

**TUULIVOIMALAN KUNNONVALVONTATARKASTUKSIIN  
LIITTYVÄT KÄYTÄNNÖT JA VAATIMUKSET**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Valkeakoski, Sähkö- ja automaatiotekniikka

Kevät, 2019

Mikko Mäkinen

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Valkeakoski

---

<b>Tekijä</b>	Mikko Mäkinen	<b>Vuosi</b> 2019
<b>Työn nimi</b>	Tuulivoimalan kunnonvalvontatarkastuksiin liittyvät käytännöt ja vaatimukset	
<b>Työn ohjaajat</b>	Katariina Penttilä	

---

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tuulivoimaloihin tehtävät kunnonvalvonnan mittaukset ja tarkastukset, sekä niiden suorittamisen vaatimukset ja sovellettavat standardit. Niiden lisäksi tuli selvittää asiakaspohjaa kyseisille tarkastuksille ja tehdä tarkastusten suorittamista varten työohje ja raportointipohja. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Nome Oy.

Työssä esitellään aluksi yleisesti tuulivoiman tuotantoa, tuulivoimaloita ja Suomessa toimintaansa harjoittavia tuulivoimatoimijoita. Seuraavaksi käsitellään työtä varten tehty asiakaskysely ja mittauksiin liittyvät vaatimukset ja standardit. Tämän jälkeen perehdytään vielä tarkemmin suoritettaviin tarkastuksiin ja niissä käytettäviin laitteisiin ja välineisiin.

Työtä varten tutkittavista tarkastusmenetelmistä pääpaino oli värähtelymittauksilla, voiteluöljyn öljyanalyysillä ja visuaalisilla endoskoopitarkastuksilla. Näiden lisäksi asiakaskyselyllä selvitettiin tarve muunlaisille mittauksille ja tarkastuksille.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tehtyä tarvittavat selvitykset ja valmistellut tuulivoimaloiden kunnonvalvontatarkastusten tekemisen aloittamiseksi. Työn tulosten avulla Nome Oy voi laajentaa liiketoimintaansa tuulivoimalatarkastusten pariin.

**Avainsanat** Kunnonvalvonta, tuulivoima, värähtelymittaus

**Sivut** 40 sivua, joista liitteitä 1 sivu

Electrical and Automation Engineering  
Valkeakoski

---

<b>Author</b>	Mikko Mäkinen	<b>Year</b> 2019
<b>Subject</b>	Requirements and practices of condition monitoring inspections of wind turbines	
<b>Supervisors</b>	Katariina Penttilä	

---

ABSTRACT

The aim of this thesis project was to find out the measurements and inspections, that are conducted for condition monitoring of wind turbines, as well as the requirements and the standards that are applied to them. Also a customer base needed to be determined along with instructions and a reporting template for performing of the inspections. The thesis was commissioned by Nome Oy.

General information on the production of wind power, as well as wind turbines and companies that operate in the wind power industry in Finland are introduced at the beginning of the thesis. Next, the customer survey made for the thesis, and the requirements for the measurements and the standards that are applied to them, are presented. After that, there is a further look into the inspections, and the gear and instruments that are used conducting them.

Of the methods of inspection studied for the thesis, the main focus was on vibration measurements, lubrication oil analysis and the visual inspections conducted with an endoscope. In addition to these, the need for other inspections was determined with a customer survey.

As the result of the project the necessary specifications and preparations were done for conducting condition monitoring inspections in wind turbines. With the results of the project Nome Oy will be able to expand its business to condition monitoring of wind turbines

**Keywords** Condition monitoring, wind power, vibration measurement

**Pages** 40 pages including appendices 1 page

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	TUULI ENERGIANLÄHTEENÄ .....	2
2.1	Tuulivoiman tuotanto Suomessa .....	2
2.2	Tuulivoiman tuotanto maailmalla .....	4
3	TUULIVOIMALAT.....	5
3.1	Tuulivoimalan rakenne.....	7
3.2	Nasellin sisällä sijaitsevat osat .....	8
4	TUULIVOIMALOIDEN VIKAANTUMINEN.....	11
5	TUULIVOIMALATOIMIJAT SUOMESSA.....	12
5.1	Tuulivoiman omistajat.....	12
5.2	Tuulivoimaloiden kunnonvalvonta.....	13
6	ASIAKASKYSELY .....	14
7	MITTAUKSIIN JA TARKASTUKSIIN LIITTYVÄT STANDARDIT JA VAATIMUKSET .....	15
7.1	Värähtelymittaukset.....	15
7.2	Öljyanalyysi.....	17
7.3	Visuaaliset tarkastukset .....	18
7.4	Äänimittaukset .....	18
7.5	Laittevalmistajien ja toimijoiden vaatimukset .....	20
7.6	Mittauksiin vaikuttavat tekijät .....	20
8	TUULIVOIMALOIHIN SUORITETTAVAT MITTAUKSET JA TARKASTUKSET .....	20
8.1	Värähtelymittaus.....	21
8.2	Akseleiden linjaukset.....	24
8.3	Visuaaliset tarkastukset .....	25
8.4	Öljyanalyysi.....	27
8.5	Äänimittaukset .....	27
9	LAITTEET JA VÄLINEET .....	28
9.1	Mittalaitteet .....	28
9.1.1	Värähtelymittaus .....	29
9.1.2	Akseleiden linjaukset.....	32
9.1.3	Visuaaliset tarkastukset.....	33
9.1.4	Öljyanalyysi .....	34
9.1.5	Äänimittaukset .....	34
9.2	Turvavälineet.....	35
10	KOULUTUKSET JA PÄTEVYYDET .....	35
11	YHTEENVETO .....	36
	LÄHTEET.....	37

Liitteet

Liite 1

Suomen tuulivoimalaitosten viat vuonna 2011

## 1 JOHDANTO

Kunnonvalvonnan tarkoitus voidaan määrittää seuraavasti: ”Sellaisten tietojen tuottaminen, että koneita ja laitteita voidaan käyttää keskeytyksettä suunnitellun käyttöjakson ja suorittaa oikea-aikaisesti korjaukset, huollot ja parannukset” (Nohynek & Lumme, 2004, s. 35). Teollisuudessa on havaittu kunnonvalvonnan vaikutus toiminnan kannattavuuteen ja koneiden käyttöasteeseen. Tätä on edistänyt suuresti tietokoneavusteisen kunnonvalvonnan yleistymisen. Sillä saadaan hallittua ja käsiteltyä suurempia mittaustietomääriä, minkä lisäksi koneet ovat jatkuvassa valvonnassa, mikä voidaan hoitaa myös etänä. Kunnonvalvonnan avulla keskimääräistä kunnossapitoaikaa saadaan lyhennettyä, koska viat eivät pääse kehittymään vaurioiksi ja tarvittavat työt voidaan suunnitella paremmin.

Tuulivoimaloiden kunnossapito ei eroa muidenkaan koneiden kunnossapidosta siinä, että vaikka huoltoja ja tarkastuksia tehdään suunnitellusti tasaisin välein, ovat yllättävät laiterikot silti mahdollisia. Tuulivoimaloissa suuria haasteita aiheuttaa kuitenkin logistiikka, sillä suuri osa voimaloista sijaitsee pitkien välimatkojen päässä ja usein mahdollisesti vaikeissa paikoissa. Lisäksi osien kuljettaminen ylös naselliin voi olla haastavaa ja työn tekeminen voi olla hitaampaa. Myös olosuhteet vaikuttavat töiden hidastumiseen. Liian kovalla tuulella tai ukonilmalla voimalaan ei saa mennä työskentelemään. Lisäksi kylmä ilma asettaa omia haasteita korjaustöille.

Työn tavoitteena on selvittää tuulivoimaloihin tehtävät kunnonvalvonnan mittaukset ja tarkastukset, sekä niiden suorittamisen vaatimukset ja sovellettavat standardit. Niiden lisäksi tuli selvittää asiakaspohjaa kyseisille tarkastuksille ja tehdä tarkastusten suorittamista varten työohje ja raportointipohja. Aihe on tärkeä työn tilaajalle, koska työn avulla saadaan tehtyä tarvittavat selvitykset tuulivoimaloiden kunnonvalvontatarkastusten tekemisen aloittamiseksi.

Työn tilaaja on Nome Oy. Nome Oy on ennakoivan kunnossapidon yritys, joka tuottaa ennakoivan kunnossapidon palveluja ja mittauslaitteistoja teollisuuteen. Yrityksen liiketoimintaan kuuluu kunnonvalvontajärjestelmien valmistamisen lisäksi, kunnonvalvonnan mittaukset ja tarkastukset, ennakoivan kunnossapidon kehitysprojektit, koulutukset, tasapainotukset sekä mittalaitteiden, antureiden, kaapeleiden ja tarvikkeiden myynti. Nomella on asiakkaita lähes kaikilla teollisuuden aloilla. Nome Oy on tehnyt tarkastuksia tuulivoimaloihin aikaisemmin, mutta koska välissä on kerennyt kulu vähän aikaa, oli tarpeen selvittää, onko alalle tullut uusia standardeja tai vaatimuksia, jotka tulisi olla tiedossa ennen tarkastusten uudelleen aloittamista. Työn valmistuttua tilaajalla on selvillä potentiaalinen asiakaspohja tarkastustoiminnalle, sekä tarkastusten suorittamiseen vaikuttavat vaatimukset.

## 2 TUULI ENERGIANLÄHTEENÄ

Tuulivoimassa on kyse ilman virtauksen liike-energian muuntamisesta sähköenergiaksi. Tuulella on kyse ilmamolekyylien liikkeestä suhteessa maapallon pyörimisliikkeeseen. Ilmamolekyylit ovat jatkuvassa satunnaisessa liikkeessä. Kun ilma on kontaktissa kappaleen kanssa, törmäilevät ilmamolekyylit kappaleen pintaan kohdistuen siihen voiman. Ilmanpaine on kyseinen voima pinta-alayksikköä kohti. (Korpela, 2016, s.7)

Ilmanpaineeseen vaikuttavat muuttujat ovat ilmamolekyylien massa, gravitaatiokiihtyvyys ja lämpötila. Vaakasuuntaisissa ilmanpaineen muutoksissa gravitaation vaikutus ei muutu. Ilmamolekyylin massan muutokset liittyvät ilman kosteuteen. Yleisesti ilman lämpötilan muutokset vaikuttavat kuitenkin ilmanpaineeseen voimakkaammin kuin ilmankosteuden muutokset. (Korpela, 2016, s.10) Suurimpana vaikuttajana tuulen syntymiseen toimii siis aurinko, joka lämmittää maapalloa epätasaisesti, luoden ilmanpaineeseen eroja.

Raaka-aineiden kierrätys huomioon ottaen, tuulivoimalalla saadaan tuotettua sen rakentamiseen, raaka-aineiden hankintaan, turbiinin valmistamiseen, turbiinin kuljettamiseen ja pystyttämiseen käytetty energia takaisin 3-9 kuukaudessa. Tämän lisäksi luonnonvaroja kuluu vain vähän, sillä lähes kaikki tuulivoimaloihin käytetyt materiaalit ovat kierrätettäviä. (Huh-tinen, Korhonen, Pimiä, Urpalainen 2013, s.280)

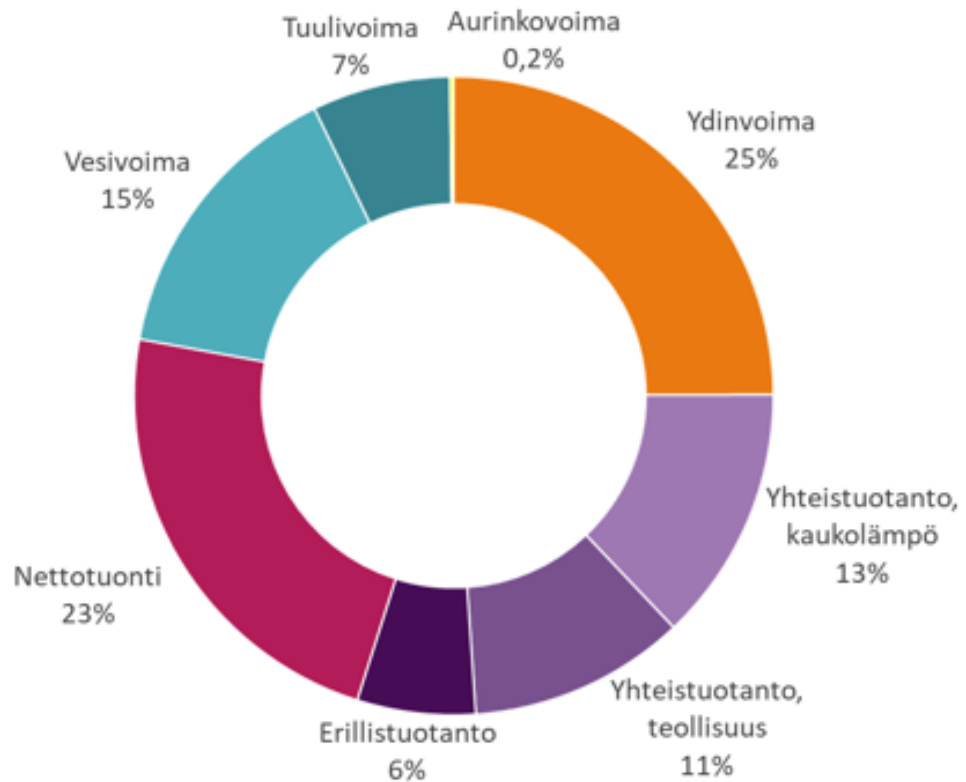
### 2.1 Tuulivoiman tuotanto Suomessa

Suomen tuulivoimakapasiteetti vuonna 2018 oli 2041 MW. 10 vuodessa Suomen tuulivoimaloiden määrä on noussut 118 laitoksesta tämän hetkiseen 698:aan laitokseen. Vuonna 2018 Suomeen ei asennettu yhtään tuulivoimalaa, johtuen varmaankin alhaisesta sähkön hinnasta ja siitä, ettei tuulivoiman rakentamista tuettu yhteiskunnan toimesta. Tänä ja ensi vuonna Suomeen nousee yli 80 tuulivoimalaa ilman yhteiskunnan tukea ja mahdollisesti vielä 90 voimalaa lisää uusiutuvan energian tuella. (Mainio, 2019) Suomessa hallitus on asettanut tavoitteeksi, että vuoteen 2030 mennessä 50 % Suomen energian tuotannosta olisi uusiutuvilla energiamuodoilla.

