Tuulivoimayhdistys ry.

Viitattu 11.04.2024

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/komponenttipalveluntarjoajat\\_2023\\_14.3-scaled.jpg](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/komponenttipalveluntarjoajat_2023_14.3-scaled.jpg)

Life Cycle Assessments of our turbines. 2024. Elinkaarianalyysi. Vestas Wind Systems A/S

Viitattu 30.04.2024

<https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/lifecycle-assessments>

Environmental Product Declaration SG 8.0-167 DD. Ei tietoa. Ympäristöseloste.Siemens Gamesa.

Viitattu 30.04.2024

<https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/sustainability/environment/siemens-gamesa-environmental-product-declaration-epd-sg-8-0-167.pdf>

LCA of a Nordex Windfarm with Delta4000 turbines. 2020. Elinkaarianalyysi. Nordex Acciona.

Viitattu 30.04.2024

<https://www.nordex-online.com/wp-content/uploads/sites/3/2020/03/LCA-of-Nordex-Windfarm-with-Delta4000-turbines-without-Annex-B.pdf>

Turkia Ville & Holttinen Hannele. 2013. Tuulivoiman tuotantotilastot, Vuosiraportti 2011. Raportti. VTT.

Viitattu 24.01.2024

<https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2013/T74.pdf>

Palmu Kimmo. 2016. Tuulivoimaloiden huoltokäytännöt Saksassa. 2016. Raportti.

Viitattu 30.01.2024

<https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/tuulivoimaloiden-huoltokaytannot-saksassa.pdf>

Chan Daniel, Mo John. 2017. Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines. Kirja. RMIT University, Melbourne.

Viitattu 15.04.2024

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301789>

Tuulivoima Suomessa 2023. 2023. Powerpoint-esitys. Suomen Tuulivoimayhdistys.

Viitattu 30.01.2024.

[https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot-2023-2.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-2.pdf)

Okka Lassi. 2022. Tuulivoimaloiden jäätäminen. Energiatekniikan kandidaatintyö. Lappeenranta–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Viitattu 04.05.2024

<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164187/Kandidaatinty%C3%B6%20Okka%20Lassi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wolf, M. J., Emerson, J. W., Esty, D. C., de Sherbinin, A., Wendling, Z. A., et al. 2022. 2022 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy.

Viitattu 06.05.2024

<https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/rec>

Mattila Vesa. 2021. Tuulivoimalat tuotannosta kiertoon. Artikkeliverkkolehdestä.

Energiateollisuus ry.

Viitattu 01.05.2024

<https://www.energiatiedot.fi/kategoriat/tuotanto/tuulivoimalat-tuotannosta-kiertoon.html>

Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C. 2020. Tekninen raportti. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Joint Research Centre (JRC), the European Commission's science and knowledge service.

Viitattu 25.04.2024

[https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/04/rms\\_for\\_wind\\_and\\_solar\\_published\\_v2.pdf](https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2020/04/rms_for_wind_and_solar_published_v2.pdf)

Cao, Zheng & Li, Shujian & Li, Changping & Li, Pengnan & Ko, Tae Jo. 2022. Formation mechanism and detection and evaluation methods as well as repair technology of crack damage in fiber-reinforced composite wind turbine blade: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 120. 1-24. 10.1007/s00170-022-09230-z.

Viitattu 12.03.2024

[https://www.researchgate.net/figure/Diagrammatic-sketch-of-a-typical-wind-turbine-blade-structure\\_fig1\\_360078049](https://www.researchgate.net/figure/Diagrammatic-sketch-of-a-typical-wind-turbine-blade-structure_fig1_360078049)

Tuulivoimalan purkamisen kustannukset. 2023. Raportti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry.

Viitattu 27.04.2024

<https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tutkimukset-ja-julkaisut/tuulivoiman-purkukustannukset>

Orantie Kalervo, Kuosa Hannele, Häkkä-Rönholm Eva. 2001. Säteilyturvakeskuksen raportti. Ydinvoimalan suojarakennuksen pinnoitteita koskevat vaatimukset. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka.

Viitattu 03.05.2024

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/32/049/32049349.pdf>

How a Wind Turbine Works - Text Version. Ei tietoa. Tekstiversio tuulivoimalan toimintaa havainnollistavasta videosta verkkosivulla. Wind Energy Technologies Office, Office of Energy Efficiency & Renewable energy. US Department of Energy.