Suomessa on hyvät tuuliolosuhteet, mutta tuulen keskinopeus on hieman alhainen. Suomessa on melko samanlaisia metsäisiä alueita kuin Ruotsissa ja Saksassa. Näihin olosuhteisiin kannattaa rakentaa korkeatornaisia ja pitkälapaisia voimaloita. Vaikka Saksa ja Suomi ovat melko samankokoisia maa-alueiltaan, on Saksassa yli 28000 tuulivoimalaa verrattuna Suomen vain 698:aan voimalaan.

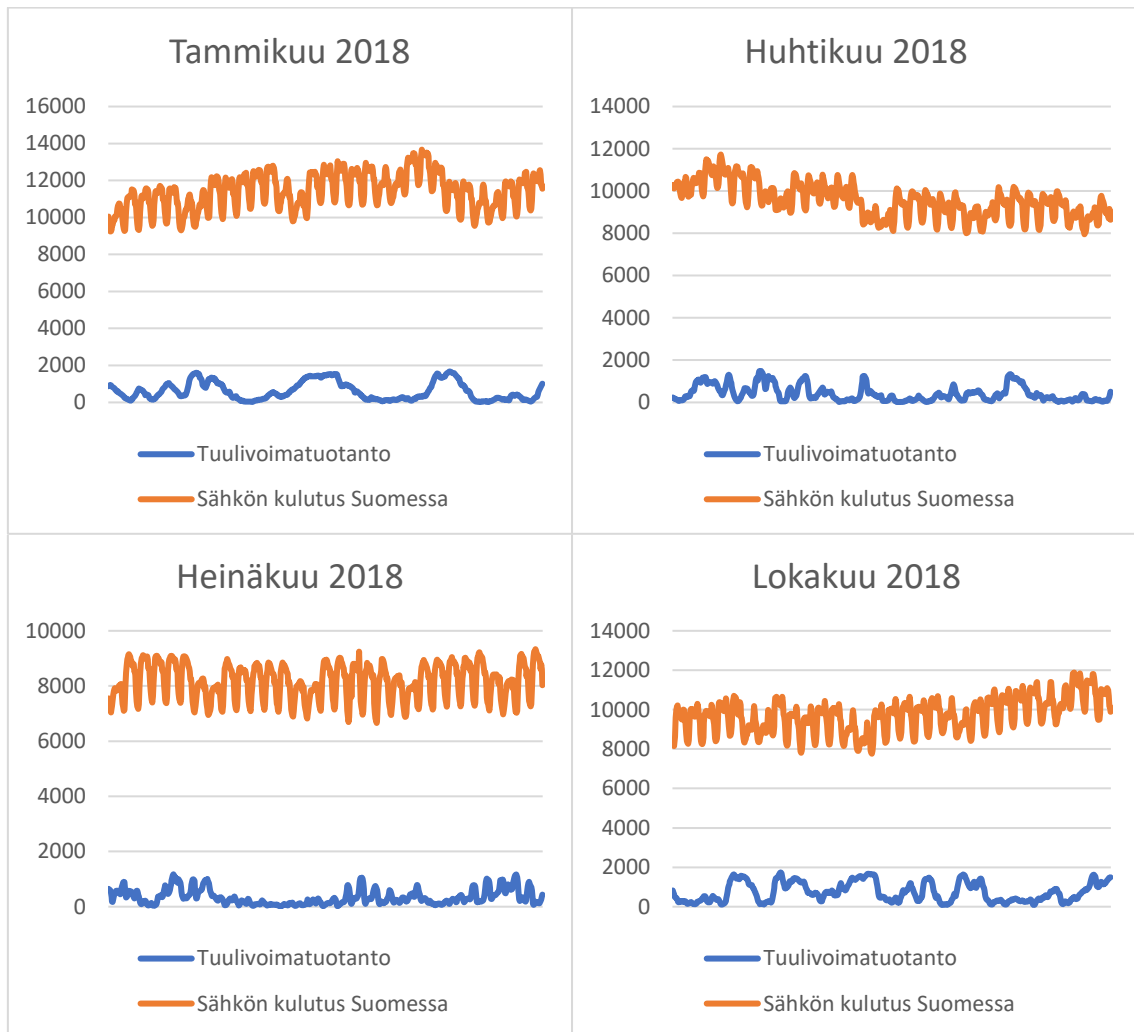
Vaikka tuulivoimaloiden määrä onkin lisääntynyt huomattavasti, ei niiden tuotanto siltikään kattanut sähkön tuotannosta, mukaan lukien tuotu

sähkö, Suomessa vuonna 2018 kuin 7 % (Kuva 1). Kun tarkastellaan vain Suomessa tuotettua sähköä, oli tuulivoiman tuottama osuus 9 %.



Kuva 1. Sähkön tuotanto Suomessa ja tuonti 2018 (Energiateollisuus 2019)

Kuvaan 2 on piirretty viivadiagrammit tuulivoiman tuotosta ja sähkön kulutuksesta Suomessa neljän kuukauden osalta vuonna 2018. Diagrammeista selviää, että sähkön kulutus oli Suomessa talvella keskimäärin 11000-12000 megawatin luokkaa, kun lämpimämpinä kuukausina kulutus oli alle 10000 MW. Tuulivoiman tuotanto pääsi parhaimpina hetkinä lähelle 2000 MW, mutta pääasiassa tuotto oli alle 1000 MW:n luokkaa. Valituista kuukausista lokakuussa tuulivoima kattoi parhaiten energiantarvetta, mutta silloinkin tuulivoiman tuotto oli vielä melko pieni osa tarvittavasta energiamäärästä.



Kuva 2. Tuulivoiman tuotto ja sähkön kulutus Suomessa eri kuukausina vuonna 2018

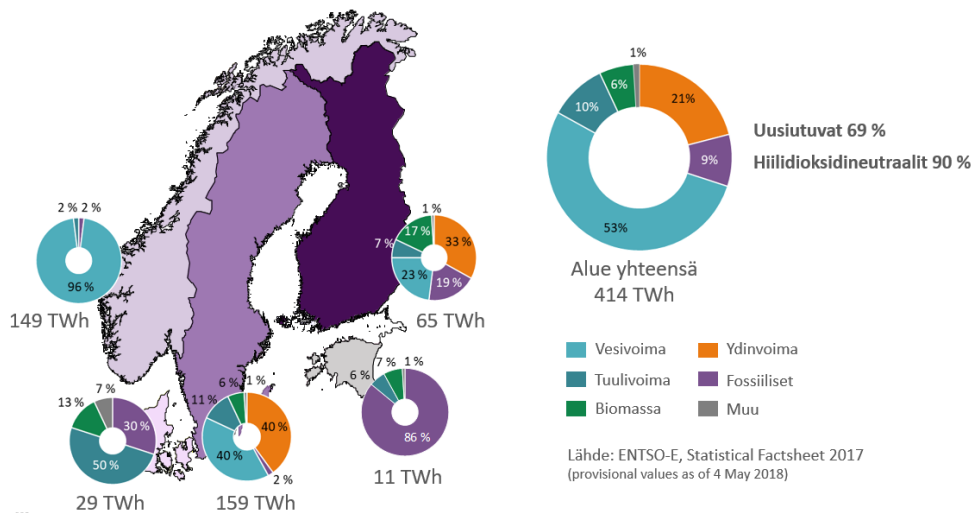
## 2.2 Tuulivoiman tuotanto maailmalla

Vuonna 2017 maailmanlaajuisesti kaikkien tuulivoimaloiden yhteenlaskettu kapasiteetti oli 539 GW. Vuoden 2017 aikana tuulivoimakapasiteetti kasvoi noin 53 GW:lla, joka oli hieman enemmän kuin vuoden 2016 51 GW:n kasvu. Vaikka kasvu oli vuonna 2017 määrällisesti kolmanneksi suurinta ikinä, oli prosentuaalinen 10,8 prosentin kasvu kuitenkin alhaisin siitä lähtien, kun 1900-luvun lopulla tuulivoimaloiden teollinen käyttöönotto alkoi. (WWEA, 2018)

Maailmanlaajuisesti tuulivoima kattaa sähkönkulutuksesta noin 5 %. Euroopassa kulutetusta sähköstä tuotetaan tuulivoimalla jo yli 10 %. Tuulivoima on olennainen osa monien maiden suunnitelmassa fossiilisten polttoaineiden ja ydinvoiman käytön vähentämiseksi. Tanska tuottaa prosentuaalisesti suurimman osan omasta energiaan tuulella. Vuonna 2017 Tanska teki ennätysten tuottamalla 43 % energiastaan tuulivoimalla. Mui-

hin maihin, jotka tuottivat yli 10 % energiastaan tuulella, kuuluivat esimerkiksi Saksa, Espanja, Irlanti ja Ruotsi. Määrällisesti ylivoimaisesti suurin tuulivoimakapasiteetti on Kiinalla, jolla sitä on 188 GW. Toiseksi suurimman kapasiteetin omaavan USA:n 89 GW ei ole edes puolet Kiinan vastaavasta. Euroopassa kärkipaikkaa pitää Saksa 56 GW:lla. (WWEA, 2018)

Pohjoismaissa energiaa tuotetaan hyvin pitkälti jokaisen maan geologisten vahvuuksien mukaan kuten kuvasta 3 selviää. Norjan topografia on kuin luotu vesivoiman tuottoon, joten siellä ei juuri muilla tavoin energiaa tuotetakaan. Myös Ruotsilla on melko otollinen maasto vesivoimalle, tosin siellä energiaa tuotetaan huomattavasti monipuolisemmin. Islannissa on turvauduttu pääasiassa fossiilisiin polttoaineisiin, kun taas Tanskassa tuotetaan maailmassa eniten tuulivoimaa suhteessa maan muuhun energiantuotantoon. Suomella ei ole suuria etuja sijaintinsa tai maastonsa puolesta, joten täällä energiaa tuotetaan melko monipuolisin keinoin.



Kuva 3. Sähkön tuotanto pohjoismaissa 2017 (Energiateollisuus 2019)

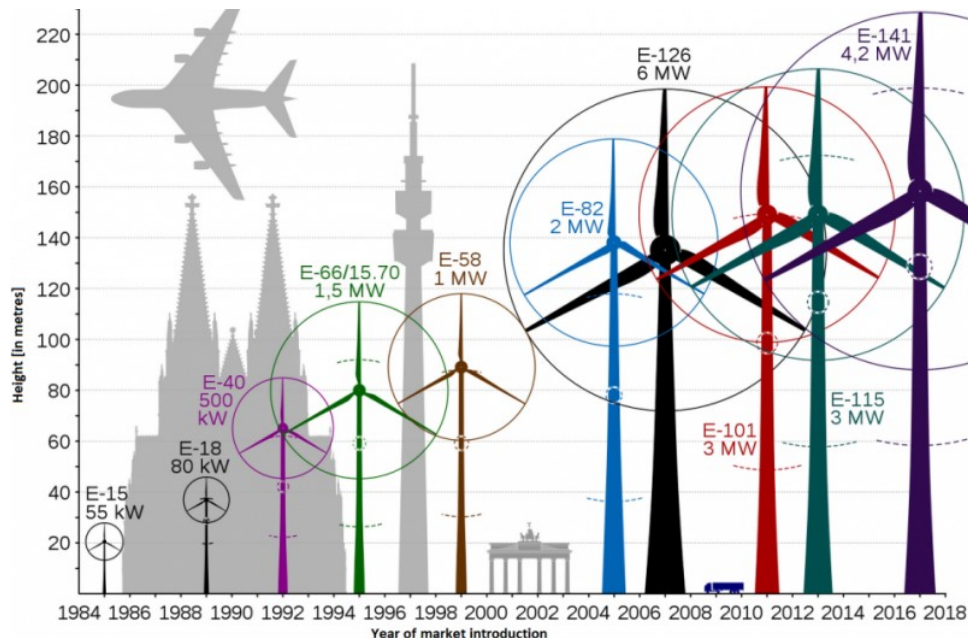
Tuulivoiman tulevaisuuden näkymät ovat hyvät, sillä se on kilpailukykyisin tapa lisätä tuotantokapasiteettia olemassa olevaan verkkoon useimmilla maailman markkinoilla. Tämän lisäksi hiilidioksidipäästöjä halutaan alentaa maailmanlaajuisesti, joka lisää kiinnostusta uusiutuviin energiantuotantomuotoihin. Global Wind Energy Council (GWEC) on ennustanut, että vuoteen 2020 mennessä tuulivoiman avulla olisi säästetty 8,2 miljardia tonnia hiilidioksidia. (Letcher, 2017, s.559)

### 3 TUULIVOIMALAT

Potkurimalliset laitokset ovat syrjäyttäneet muut laitostyypit ja ne ovatkin ylivoimaisesti yleisimmin käytetty laitostyyppi tuulienergiatuotannossa. Potkurille merkittävimmän edun tuo se, että pyöriessään se peittää omaan

pinta-alaansa nähden erittäin suuren alan ja kykenee näin ollen tuottamaan omaan painoonsa nähden hyvin paljon tehoa. (Huhtinen ym., 2013, s.283)

Tuulivoimaloiden kohdalla on ehdottomasti totta, että mitä isompi, sitä parempi. Isommalla roottorilla saadaan suurempi pyyhkäisyala, mikä tuottaa enemmän energiaa. Ja mitä korkeampi tuulivoimala on, sitä korkeammalle roottori saadaan vietyä, missä tuuli puhaltaa tasaisemmin ja voimakkaammin. Niinpä tuulivoimaloista onkin kehitetty suurempia ja korkeampia koko niiden historian ajan, niin kuin kuvasta 4 selviää. Vuonna 2017 korkein tuulivoimala sijaitsi Saksassa. Sen naselli oli 178 metrin korkeudessa ja lapojen kärjet kävivät 246.5 metrin korkeudessa (Electrek 2017). General Electricillä ollaan ylittämässä tuo luku näillä näkymin vuonna 2021, kun heidän n. 260 metrisen Haliade-x voimalan ensimmäiset yksiköt pitäisi olla valmiita.



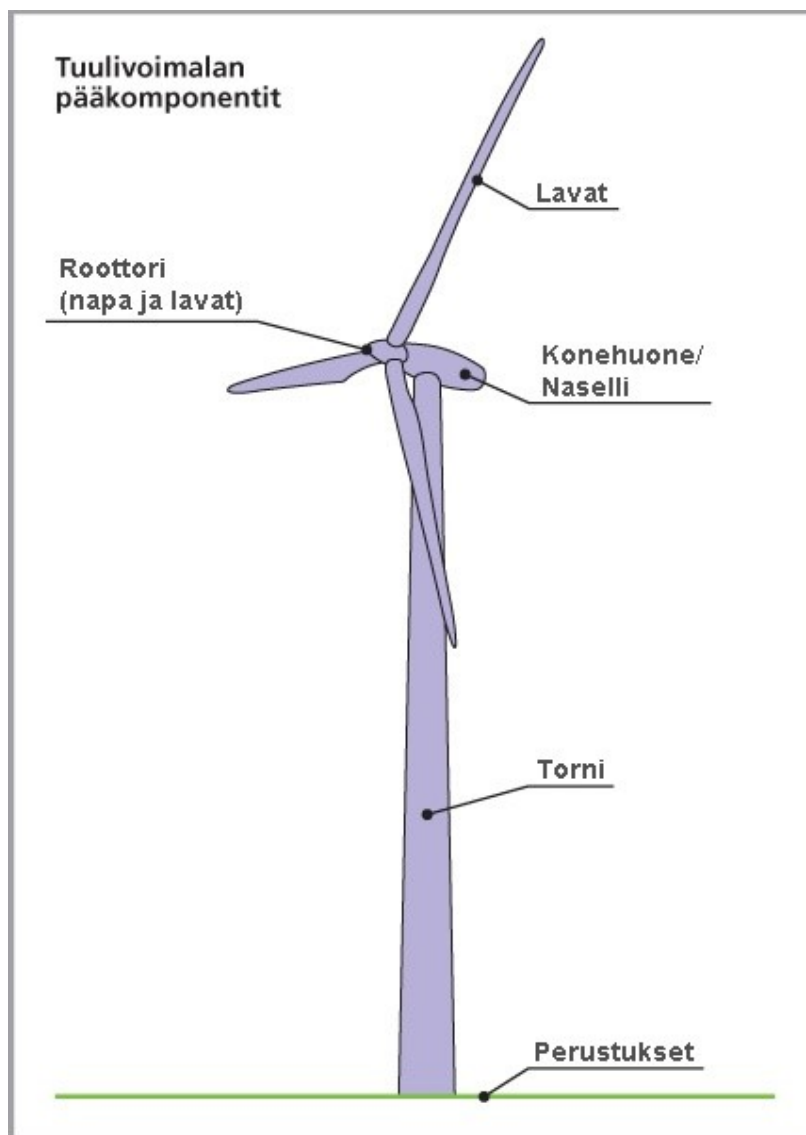
Kuva 4. Tuulivoimaloiden koon kasvu (Clean energy wire 2018)

Koska tuulivoimaloiden koot ovat kasvaneet tasaisesti, on myös niiden teholle käynyt luonnollisesti samoin. Kun vuonna 1991 vuosittain asennetun kapasiteetin keskiteho oli 173 kW, oli se vuonna 2017 jo 3,3 MW. Suomessa olevista tuulivoimaloista 70 % on 3-4 MW:n kokoluokassa. Suomeen asennetut voimalat ovat kokoluokaltaan samankaltaisia kuin mitä muualakin maailmassa asennetaan. Wind European tilastojen mukaan vuonna 2017 asennettiin maatuulivoimaloita, joiden keskiteho oli 3-3,4 MW, esimerkiksi Saksaan, Ruotsiin ja Tanskaan. (Suomen tuulivoimayhdistys n.d.) Suomessa tällä hetkellä olevissa voimaloissa pyyhkäisyala-alueet ovat tyypillisesti hehtaarin luokkaa, mutta suurempia voimaloita on tulossa ainakin lihin, minne ollaan rakentamassa voimaloita, joiden pyyhkäisyala-alueet tulevat olemaan 1,8 hehtaaria (Mainio, 2019).

### 3.1 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimaloihin liittyvässä termistössä on muutamien sanojen kohdalla eroja niiden normaaliin käyttöön nähden. Vaikka yleisesti sähköenergiaa tuottavissa voimalaitoksissa turbiinilla tarkoitetaan sitä laitetta, joka mekaanisen energiansa turvin pyörittää generaattoria, tuulivoimaloissa turbiinilla viitataan koko tuulivoimalaan. Tuulivoimalassa generaattoria pyörittävää lapojen ja navan kokonaisuutta kutsutaan taas roottoriksi. Tämä taas luo ongelman, koska roottori termillä kutsutaan myös generaattorin pyörivää osaa. Useimmiten asiayhteydestä kuitenkin selviää, kumpaa asiaa roottorilla tarkoitetaan. (Korpela, 2016, s. 6)

Ulospäin tuulivoimalasta näkyy käytännössä vain roottori, konehuone ja torni. Lavoista ja navasta koostuva roottori on kiinni konehuoneessa, jota kutsutaan tuulivoimaloissa naselliksi. Naselli taas on kiinnitetty torniin. Kuvassa 5 on kuvattu tuulivoimala siten, kun se ulospäin näyttäytyy.



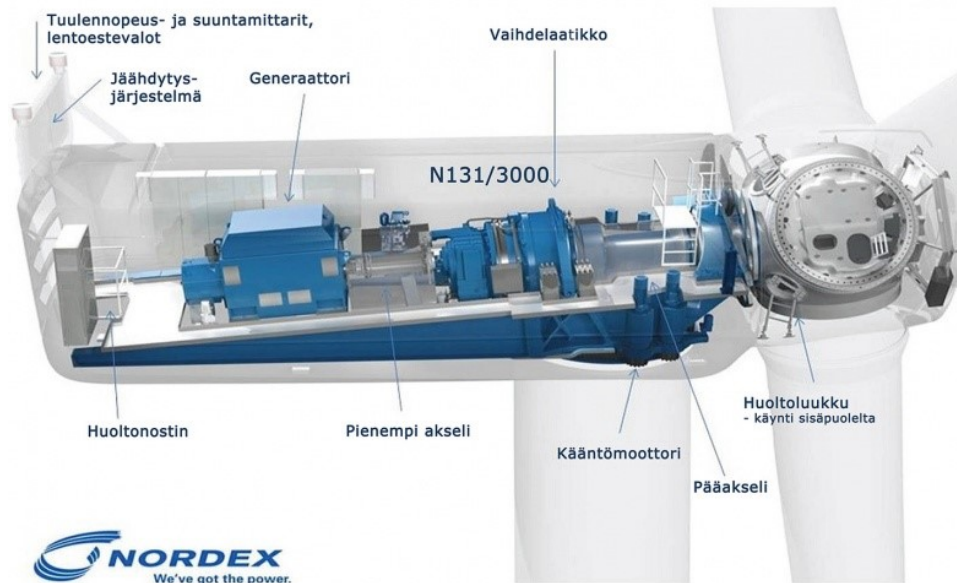
Kuva 5. Tuulivoimalan ulospäin näkyvät osat (Suomen tuulivoimayhdistys n.d.)

Jotta tuulivoimala voi tuottaa energiaa optimaalisella tavalla, tulee roottorin olla aina oikeassa kulmassa tuuleen nähden. Tästä syystä nasellin tulee olla kiinnitetty niin, että sitä voidaan kääntää aina tuuleen suuntaan. Pienet tuulivoimalat voivat kääntyä kohtisuoraan tuulta päin peräsimen avulla, mutta suuremmat voimalat tarvitsevat moottorin, joka hoitaa kääntämisen. Jotta naselli voisi kääntyä automaattisesti oikeaan suuntaan, tarvitsee tuulen suunta olla tiedossa. Tätä tehtävää varten nasellin katolla onkin yleensä tuulen nopeuden mittaamiseen tarkoitettujen laitteiden lisäksi tuulen suuntaa mittaavat laitteet. Kuvassa 6 on kuvattu nasellin sisältä löytyvät tuulivoimalan osat, mukaan lukien mittausinstrumentit ja nasellin kääntämisen hoitava moottori.

### 3.2 Nasellin sisällä sijaitsevat osat

Koska tuulivoimalan generaattori voi lämmetä huomattavasti käytön aikana, on voimaloissa oltava jäähdytys. Jäähdytys on yleensä toteutettu kompressorin sisältävällä laitteistolla, jossa jäähdytys perustuu väliaineen laajenemiseen. Lämmönvaihdin siirtää lämpöenergiaa generaattorista väliaineeseen, joka kiertää jäähdytyslaitteistoon, jossa se jäähtyy luovuttamalla energiaansa. Kun väliaine on jäähtynyt, kiertää se taas lämmönvaihtimelle. (Korpela, 2016, s.51)

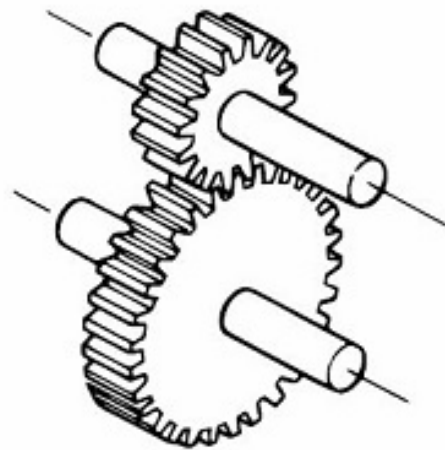
Kuten kuvassa 6 näkyy, generaattorin akseli ei ole voimalan pääakseli, vaan niiden välissä on vaihdelaatikko. Tämä johtuu yleensä siitä, että massatuotantogeneraattorit tarvitsevat pyörimisnopeudekseen jopa tuhansia kierroksia minuutissa, jotta niiden hyötysuhde nousisi riittävälle tasolle, kun taas tuulivoimaloiden roottorit pyörivät korkeintaan vain parikymmentä kierrosta minuutissa. Viime aikoina on kuitenkin yleistyneet suoravetoiset tuulivoimalat. Niissä roottorin akseli on generaattorin akseli, joten generaattorin roottori ja lavoista ja navasta koostuva roottori pyörivät samalla pyörimisnopeudella. Suoravetoisten voimaloiden vahvuus on se, että niissä ei ole vaihdelaatikkoa, minkä vikaantuminen on ollut yleisin syy tuulivoimaloiden käyttökatkoihin. Suoravetoisissa voimaloissa joudutaan kuitenkin panostamaan kalliimpiin, erityisesti tuulivoimaloihin suunniteltuihin generaattoreihin, jotta niiden hyötysuhde saadaan riittävät korkealle tasolle ilman vaihdelaatikkoa. (Korpela, 2016, s.50)



Kuva 6. Nasellissa olevat tuulivoimalan osat (Suomen tuulivoimayhdistys n.d.)

Tuulivoimaloissa käytetään pääasiassa kahdenlaisia vaihteistoja, rinnakkaisakseli- ja planeettavaihteistoja. Massansäästöystä näistäkin oikeastaan vain planeettavaihteistoja käytetään isommissa voimaloissa. (Korpela, 2016, s.51)

Rinnakkaisakselivaihteistoa käytetään pääasiassa pienemmissä voimaloissa. Siinä on nimensä mukaisesti kaksi akselia rinnakkain asennettuna, kuten kuvasta 7 selviää.