Viitattu 16.05.2024

<https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version>

Mäkinen Mikko. 2019. Opinnäytetyö. Tuulivoimalan kunnonvalvontatarkastuksiin liittyvät käytännöt ja vaatimukset. Hämeen ammattikorkeakoulu.

Viitattu 14.05.2024.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166168/Makinen\\_Mikko.pdf;jsessionid=138713FA15BB2390444FEDB5875EA470?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166168/Makinen_Mikko.pdf;jsessionid=138713FA15BB2390444FEDB5875EA470?sequence=2)

Bayles Corey. 2020. Julkaisu verkkolehdessä. Extending wind turbine life with pitch bearing upgrades Windpower Engineering & Development.

Viitattu 18.05.2024.

<https://www.windpowerengineering.com/extending-wind-turbine-life-with-pitch-bearing-upgrades/>

Blaabjerg Frede, Liivik Elizaveta. 2018. Wind Turbines. Kooste artikkeleista. MDPI.

Viitattu 22.04.2024

<https://www.mdpi.com/books/reprint/1051-wind-turbines>

Annola Akseli. 2022. Tuulivoimalan siivenkääntöhammastuksen vauriot. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu.

Viitattu 11.04.2024.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/750364/Annola\\_Akseli.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/750364/Annola_Akseli.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Sheng, Shawn & Link, H. & La Cava, William & Dam, J. & McNiff, B. & Veers, Paul & Keller, Jonathan & Butterfield, S. & Oyague, F. 2011. Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring During GRC Phase 1 and Phase 2 Testing. Tekninen raportti. National Renewable Energy Laboratory.

Viitattu 12.05.2024

[https://www.researchgate.net/figure/Typical-utility-scale-wind-turbine-drivetrain\\_fig5\\_255248098](https://www.researchgate.net/figure/Typical-utility-scale-wind-turbine-drivetrain_fig5_255248098)

Fundamentals of Wind Turbines. Ei tietoa. Artikkelit verkkolehdessä. Wind Systems Magazine

Viitattu 11.05.2024

<https://www.windsystemsmag.com/fundamentals-of-wind-turbines/>

Cui Yi-Fan, Dong Lian-Jun, He Wei-Dong, Zhang Ying-Hui. 2024. Temperature Prediction for 3 MW Wind-Turbine Gearbox Based on Thermal Network Model. Artikkel. MDPI.

Viitattu 18.05.2024.

<https://www.mdpi.com/2075-1702/12/3/175>

Jonathan Keller, Gould Benjamin, Greco Aaron. 2019. Investigation of Bearing Axial Cracking: Benchtop and Full-Scale Test Results. Tekninen raportti. National Renewable Energy Laboratory

Viitattu 18.05.2024

<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67523.pdf>

Sheng Shawn, Fields Jason, Cooperman Aubryn, Shields Matt. 2022. Wind Plant Operations and Maintenance Challenges and Research Opportunities. National Renewable Energy Laboratory.

Viitattu 31.04.2024

<https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84457.pdf>

Al-Mayali, Maasi & Hutt, S. & Sharif, Kayri & Clarke, A. & Evans, H. 2018. Experimental and Numerical Study of Micropitting Initiation in Real Rough Surfaces in a Micro-elastohydrodynamic Lubrication Regime. Tribology Letters. 66. 10.1007/s11249-018-1110-2.

Viitattu 18.05.2024.

[https://www.researchgate.net/publication/328701073\\_Experimental\\_and\\_Numerical\\_Study\\_of\\_Micropitting\\_Initiation\\_in\\_Real\\_Rough\\_Surfaces\\_in\\_a\\_Micro-elastohydrodynamic\\_Lubrication\\_Regime](https://www.researchgate.net/publication/328701073_Experimental_and_Numerical_Study_of_Micropitting_Initiation_in_Real_Rough_Surfaces_in_a_Micro-elastohydrodynamic_Lubrication_Regime)

Savolainen Matti. 2019. An Investigation into Scuffing and Subsurface Fatigue in a Lubricated Rolling/ Sliding Contact. Opinnäytetyö. Tampereen Yliopisto.

Viitattu 03.05.2024

[https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114127/TUNI\\_savolainen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114127/TUNI_savolainen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Čonka Zsolt, Beňa Ľubomír, Štefko Róbert, Pavlík Marek, Holcsik Peter & Pálfi Judith. 2022. Wind Turbine Power Control According to EU Legislation. MDPI.

Viitattu 08.05.2024

<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8614>