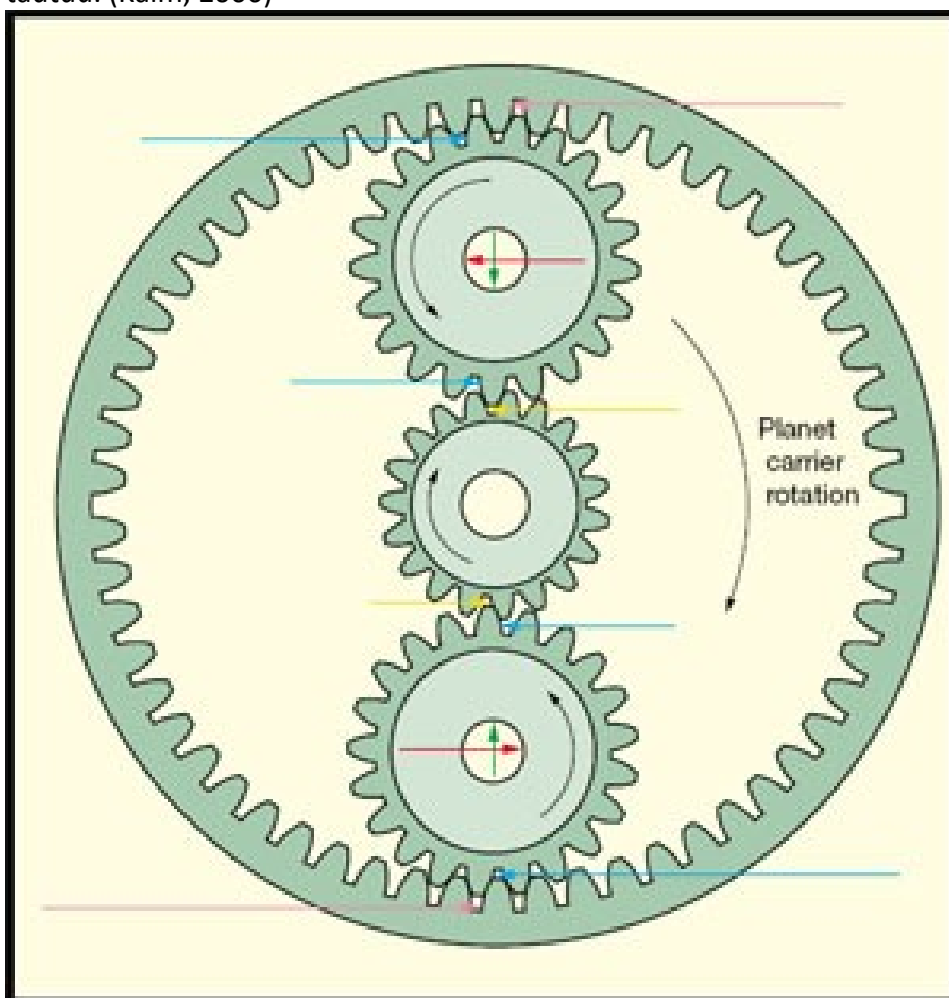


Kuva 7. Rinnakkaisakselivaihteisto (KHK Gears n.d.)

Yleisimmin suurissa tuulivoimaloissa käytetään siis planeettavaihteistoja. Niiden etuina rinnakkaisakselisiin vaihteisiin on esimerkiksi planeettaratkaisun kompaktius ja moninkertainen pyörimisnopeuden muutos.

Yksinkertaisimmillaan kuvassa 8 näkyvä planeettavaihteisto sisältää kolme erilaista hammaspyörää. Planeettapyörät pyörivät akselien ympäri, jotka kiertävät aurinkopyörää, joka pyörii paikallaan. Paikalleen kiinnitetty kehäpyörä sitoo planeetat ulkopuolelta. Yksinkertaisessa planeettavaihteistossa syöttävä voima pyörittää aurinkopyörää suurella nopeudella. Tasaaisesti keskiakselin suhteen sijoitetut planeettapyörät ovat yhteydessä sekä aurinko- että kehäpyörään, joten niiden on pakko kiertää aurinkoa samalla kun ne pyörivät. Kaikki planeetat on kiinnitetty yhteen pyörivään osaan. Kun kyseinen osa pyörii, siitä välittyy hidas ja suurivääntöinen voima. Tuulivoimalan tapauksessa pääakselilta tulisi hidas ja suurivääntöinen voima planeettapyörille, josta se välittyisi aurinkopyörän kautta suurinopeuksisena voimana generaattorin akselille. (Kaim, 2000)

Jo yksinkertaisella planeettavaihteistolla nopeutta saadaan muutettua jopa 10:1. Yhdistämällä vähintään kaksi planeettapyörää samaan varteeseen, jolloin ne ovat yhteydessä eri pyörästöihin, joilla voi olla eri määrä hampaita ja ne voivat olla erikokoisia, saadaan nopeuden muutosta kasvatettua huomattavasti. Vaihtoehtoisesti nopeuden muutosta voidaan kasvatata kytkemällä vaihteistoja sarjaan, niin että edelliseltä vaihteistolta tuleva ulostulo kytketään seuraavan sisääntuloon, jolloin nopeuden muutos kertyy. (Kaim, 2000)



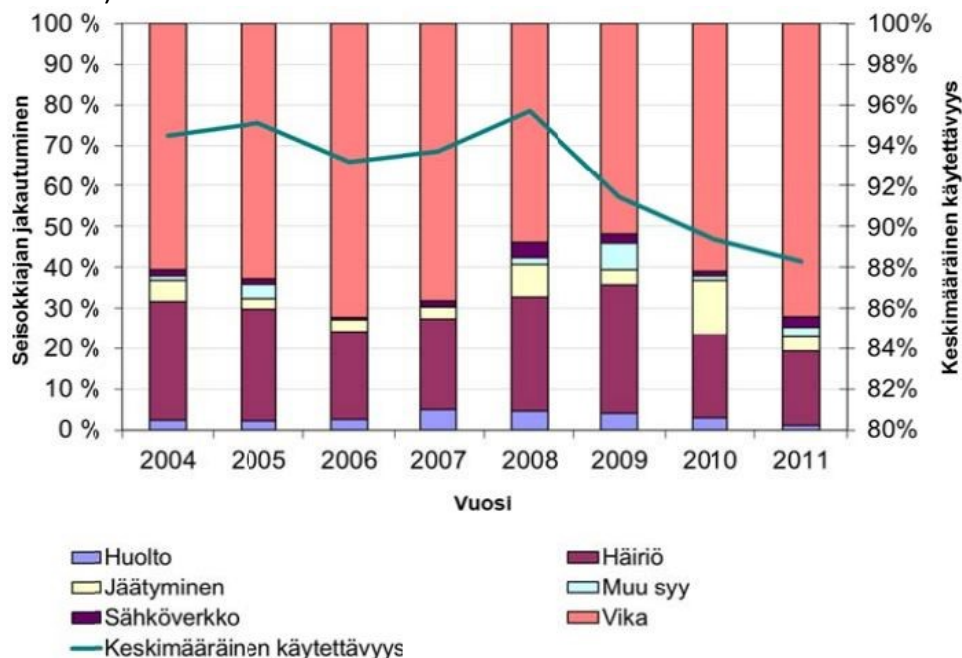
Kuva 8. Planeettavaihteisto (Kaim 2000)

Planeettavaihteistoon voitaisiin periaatteessa käyttää minkälaisia pyörästäjä tahansa, mutta käytännössä niihin käytetään vain lieriö- ja kartiopyörä. Näistä kahdesta lieriötä käytetään yleisimmin. Yleensä hammasteuissa kartiopyöräplaneettavaihteissa planeettapyörän akselit leikkaavat kohtisuoraan keskusakselin. (Halme, 2005, s.5)

Planeettavaihteiden värähtelyn tutkiminen on haasteellisempaa kuin tavallisten vaihteiden, koska niiden hammaspyöräryhmistä tulevien ryntöiskujen herättämät vasteet ovat vaikeammin hallittavissa. Planeettavaihteiden vikojen havaitsemiseen vaaditaan yleensä kehittyneempiä menetelmiä, vaikka niiden vikamuodot ovat melko yhtäläisiä perinteisiin hammasvaihteisiin verrattuna. (Halme, 2005, s.15)

#### 4 TUULIVOIMALOIDEN VIKAANTUMINEN

Vuosina 2000-2011 Suomen tuulivoimaloiden keskimääräinen tekninen käytettävyys oli 88,5-96 %. Tekninen käytettävyys tarkoittaa, kuinka suuren osan vuodesta voimala on ollut käyttökunnossa. Laitoksen käytettävyyteen eivät kuitenkaan vaikuta sähköverkosta aiheutuneet häiriöt, eivätkä sellaiset jäätymishäiriöt, joista on aiheutunut vain tuotannon väheneminen. Vuosina 2010 ja 2011 keskimääräinen tekninen käytettävyys oli 89 % ja 88,5 %. Kuvasta 9 selviää keskimääräinen käytettävyys ja kuinka seisokkiajat jakaantuivat vuosina 2004-2011. (Turkia & Holttinen, 2013, s.41-42)



Kuva 9. Seisokkiajan jakautuminen ja keskimääräinen käytettävyys 2004-2011 (Turkia & Holttinen 2013)

Teknistä käytettävyyttä alentavat tekijät voidaan jakaa suunniteltuihin ja suunnittelemattomiin käyttökatkoihin. Suunniteltuihin katkoihin lasetaan esimerkiksi yleensä puolen vuoden välein tehtävä huolto sekä tutkimukseen ja voimalan esittelyyn liittyvät katkot. Suunnittelemattoman käyttökatko on häiriö, jos voimala alkaa toimia uudelleenkäynnistämisen jälkeen moitteettomasti. Häiriöihin kuuluu Suomessa aikaa sadan ja kahdensadan tunnin väliin laitosta kohden vuosittain. (Korpela, 2016, s. 95)

Suunnittelematon käyttökatko, joka ei korjaannu uudelleenkäynnistyksellä, on vika. Liitteessä 2 on taulukko, johon on kerätty vuodelta 2011 58 laitoksen vikoja aiheuttaneet osat. Luvut on saatu VTT:n vuoden 2011 tuulivoiman tuotantotilastojen vuosiraportista. Kuten taulukosta selviää, lapakulman säätömekanismi ja vaihdelaatikko ovat kaksi eniten vika-aikaa aiheuttavaa osaa.

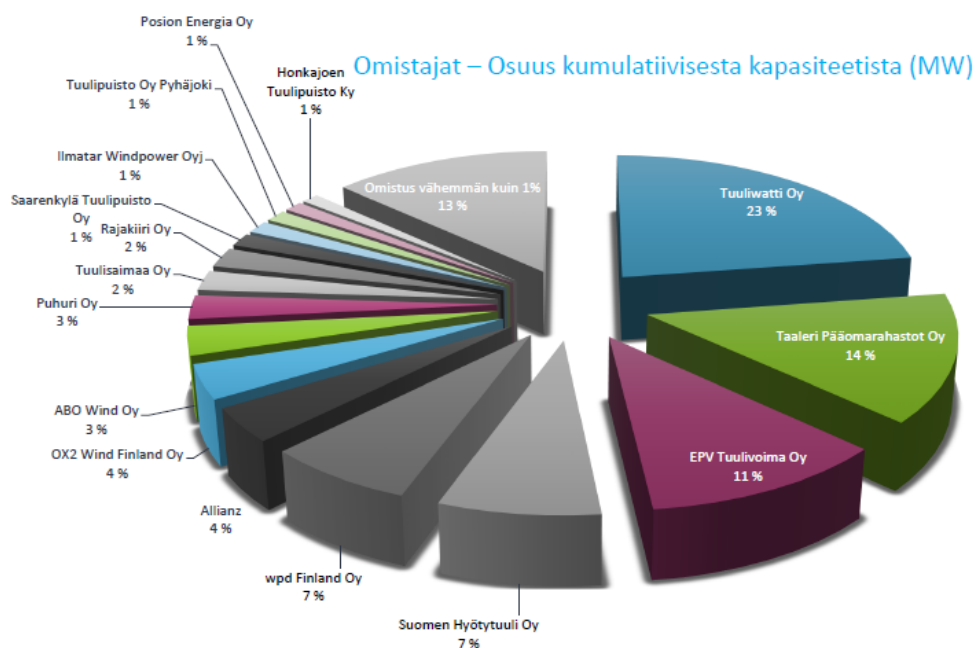
Kovat pakkaset aiheuttavat Suomessa usein suunnittelemattomia käyttökatkoja. Jäätymisen aiheuttamien käyttökatkojen syitä ovat esimerkiksi voimansiirtoöljyjen kangistuminen, tuulimittarien jäätyminen ja jään kertyminen voimalan lapoihin. (Korpela, 2016, s. 95-96)

## 5 TUULIVOIMALATOIMIJIAT SUOMESSA

Melkein kaikki Suomessa olevista voimaloista ovat eurooppalaista alkuperää ja noin puolet niistä on valmistanut tanskalaisen Vestas. Toiseksi suurin osuus on saksalaisen Nordexin 23 % voimaloista, ja kolmantena on espanjalainen Gamesa 15 % osuudella. Loput 10 % Suomessa olevista voimaloista ovat useilta eri valmistajilta.

### 5.1 Tuulivoiman omistajat

Suomessa olevasta tuulivoimakapasiteetista n.70 % on suomalaisessa omistuksessa. Useimmat tuulivoimaloita omistavat yritykset ja yhtiöt ovat useampien yritysten yhteisomistuksessa. Suurin osa voimaloiden omistajayhtiöiden taustayrityksistä on suomalaisia energiayhtiöitä, mutta myös esimerkiksi sijoitus- ja eläkeyhtiöitä omistaa tuulivoimaloita. Esimerkiksi Tuuliwatti Oy on ST1:n ja S-voiman omistama ja Puhuri Oy on Kanteleen Voima Oy:n tytäryhtiö, jonka omistajia ovat Katternö ryhmä, Suomen Voima Oy, Kaakon Energia Oy, Valkeakosken Energia Oy, ja Ålands Elan delslag. Kuvassa 10:n on kuvattu suomalaisen tuulivoiman omistusten jakautuminen.



Kuva 10. Suomessa olevan tuulivoiman omistajat (Suomen Tuulivoimayhdistys 2019)

Useimmat Suomessa olevista tuulivoimaloista omistavat alun perin Suomeen perustetut yhtiöt. Omistusta on kuitenkin jonkin verran myös Suomeen perustetuilla tytäryhtiöillä ja yrityksillä, jotka ulkomaiset omistajat ovat perustaneet Suomeen vain tuulivoimaloiden omistusta varten. Esimerkiksi WPD Finland Oy:n ja ABO Wind Oy:n pääkonttorit sijaitsevat Saksassa. Suurin ulkomainen omistus on rahoitusyhtiö Allianzilla. Varsinkin niiden yritysten joukosta, joilla on vain 1 % luokkaa oleva omistus, löytyy yhtiöitä, joilla ei ole Suomessa mitään toimintaa, ja ne onkin perustettu vain voimaloiden omistuksen takia.

## 5.2 Tuulivoimaloiden kunnonvalvonta

Tuulivoimaloiden kunnonvalvonnasta vastaa usein voimaloiden valmistajan huoltopalvelut. Kaikilla suurimmilla voimalavalmistajilla (Vestas, Nordex, Gamesa) on Suomessa omat huoltopalvelut. Useimmiten varsinkin voimalan alkuvaiheessa omistajayhtiöt ottavat huoltopalvelut valmistajalta, ainakin takuun ajaksi. Voimalavalmistajat tarjoavat eritasoisia paketteja. Joissain tapauksissa voimaloita valvotaan ympäri vuorokauden ja toisissa taas tehdään vain tarvittavat tarkastukset esimerkiksi vuosittain. Varsinkin uudempiin voimaloihin on usein asennettu kiinteää kunnonvalvontaa ainakin värähtelyn ja lämpötilojen seuraamiseen. Kiinteää kunnonvalvontaa seuraa usein voimalavalmistajan lisäksi voimalan omistaja tai jokin ulkopuolinen toimija.

Tuulivoimaloihin liittyviin asiantuntijapalveluihin keskittyvien yritysten tarjoamiin palveluihin kuuluu useimmiten konsultointi rakennus- ja tuotantoasioista aina kunnossapidon kautta voimalan purkuun asti. Eli pääasiassa tuulivoimaloiden asiantuntijayritykset tarjoavat palveluitaan voimalan

koko elinkaaren ajalle. Useimmiten nämä konsultointiyrietykset eivät itse suorita ainakaan kaikkia tarkastuksia, vaan käyttävät aliurakointia osaan tarkastuksista.

## 6 ASIAKASKYSELY

Opinnäytetyön asiakaskyselyä varten oltiin yhteydessä niin tuulivoimaloiden valmistajiin, tuulivoimaloihin liittyvää konsultointia tarjoaviin yrityksiin, omistajiin kuin huolto- ja tarkastuksiakin tekeviin yrityksiin. Yhteydenotoilla kartoitettiin yritykset, jotka voisivat olla kiinnostuneita tilaamaan Nome Oy:ltä mittaus- ja tarkastuspalveluita. Kun potentiaalinen asiakaspohja oli kartoitettu, lähetettiin heille asiakaskyselyt.

Kyselyn alussa kartoitettiin, minkä valmistajan voimaloiden parissa kyseinen yritys työskentelee. Sen lisäksi kysyttiin voimaloiden malleja ja tehoja. Näiden tietojen perusteella saadaan selville ominaisuudet, jotka tulisi tietää mittauksen suorittamista varten. Näihin kuuluu esimerkiksi vaihteiston ja generaattorin ominaisuudet.

Seuraavaksi selvitettiin voimaloiden kunnonvalvontaan liittyviä asioita. Kyselyssä kysyttiin esimerkiksi, että kenen toimesta kunnonvalvontaa on tehty, onko voimaloissa kiinteää kunnonvalvontaa, jos on niin mitä kaikkea ja kuka mahdollista etävalvontaa voimaloissa on tehnyt. Näiden tietojen perusteella saadaan kartoitettua esimerkiksi, että mitä kaikkea voimaloista voitaisiin mahdollisesti valvoa etänä ja kuinka moniin voimaloihin voisi olla mahdollista päästä asentamaan kiinteää valvontaa. Nämä tiedot auttavat rakentamaan ja kohdistamaan tarjottavia tarkastuspaketteja, koska kiinteästi valvottavia suureita ei tarvitse mitata enää uudelleen kannettavilla mittalaitteilla.

Seuraavaksi selvitettiin tarkastusten tekemiseen liittyviä standardeja ja vaatimuksia. Kyselyssä oli kysymyksiä tarvittavista turvavälineistä, koulutuksista ja pätevyyksistä sekä standardeista ja noudatetuista raja-arvoista. Näiden tietojen avulla tiedetään jo valmiiksi mihin saatuja mittausarvoja voidaan mahdollisesti verrata ja mitä välineitä ja pätevyyskriteereitä tulee olla, jotta tarkastuksia voi lähteä tekemään.

Lopuksi kyselyssä selvitettiin mitä kaikkia mittauksia ja tarkastuksia voimaloihin toivottaisiin suoritettavan, minkälaisissa paketeissa tarkastukset tulisi olla, olisiko yrityksillä tarvetta vuokrattaville mittalaitteille ja millä aikataululla tarkastuksia haluttaisiin voimaloihin tultavan suorittamaan. Näiden kysymysten vastausten perusteella saadaan hyvä käsitys tarkastustarpeesta, joka voimaloissa on, ja lisäksi minkälaisia tarkastuspaketteja yritykset haluavat ja millä aikataululla ne tarkastuksia tarvitsevat.

Asiakaskyselyn vastauksista on vielä lisää asiaa myöhemmin tässä työssä. Vastausten perusteella Nome Oy voi koostaa tarkastuspaketteja, joita tarjotaan asiakkaille. Lisäksi kyselyn vastauksista saadaan hyvä peruskäsitys vaatimuksista ja toiveista tarkastuksiin liittyen.

## 7 MITTAUKSIIN JA TARKASTUKSIIN LIITTYVÄT STANDARDIT JA VAATIMUKSET

Standardeilla parannetaan tuotteiden yhteensopivuutta ja vaihdettavuutta, parannetaan kuluttajan turvallisuutta ja edistetään kotimaista ja kansainvälistä kauppaa. Standardit eivät ole perusluonteeltaan sitovia, mutta niiden noudattamista voi kuitenkin vaatia esimerkiksi viranomainen tai työn tai tuotteen tilaaja. Myös laeissa ja asetuksissa säädetyt vaatimukset ovat velvoittavia. Standardeilla voidaan osoittaa, että tuote on vaatimusten mukainen ja turvallinen käyttää. (Tukes, n.d.) Varsinkin teknisillä aloilla työskenneltäessä olisi hyvä tuntea oman alan standardit.

Standardien laadinta on avointa ja kaikille vapaaehtoista. Lähes kaikilla mailla on standardisoinnista vastaava elin, Suomessa kyseinen elin on Suomen standardisoimisliitto SFS ry. Euroopassa standardeja laatii CEN. Kansainvälisesti suurin standardisoimisjärjestö on International Organization for Standardization eli ISO. Sähköalan standardeja suomessa laatii SESKO, Euroopassa CENELEC ja kansainvälisesti suurimpana toimijana on International Electrotechnical Commission eli IEC.

IEC-61400 on tuulivoimaloita yleisesti käsittelevä standardi. Se sisältää osia esimerkiksi voimalan suunnittelusta ja tuotannon mittauksista. Se ei kuitenkaan sisällä kunnonvalvonnan tarkastuksia, joita varten tämä työ tehdään. Niihin liittyvistä standardeista on lisää alla. Kyseisiä mittauksia ja tarkastuksia tehtäessä tulee ottaa huomioon, että niitä tehdään mitä suurimmalla todennäköisyydellä sähkölaitteiden läheisyydessä, joten niiden suorituksessa tulee mahdollisesti ottaa huomioon standardit SFS 6000, 6001 ja 6002. Työtä varten ei kuitenkaan selvitetä voimaloihin tehtävien sähkön laatuun, sähköasennuksiin tai kaapelointeihin liittyvien mittausten ja tarkastusten standardeja, koska kyseisten mittausten ja tarkastusten tekeminen ei lähtökohtaisesti kuulu työn tilaajan suunnitelmiin. Kaikki käännökset englanninkielisistä standardeista on työn tekijän omia tulkintoja, eivätkä välttämättä vastaa kaikilta osin virallisia käännöksiä. ISO-standardit ovat englanninkielisiä ja niiden SFS-standardien osien perään on merkattu :en, mistä käytettiin englanninkielisiä versioita tässä työssä.

### 7.1 Värähtelymittaukset

Värähtelymittauksissa käytettäville laitteille on standardi SFS-ISO 2954:en ja värähtelymittauksia suorittavien henkilöiden pätevyden vaatimukset

löytyvät standardista SFS-ISO 18436-2:en. Yleisemmin värähtelymittauksia käsitellään standardeissa SFS-ISO 13373 ja SFS-ISO 10816. Tuulivoimaloiden värähtelymittauksia käsittelee standardin SFS-ISO 10816 osa 21 (vaaka-akseliset tuuliturbiinit, joissa on vaihdelaatikko), josta löytyy monia tarpeellisia kohtia tuulivoimaloiden värähtelymittauksien suorittamiseen. Samaan standardiin on suunnitteilla myös osa 22, joka käsittelee vaaka-akselisia tuuliturbiineja, joissa ei ole vaihdelaatikkoa.

Standardia SFS-ISO 10816-21:en tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että siitä löytyvät tarkastusten arviointialueet eivät ole tarkoitettu hyväksymisarvoiksi. Raja-arvot tulee määrittää jokaiselle voimalalle siihen suoritettujen mittausten pohjalta ja niistä tulee sopia voimalan valmistajan ja omistajan kesken. Standardin liitteestä A löytyy alle 3 MW:n maatuulivoimaloille arviointialueet. Kannattaa myös huomioida, että standardia ei ole tarkoitettu jatkuvaan kunnonvalvontaan ja vian etsintään, vaan niitä varten on standardi ISO-16079.

Aikaisempia kansainvälisiä standardeja ei ole voitu soveltaa tuulivoimaloiden värähtelymittauksille niiden erilaisesta rakenteesta ja toiminnasta johtuen. Esimerkiksi tuulesta ja turbiinin lapojen omasta tärinästä johtuvat voimalan tornin ja nasellin tärinä eroavat muista teollisuudessa vastaan tulevista olosuhteista. Lisäksi tuulivoimaloiden värähtelymittauksissa pitää ottaa huomioon pienemmällä taajuudella tapahtuvat värähtelyt, koska roottorin pyörimisnopeus on todella alhainen. (SFS-ISO 10816-21/2015:en, s.4)

Värähtelymittaukset tulisi suorittaa määrätystä mittauspisteistä, määritelyihin suuntiin ja määrätynlaisissa olosuhteissa. Mittauspisteet ja -suunnat voivat kuitenkin poiketa standardissa esitetyistä ehdotuksista. Standardin SFS-ISO 10816-21:en liitteessä B on värähtelymittausten mittauspisteet kahdelle tyypilliselle tuulivoimalasuunnitelmalle.

Standardin SFS-ISO 10816-21:en kappaleessa 5 annetaan ohjeet generaattorin, vaihdelaatikon, roottori laakeroinnin, nasellin ja tornin värähtelyjen mittaamiseen. Lisäksi kappaleessa 5 löytyy vielä yleisohjeet, mittauslaitteiden vaatimukset, ohjeet mittausanturien kiinnitykseen ja yhdistämiseen sekä mittausten aikaisten olosuhteiden vaatimukset.

Mittaustulosten tulkitsemista varten tulisi tulokset jakaa neljään alueeseen, joiden perusteella komponentin värähtelyä voidaan tarkastella, jotta sille voidaan suorittaa tarvittavia toimenpiteitä. Alueet ovat:

- A: Uusien tuulivoimaloiden ja komponenttien värähtely tasaisessa kuormassa kuuluu yleensä tähän alueeseen.
- B: Tuulivoimalat ja komponentit, joiden tulokset osuvat tähän alueeseen, ovat sopivia toimimaan pitkäaikaisesti hyväksyttävillä värähtelyn määrillä.

- C: Tuulivoimalat ja komponentit, joiden värähtely osuu tähän alueeseen, eivät yleensä ole sopivia pitkäaikaiseen, jatkuvaan toimintaan. Jatkotutkimukset ovat suositeltavia.
- D: Tähän alueeseen osuvat värähtelyt voivat mahdollisesti vahingoittaa tuulivoimalaa ja sen osia.

Standardin liitteestä A löytyvät edellä lueteltujen alueiden numeeriset arvot eivät ole tarkoitettu raja-arvoiksi. Niistä saa kuitenkin hyvän käsityksen mitä arvojen suunnilleen tulisi olla. (SFS-ISO 10816-21/2015:en, s.13-14)

Standardin SFS-ISO 10816-21:en kappaleissa 8.2 ja 8.3 annetaan ohjeet tuulivoimaloiden ALERT- ja ALARM-arvojen määrittämiseen. Kyseiset käsitteet on selitetty standardissa seuraavasti:

- ALERT: Osoitus siitä, että tietty värähtelyarvo on ylitetty tai merkittävä muutos on tapahtunut ja korjaavia toimia tarvitaan. Kun ALERT ilmestyy, on yleisesti hyväksyttävää pitää tuulivoimala toiminnassa, kunnes värähtelyn muutoksen aiheuttaja on selvillä ja korjaavat toimet aloitettu.
- ALARM: Osoittaa värähtelyn arvon, jonka ylittyessä tuulivoimalan jatkuva toiminta voi vahingoittaa tornia, nasellia, roottoria tai muita komponentteja.

ALERT-arvot voivat olla eri tuulivoimaloissa erisuuruiset. Yleensä arvot määritetään aikaisempiin kokemuksiin pohjautuvan vertailun mukaan. ALERT-arvon ei suositella olevan yli 1,25-kertainen B/C-alueeseen nähden. ALARM-arvot ovat yleensä samat kaikissa voimaloissa, eivätkä perustu aikaisempiin kokemuksiin. ALARM-arvon ei suositella olevan yli 1,25-kertainen C/D-alueeseen nähden.

Standardin SFS-ISO 81400-4:en mukaan vaihdelaatikon tulee tehdä värähtelymittaukset osana vastaanottotarkastuksia. Mittauksille voidaan käyttää pohjana esimerkiksi ANSI/AGMA 6000-B96:sta tai ISO 8579-2:sta (SFS-ISO 81400-4/2005:e, s.10).

## 7.2 Öljyanalyysi

Tuulivoimaloiden voiteluille on standardi ISO 12925-1:2018 ja öljyanalyysijä suorittavien henkilöiden pätevyyden vaatimukseen pureudutaan standardissa SFS-ISO 18436-4:en. Standardissa ISO 12925-1:2018 käsitellään seuraavien kategorioiden voiteluöljyt: CKB, CKC, CKD, CKE, CKSMP, CKTG, CKES, CKPG ja CKPR. Jokaiselle kategorialle on standardissa oma taulukko arvojen tulkitsemisen avuksi.

Standardin SFS-ISO 81400-4:en mukaan voiteluöljyn kunnonvalvontatarkastukset ja -välit tulee olla määritelty huolto-oppaassa. Voiteluöljyn valmistaja voi määritellä tehtävät testit, mutta niiden tulisi sisältää ainakin:

- öljyn puhtaus
- viskositeetti
- vesipitoisuus

- metallihiukkaset
- öljyn hapettuminen

Standardin mukaan ensimmäinen näyte tulisi ottaa vaihteistosta 72 tunnin sisällä käyttöönotosta. Toinen näyte tulisi ottaa viimeistään, kun käyttöönotosta on kulunut tuhat tuntia. Kuusi kuukautta on todettu hyväksi näytteenottoväliksi. Standardin liitteestä F löytyy tarkemmat ohjeet öljyn valintaan ja kunnonvalvontaan. (SFS-ISO 81400-4/2005:en, s.31)

### 7.3 Visuaaliset tarkastukset

Visuaalisille tarkastuksille ei ole kovin monia standardeja johtuen niiden subjektiivisesta luonteesta. SFS-EN 13018 standardissa annetaan kuitenkin yleisohjeet visuaalisiin tarkistuksiin, joten siihen olisi hyvä tutustua ennen tarkastusten tekoa. Standardista SFS-EN 13927 löytyy taas yleisohjeet visuaalisissa tarkastuksissa käytettäville laitteille.

Lämpökuvauksen yleiset menettelytavat löytyvät standardista SFS-ISO 18434-1. Standardissa SFS-ISO 18436-7:en annetaan vaatimukset lämpökuvauksista suorittavien henkilöiden pätevyydelle.

### 7.4 Äänimittaukset

Äänen ja melun mittauksille löytyy jonkin verran standardeja, mutta tuulivoimaloiden aiheuttamaan meluun ja sen mittaamiseen on Suomessa tehty myös asetuksia ja ohjeita, joten tässä kappaleessa paneudutaan hiukan niihin. Tuulivoimaloiden ympäristöönsä aiheuttamaan meluun liittyen on Valtioneuvoston asetus 1107/2015 tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista. Asetuksessa annetaan ohjearvot tuulivoimalan toiminnasta aiheutuvalle ulkomelutasolle. Laskennallinen ja mitattu melutaso eivät saa ulkona ylittää melulle altistuvalla alueella melun A-taajuuspainotetun keskiäänitason (ekvivalenttitason  $L_{Aeq}$ ) ohjearvoja taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Melutason ohjearvot (Valtioneuvoston asetus 1107/2015)

	Ulkomelutaso $L_{Aeq}$ Päivällä klo. 7-22	Ulkomelutaso $L_{Aeq}$ Yöllä klo. 22-7
Pysyvä asutus	45 dB	40 dB
Loma-asutus	45 dB	40 dB
Hoitolaitokset	45 dB	40 dB
Oppilaitokset	45 dB	-
Virkistysalueet	45 dB	-
Leirintäalueet	45 dB	40 dB
Kansallispuistot	45 dB	40 dB

Asetuksessa 1107/2015 sanotaan myös, että: ”Jos tuulivoimalan melu on impulssimaista tai kapeakaistaista melulle altistuvalla alueella, valvonnan yhteydessä saatuun mittaustulokseen lisätään 5 dB ennen sen vertaamista 3 §:ssä säädettyihin arvoihin.”

Valtioneuvoston asetuksessa 26.1.2006/85 työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuville vaaroilta, annetaan seuraavat toiminta- ja raja-arvot altistukselle: ”Päivittäisen melualtistuksen alempi toiminta-arvo on 80 dB ja ylempi toiminta-arvo on 85 dB. Äänen huippupaineen alempi toiminta-arvo on 112 Pa ja ylempi toiminta-arvo on 140 Pa.

Päivittäisen melualtistuksen raja-arvo on 87 dB. Äänen huippupaineen raja-arvo on 200 Pa.

Sovellettaessa 2 momenttia on otettava huomioon työntekijän käyttämien kuulonsuojainten vaimentava vaikutus. Sovellettaessa 1 momenttia tällaisten suojainten vaikutusta ei oteta huomioon.” Mikäli melu vaihtelee huomattavasti työkohteessa, voidaan edellä mainittujen arvojen sijaan käyttää päivittäisen arvon sijasta viikoittaista arvoa, mikäli viikoittainen melualtistus ei ylitä altistuksen raja-arvoa 87 dB ja työhön liittyvät vaarat ja haitat saatetaan mahdollisimman vähäisiksi. Jos työntekijän altistuminen melulle ylittää alemman toiminta-arvo, on työnantajan huolehdittava siitä, että työntekijän saatavilla on henkilökohtaiset kuulonsuojaimet. Jos taas melualtistus vastaa tai ylittää ylempään toiminta-arvoon, on työntekijän käytettävä hänelle osoitettuja kuulonsuojaimia. Erityyppisille kuulonsuojaimille on omat osionsa standardissa SFS-EN 352.

Ympäristöministeriö on julkaissut kolme ohjetta liittyen tuulivoimaloiden melun mittaamiseen ja todentamiseen. Tuulivoimaloiden melun mallinusohe opastaa tuulivoimaloiden ja melulle altistuvan kohteen välisen suojaetäisyyden mitoituksessa. Tuulivoimaloiden melutason mittausohjeen avulla voi selvittää, ylittääkö melutaso sille säädetyn raja-arvon. Tuulivoimaloiden melupäästön mittausohjeella voidaan todentaa valmistajan tuulivoimalan äänenvoimakkuudelle antama takuuarvo. Samaa ohjetta voidaan käyttää myös melumallinnuksessa käytettyjen lähtöarvojen mittaamiseen. (Ympäristöministeriö, 2014)

Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittaamalla -ohjeessa, annetaan vaatimukset käytettävälle mittauslaitteistolle. Sen mukaan laitteiden ja lisälaitteiden tulee täyttää standardin IEC 61672-1 vaatimukset tarkkuusluokan 1 äänitasomittareille. Oktaavi- ja terssikaistoittain tehtävissä mittauksissa käytettyjen laitteiden tulee täyttää standardin IEC 61260 vaatimukset. Mittauksissa käytetty mikrofoni ei saa olla halkaisijaltaan yli 13 mm. Lisäksi laitteiden kalibroinnille annetaan vaatimukset. Ohje sisältää myös ohjeistuksen mittausten suorittamiseen. (Ympäristöhallinnon ohjeita, 2014)

## 7.5 Laitevalmistajien ja toimijoiden vaatimukset

Koska värähtelyille ei ole olemassa ainakaan toistaiseksi mitään kiinteitä raja-arvoja, joita tulisi noudattaa, on voimaloiden värähtelymittauksista saatuja tuloksia verrattava voimalan omistajan tai valmistajan antamiin raja-arvoihin. Mittauksissa saadut arvot ja olosuhteet, joissa mittaukset on tehty, tulee aina merkitä huolellisesti ylös, jotta voimalan mittauksien tuloksia voitaisiin aina verrata keskenään.

## 7.6 Mittauksiin vaikuttavat tekijät

Standardissa SFS-ISO 10816-21:en annetut tuulivoimalan ja sen osien värähtelyn arviointikriteerit pätevät, kun värähtelymittaukset on tehty niin sanotusti normaaleissa käyttöolosuhteissa, eli voimala tuottaa jatkuvasti vähintään 20 % nimellistehostaan. Standardissa annetut suuntaviivat voivat kuitenkin olla hyödyllisiä voimalan koko käyttöalueella. Värähtelymittauksia tehtäessä olisi aina suositeltavaa merkitä muistiin sillä hetkellä vallitsevat olosuhteet. (SFS-ISO 10816-21/2015:en, s.12) Mittauksien ajoittamista vaikeuttaa se, että värähtelymittauksia tehtäessä täytyisi olla tietty tuuli, jotta kone toimii sopivalla kuormalla. Jos samalla kertaa tulisi suorittaa myös tarkistuksia, joissa voimala täytyy olla pysähtyneenä, voi se aiheuttaa ongelmia, koska voimaloiden omistajat eivät luonnollisesti tahdo ajaa tuotantoaan alas silloin kun olisi sopiva tuuli energian tuottamiseen.

## 8 TUULIVOIMALOIHIIN SUORITETTAVAT MITTAUKSET JA TARKASTUKSET

Tätä työtä varten ei perehdytty tuulivoimaloihin tehtäviin sähkön laatuun liittyviin mittauksiin, koska ne eivät kuulu työn tilaajan mittausvalikoimaan. Myöskään sähköasennuksien, liitoksien tai kaapelointien visuaaliset tarkastukset eivät kuulu työhön. Sen sijaan työhön kuuluvaa lämpökamerakuvausta voidaan käyttää myös sähkölaitteiden kunnan seuraamiseen. Myöskään voimalan lapojen visuaaliset tarkastukset eivät lähtökohtaisesti kuulu tämän työn selvityksiin. Työtä varten tehtiin tarkastuspohja ja työohje työn tilaajalle. Kyseisten dokumenttien avulla tarkastusten toistettavuutta ja dokumentoinnin laatua saadaan parannettua, joka osaltaan auttaa saamaan laadukkaita ja tarkkoja tarkastustuloksia, joita on helppo verrata myöhemmin keskenään.

Työtä varten selvitettiin myös asiakkaiden tarve takuuajan lopputarkastuksille heidän voimaloissaan. Tällainen tarkastus tehdään usein kolmannen osapuolen toimesta, kun tuotteen, tässä tapauksessa voimalan, takuu on päättymässä. Näin varmistetaan, että voimala on kunnossa, eikä siellä ole

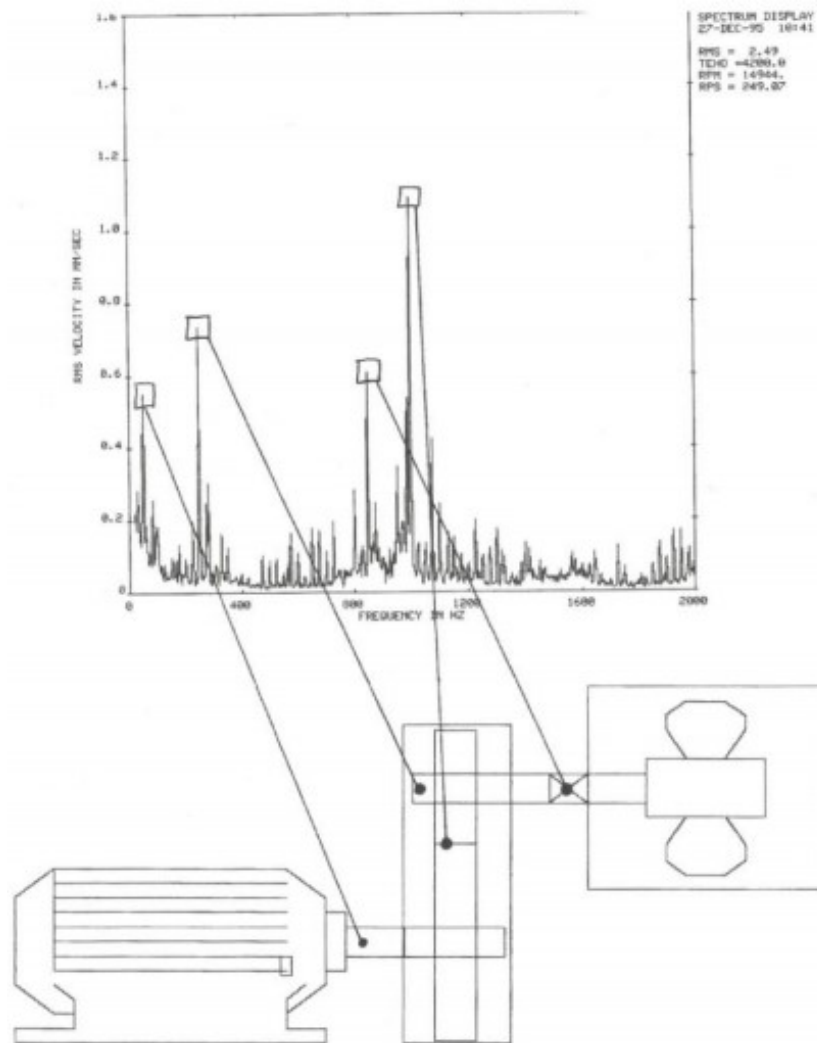
mitään vikoja, joita pitäisi takuun puitteissa korjata voimalatoimittajan toimesta. Takuuajan lopputarkastuksiin lukeutuu usein ainakin visuaaliset tarkastukset, linjaukset ja voiteluöljyanalyysi.

Useimmissa uudemmissa tuulivoimaloissa käytetään värähtelymittausten osalta automaatiota, eli voimaloihin on kiinteästi asennettu värähtelymittauslaitteistot, joista lähtee mittaustieto koko ajan kunnonvalvontaa suorittavalle yritykselle. Kannettavilla mittalaitteillakin kuitenkin tehdään jonkin verran värähtelymittauksia.

## 8.1 Värähtelymittaus

Värähtelymittausten käyttö on noussut yhdeksi tärkeäksi tekijäksi teollisuuden kunnossapidossa. Värähtelymittaus on yleisin kunnonvalvonnan menetelmä. Oikein sovellettuna se on usein paras ennakoivan kunnossapidon mittaamenetelmä.

Värähtelyn valvonta perustuu siihen, että samasta mittauspaikasta eri mitauskerroilla saatuja tuloksia verrataan keskenään tiettyjen tunnuslukujen suhteen, tarkkailemalla spektrien taajuuksien amplitudeissa tapahtuvia muutoksia ja vertailemalla eri aikoina mitattuja aikatasoja. Tunnuslukuvalvontaan kuuluu esimerkiksi värähtelyn kokonaistaso ja tärinärasitus. Värähtelyn kokonaistasolla ilmaistaan koko mittausalueen värähtelyn suuruus yksiköllä, jolla mittaus on tehty. Tärinärasitus on yleensä värähtelynopeuden tehollisarvo laskettuna taajuuksialueelta 10-1000 Hz, mutta siinä voidaan käyttää muitakin suureita ja omavalintaista taajuuskaistaa. Aikatasosta voidaan laskea erilaisia tunnuslukuja, ja siitä voidaan nähdä isku- ja värähtelyilmiöitä, joita koneessa tapahtuu. Aikatasosta laskettavista tunnusluvuista tärkeimpiä ovat värähtelyn huippuarvo, huipusta huippuun-arvo, tehollisarvo ja huippukerroin. Aikatason muodosta voidaan havaita myös vikoja, esimerkiksi etsimällä huojuntaa, iskuja tai toispuoleista signaalia. Myös profiilivalvontaa ja ratakäyrävalvontaa käytetään esimerkiksi telojen pintojen tarkkailuun sekä epätasapainojen ja linjausvirheiden etsimiseen. Spektrivalvonta on erittäin vaativaa, koska spektrissä on usein paljon piikkejä, joista kuitenkin läheskään kaikki eivät kuvaa mitään vikaa. Spektrivalvonta perustuu maskien käyttöön. Maskit toimivat hälytysrajoina ja niitä voi olla useampiakin yhtä mittauspistettä kohden. Mikäli spektrihuippu lävistää maskin, aiheutuu siitä hälytys. Kuvassa 11 on kuvattuna kone ja siitä saatavat eri vikataajuudet spektrissä. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 80-90)



Kuva 11. Värähtelyspektri ja koneen eri vikataajuudet (Nohynek & Lumme 2004, s.88)

Värähtelymittaukset voidaan jakaa kahteen eri luokkaan:

- Yksinkertaiset menetelmät koneiden yleistärinän valvontaan ja vierintälaakereiden kunnonvalvontaan
- Monimutkaisemmat menetelmät koneiden tärinän yksityiskohtaiseen valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan

Yksinkertaisemman menetelmän käyttöön tarvitaan yleensä kaksi mittalaitetta, ellei samasta laitteesta löydy kaksi selkeästi toisistaan poikkeavaa mittaussuuretta. Toisella mittauksella selvitetään koneiden kokonaistärinä tyypillisesti taajuusalueelta 10-1000 Hz, joka antaa karkean kuvan koneen akselin pyörimiseen liittyvistä vioista kuten epätasapaino, linjausvirhe tai liitosten löysyys. Toista mittausta käytetään enimmäkseen vierintälaakereiden kunnonvalvontaan mittaamalla korkeataajuisia värähtelyä, yleensä yli 2000 Hz taajuudelta. Voitelukalvon hävitessä vierintälaakerista tai jonkin laakerivian syntyessä on havaittu, että korkeataajuinen värähtely lisääntyy huomattavasti. Jos valvottavissa koneissa ei ole useita erillisiä akseleita, jotka pyörivät eri nopeuksilla, ovat yksinkertaisemman menetelmän mittalaitteet yleensä riittävän herkkiä kyseisten koneiden kunnonvalvontaan. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 17-18)

Mikäli valvottavassa koneessa on erinopeuksisia akseleita, jolloin siellä on käytännössä oltava myös esimerkiksi hammasvaihteita tai hihnakäyttöjä, eivät yksinkertaisemman menetelmän mittalaitteet ole riittävän herkkiä monien eri vikojen tunnistamiseen. Tällöin käytetään usein monimutkaisemman menetelmän mittalaitteita, eli yleensä yksi- tai monikanavaisia spektrianalysaattoreita. Tällaisilla laitteilla valvontaa suoritettaessa koneen aiheuttaman värähtelysignaalin eri osataajuudet ja niiden suuruudet voidaan erottaa toisistaan. Sen seurauksena yksittäisten koneenosien aiheuttama tärinä pystytään tunnistamaan ja eri osien kunnon kehittymistä voidaan seurata luotettavasti. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 18-19)

Koneiden värähtelyä mitataan siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Nopeutta käytetään yleensä tärinämittaussuureena, koska sillä on hyvä herkkyys laajalla taajuusalueella, värähtelynopeus on lähes verrannollinen värähtelyn sisältämään energiamäärään ja monissa standardeissa ja normeissa käytetään värähtelynopeusarvoja raja-arvoina. Mikäli mitattava kone on kuitenkin hidaskäyntinen tai viat ovat yleisesti matalilla taajuuksilla, kannattaa siirtymää käyttää mittaussuureena, ainakin täydentävänä mittauksena. Jos taas kone on nopeakäyntinen tai viat ovat oletettavasti korkeilla taajuuksilla, kannattaa kiihtyvyyttä käyttää mittaussuureena, ainakin täydentävänä mittauksena. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 50)

Jotta saataisiin mitattua oikeita asioita, tulee seuraavat asiat olla mietittynä ennen mittausten aloittamista:

- Värähtelytyyppi: Minkälaista värähtelyä mitataan. Iskumaisen värähtelyn mittaaminen vaatii yleensä kiihtyvyyssanturin, muihin värähtelytyyppeihin tulee valita tarpeen mukaan sopivin anturityyppi.
- Signaali/kohinasuhde: Tämä kertoo anturin kyvystä erottaa voimakkaita ja heikkoja signaaleja toisistaan. Mikäli tarvitaan suuri signaali/kohinasuhde, valitaan usein nopeusanturi.
- Anturin herkkyys: Anturin herkkyys kertoo, kuinka suuri volttimäärä mittaussignaali vastaa mitattua tärinää. Voimakkaassa tärinässä ei saa olla liian herkkä anturi, kun taas heikossa tärinässä täytyy käyttää erittäin herkkää anturia.
- Signaalin vahvistus: Mittaussignaali tulee hyvin heikkona varauksena anturilta, joten sitä pitää vahvistaa ennen kuin se menee mittalaitteelle. Antureissa voi olla sisäinen vahvistin tai sitten käytetään ulkoista vahvistinta.
- Mekaaninen vaimennin: Jos halutaan parantaa mittauksen signaali/kohinasuhdetta jo anturissa poistamalla voimakas korkeataajuisen värähtely, voidaan käyttää mekaanista vaimenninta. Vaimennin asennetaan anturin ja kiinnityskohdan väliin.

Mittauspaikkojen valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi siihen, että saadaanko mittauksista riittävästi dataa. Minimissään mittauspisteitä on valittava yksi jokaisen laakeri kohdalta. Kunkin laakerin kohdalta olisi pyrittävä mittaamaan kolmeen keskenään kohtisuoraan suuntaa, eli vaakaan,

pystyy ja akselin suuntaan. Tämä johtuu siitä, että eri viat näkyvät selvimmin eri mittaussuunnista, ja vertailemalla tärinää eri mittaussuunnissa voidaan koneessa oleva vikaantumisen arvioida tarkemmin. Yksittäinen mittauspiste valitaan niin, että mittausanturi on mekaanisesti mahdollisimman lähellä värähtelylähdettä. Mittauspaikka tulee valita siten, että anturin ja värähtelylähteen väliin jää mahdollisimman vähän rajapintoja, koska värähtely menettää rajapinnoissa osan energiastaan. Mittauspaikat tulisi yleisesti valita aina laakerointikohdista. Mittauspaikkaa valittaessa tulee ottaa huomioon anturin mahdollinen suojaus ja se, ettei anturiin kohdistu ympäristöstä sallittua suurempia lämpötiloja, kiihtyvyyksiä tai muita rasituksia. Mittauspisteet tulee myös merkitä huolellisesti, jotta mittaukset suoritettaisiin aina samalla tavalla ja samoista paikoista. Merkintää ja anturin kiinnitystä helpottavina tapoina käytetään laakereihin kiinnitettäviä mittausnippoja, mittauskohtaan hitsattavia teräskappaleita ja mittauspisteen hiomista. Standardin SFS-ISO 10816-21 liitteestä B löytyvät värähtelymittausten mittauspisteet ja suunnat kahdelle tyypilliselle tuulivoimalasuunnitelmalle. Usein kuitenkin joudutaan poikkeamaan ihanteellisesta mittauspisteiden määrästä, koska aina anturia ei päästä kiinnittämään kaikkiin haluttuihin suuntiin esimerkiksi ahtauden tai työturvallisuuden takia. Vastaavasti joskus voidaan joitain mittauspisteitä jättää tarkoituksellakin pois, jos on esimerkiksi aikaisemmissa mittauksissa huomattu, että tarvittavat tiedot saadaan ilman kaikkia mittauspisteitä. Kiinteästi asennettuihin kunnonvalvontajärjestelmiin ei yleensä kustannussyistä tule useampaa mittauspistettä laakeria kohden. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 53-54)

Tuulivoimaloissa suoritettavia värähtelymittauksia vaikeuttaa jatkuvat tuulen suunnan ja voiman muutokset, joiden takia myös värähtely muuttuu koko ajan. Tästä syystä tuulivoimaloiden värähtelymittauksissa on tärkeää ottaa huomioon mitatut arvot tietyiltä aikaväleiltä. Ennen kuin arvoja voi verrata tiettyihin ohjeellisiin arvoihin, täytyy niitä verrata kyseisen voimalan keskiarvoihin. (SFS-ISO 10816-21/2015:en, s.7-8)

## 8.2 Akseleiden linjaukset

Akselin linjausvirheet aiheuttavat paljon laitevikoja, koska ne heikentävät esimerkiksi laakereiden toimintaa. Oikein linjatut koneet toimivat myös energiatehokkaammin ja koska laitevikojen määrää saadaan alennettua, säästetään kunnossapitokustannuksissa. Akseleiden linjaukset suoritetaan usein laserlinjauslaitteilla, joista on lisää asiaa kappaleessa 9.1.2. Laserlinjauslaitteet ovat nykyään erittäin tarkkoja ja niiden käyttöä voidaan soveltaa laajasti. Ennen kuin laserlinjauslaitteet tulivat käyttöön, tehtiin linjaukset viivaimien ja mittakellojen avulla. Tuolloin tarvittavat korjauslaskut täytyi suorittaa erikseen joko käsin tai apuohjelmaa käyttäen. (Hiljanen, 2009, s.6)

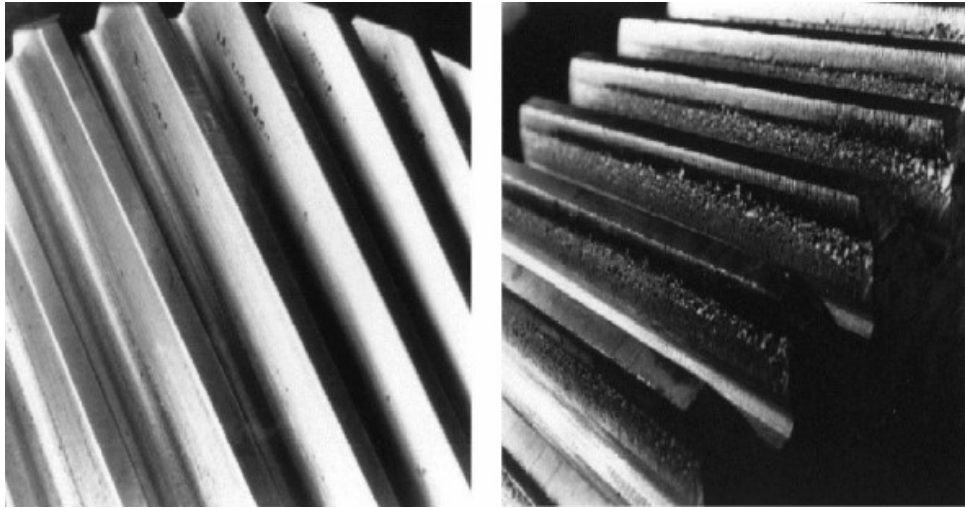
Mittakello on analogisen kellon näköinen laite, jossa on yksi viisari ja kellon pohjasta ulos työntyvä tappi. Kun tappia painetaan sisäänpäin, liikkuu kellon viisari näyttäen tapin liikeradan tietyllä tarkkuudella. Laserlinjauksessa

linjaus tehdään käyttäen lasersäteitä metallisten tukivarsien ja mittakellojen sijaan. Laserlinjaus sopii niin nopeasti kuin hitaastikin pyörivien koneiden linjaukseen. Se on tarkempi menetelmä kuin mekaaniset ja lisäksi sen toistettavuus on parempi. (Hiljanen, 2009, s.6)

Yleisimmät linjausvirheet ovat epäkeskeisyys- ja kulmavirheet. Epäkeskeisyys aiheuttaa poikittaissuuntaista värähtelyä. Kulmavirhe aiheuttaa sekä poikittaista että pitkittäistä värähtelyä. Yleinen asennusvirhe on pehmeä jalka. Sen tarkistaminen on yksi laserlinjauslaitteen käyttösovelluksista. Pehmeässä jalassa on kyse siitä, että laitteen kaikki jalat eivät ole samassa tasossa tai kosketa laitteen runkoa tasaisesti. Pehmeä jalka vaikuttaa linjaustulosten luotettavuuteen ja jos se kiristetään väkisin, voi koneen tai sen perustuksen ominaistajuus muuttua, mikä taas vaikuttaa värähtelytasoihin. (Hiljanen, 2009, s.9-10)

### 8.3 Visuaaliset tarkastukset

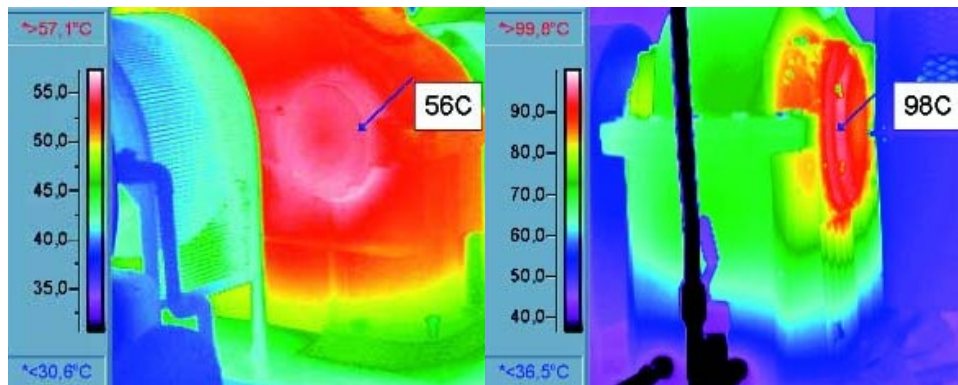
Visuaalisiin tarkastuksiin kuuluu tämän työn osalta endoskooppaukset ja lämpökameramittaukset. Ne ovat molemmat niin kutsuttuja NDT-menetelmiä, eli ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä. Endoskooppauksessa on kyse käytännössä tavallisesta aistinvaraisesta tarkastuksesta. Ainoana erityispiirteenä siinä on se, että tarkasteltava kohde on yleensä niin hankalassa paikassa, ettei sitä pysty näkemään ilman apuvälineitä. Niinpä käyttöön otetaan endoskooppi, jonka avulla nähdään ahtaisiin ja hankaliin paikkoihin. Endoskooppauksessa laitteen ominaisuudet eivät ole pääosassa, vaan tarkastuksen tekijän on tiedettävä mitä hän etsii ja mitä hänen näkemänsä asiat tarkoittavat. Toki parempi kuvanlaatu ja riittävän pitkä putki endoskoopissa auttavat tarkastajan työtä, mutta pääpaino on tarkastusten tekijän ammattitaidolla. Kuvassa 12 näkyy hammaspyörä, jossa on tapahtunut niin kutsuttua macropittingiä. Vasemmanpuoleisessa kuvassa macropitting ei ole vielä kovin vakavaa, mutta oikeanpuoleisessa kuvassa se on hyvin runsasta. Macropittingissä on kyse hammaspyörän pintaan muodostuneista pienistä kuopista, ja se on vain yksi vikamuodoista mitä endoskoopilla tehtävällä visuaalisella tarkastuksella etsitään. Sitä voi aiheuttaa esimerkiksi metallin osuminen metalliin vaihteistossa, jossa hammaspyörissä on karheita pintoja. (Machine Lubrication, 2004) Lisää asiaa endoskoopeista ja lämpökameroista on kappaleessa 9.1.3.



Kuva 12. Hammaspyörä, jossa näkyy macropittingiä (Machine Lubrication 2004)

Kaikki kappaleet lähettävät lämpösäteilyä. Lämpökamera ottaa vastaan tämän säteilyn, mittaa sen voimakkuuden ja muuntaa sen kuvaksi. Infrapunälämpökameralla mitataan aina kohteen pintalämpötilaa. Lämpökameraa hankittaessa tulee ottaa huomioon, että kaikki infrapunakamerat eivät sovellu lämpötilojen tarkasteluun. Kameran on kyettävä näkemään oikealta alueelta infrapunasektriä. Lämpökameroilla tämä spektrialue on 3-5  $\mu\text{m}$  tai 8-12  $\mu\text{m}$ . (edu, n.d.)

Lämpökameramittaukset eivät ole erityisen herkkiä havaitsemaan vierintälaakerivikoja varhaisessa vaiheessa. Lähes aina vian muuttuessa vaurioksi lämpöä kuitenkin kehittyy huomattavasti, joten lämpökamerakuvausta kannattaa hyödyntää muiden mittauksien täydennyksenä. Lämpökuvasta hyödynnetään myös usein sähköisten komponenttien, kuten esimerkiksi sulakkeiden, muuntajien ja katkaisijoiden, kunnonvalvonnassa. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 20) Kuvassa 13 vasemmalla puolella on kunnossa oleva laakeri ja oikealla viallinen laakeri. Kuvien vaihteissa öljyn voiteluominaisuudet ovat kunnossa, mikäli lämpötila on noin 70 °C. Tässä tapauksessa tiedetään, että laakerikuvun lämpötilaan lisättäessä 10 °C päästään laakerikammion lämpötilaan. Näin ollen vasemmassa kuvassa näkyvän vaihteen voitelu on kunnossa, kun taas oikean puolen vaihteen öljyn ominaisuudet ovat heikentyneet. (edu, n.d.)



Kuva 13. Lämpökamerakuva ehjästä ja viallisesta laakerista (edu n.d.)

#### 8.4 Öljyanalyysi

Koneiden kulumisen lisääntyessä ja siirryttäessä tasaisen kulumisen vaiheesta voimakkaaseen kulumiseen, voiteluöljyssä olevien kulumishiukkasten koko kasvaa ja määrä lisääntyy huomattavasti. Normaalissa kulumistilanteessa toisiaan vastaan liikkuvista pinnoista irtoaa halkaisijaltaan noin 10 µm kulumishiukkasia, kun taas voimakkaassa kulumisessa niiden koko kasvaa jopa 10-100-kertaiseksi. Samalla hiukkasten muodossa tapahtuu muutoksia. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 22) Edellä mainituista syistä johdettua voiteluöljyn kuntoa tulee seurata, jotta siinä olevat hiukkaset eivät pääse aiheuttamaan vahinkoa laitteille tai huonontamaan hyötysuhteita. Voiteluöljyn analysoinnin menetelmistä on lisää kappaleessa 9.1.4.

#### 8.5 Äänimittaukset

Tuulivoimalat tuottavat ääntä aivan kuten muutkin teolliset prosessit. Tuulivoimaloista syntyy ääntä kahdella tavalla, aerodynaamisesti ja mekaanisesti. Tuulivoimalan lapojen liikkuminen ilmakerroksen läpi ja ilman pyönteily lapojen ohittaessa voimalan torni aiheuttavat aerodynaamista ääntä. Tuulivoimalan konehuoneessa taas syntyy mekaanista ääntä. Roottorin koko ja pyörimisnopeus, tuulen nopeus ja lavan muotoilu vaikuttavat aerodynaamisen äänen voimakkuuteen. (Suomen tuulivoimayhdistys, n.d.) Tuulivoimaloiden melu on poikkeavaa muuhun ympäristömeluun nähden, koska se voi sisältää pienitaajuisia, impulssimaista, kapeakaistaista tai merkityksellisesti sykkivää ääntä. Tuulivoimalan ääni syntyy korkealla, mikä vaikuttaa äänen vaimenemiseen edetessään. Sääolot vaikuttavat merkittävästi ääneen ja sen voimakkuuteen ja lisäksi voimalat toimivat vain osan ajasta nimellisteholla, jossa syntyy suurimmat melupäästöt. (Ympäristöministeriö, 2014)

Tuulivoimaloiden äänen voimakkuus mitataan noin 50 metrin etäisyydeltä ja lähtötaso määritetään mittaustuloksesta laskennallisesti, koska äänen lähtötasoa ei voida mitata roottorin suuren koon takia. Äänen voimakkuuden lähtötaso ja vaimeneminen lasketaan olettaen, että kaikki ääni tulee roottorin keskipisteestä. Näin ollen arvot ovat todellista suurempia. 2-3

MW:n voimaloista koostuva maalla sijaitseva tuulipuisto alittaa 40 dB:n melurajan yleensä 700-1000 metrin etäisyydellä lähimmästä voimalasta, riippuen esimerkiksi maastosta ja voimaloiden määrästä. Huomionarvoista on, että äänen mittaamisen ajaksi tuulivoimala on aina pysäytettävä taustamelutason selvittämiseksi. (Suomen tuulivoimayhdistys, n.d.)

Taulukon 2 avulla voi arvioida tarvittavaa etäisyyttä asutuksesta tuulivoimalan sijoitusta varten. Taulukossa on esitetty tuulivoimalan aiheuttaman äänen vaimeneminen maan pintatasolla etäisyyden funktiona (äänen lähtötaso konehuoneen korkeudella). Taulukossa näkyy valkoisella pohjalla, millä etäisyydellä on alitettu 40 dB:n raja, joka on Valtioneuvoston asetuksessa 1107/2005 annettu tiukin raja ulkomelutasolle. (Suomen tuulivoimayhdistys, n.d.) Asetuksesta on lisää asiaa kappaleessa 7.4.

Taulukko 2. Tuulivoimalan äänen vaimeneminen (Suomen tuulivoimayhdistys n.d.)

Äänen lähtötaso dB(A)	Etäisyys voimalasta, metriä										
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
97	57	53	48	44	42	40	38	36	35	34	33
98	58	54	49	45	43	41	39	37	36	35	34
99	59	55	50	46	44	42	40	38	37	36	35
100	60	56	51	47	45	43	41	39	38	37	36
101	61	57	52	48	46	44	42	40	39	38	37
102	62	58	53	49	47	45	43	41	40	39	38
103	63	59	54	50	48	46	44	42	41	40	39

## 9 LAITTEET JA VÄLINEET

Tässä luvussa käydään läpi tuulivoimaloiden kunnonvalvonnan suorittamiseen tarvittavia laitteita ja välineitä. Käytettävistä laitteista on annettu esimerkkejä, mutta mittaukset voi kuitenkin suorittaa muullakin kalustolla.

### 9.1 Mittalaitteet

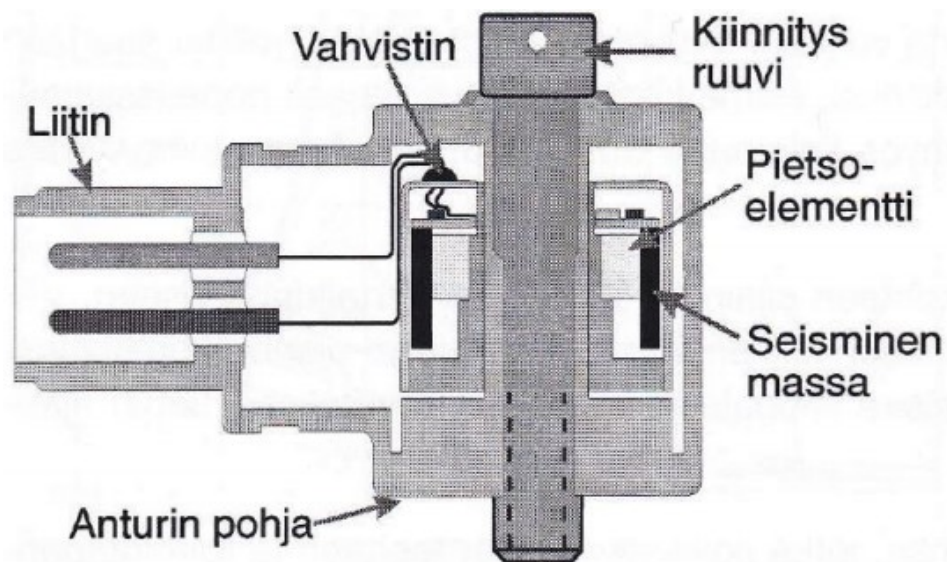
Tuulivoimaloiden kunnonvalvontaa tehtäessä suurempi painoarvo on tarkastusten tekijän ammattitaidolla kuin mittalaitteilla. Esimerkiksi värähtelymittauksissa ja endoskopiaissa on ensiarvoisen tärkeää, että tarkastusten tekijä tietää mitä etsiä ja kuinka mahdolliset viat näyttäytyvät laitteissa. Värähtelymittauksissa tulee tunnistaan eri käyrien ja piikkien seasta ne, jotka kuvastavat vikaa, ja endoskoopilla tulee katsoa oikeasta paikasta

oikeita asioita, jotta tarkastuksesta on mitään hyötyä työn tilaajalle. Kuitenkin hyvät laitteet auttavat työn suorittamisessa, ja alla onkin hieman tarkemmin eri laitteista, mitä mittauksissa ja tarkastuksissa käytetään.

### 9.1.1 Värähtelymittaus

Koneiden värähtelyä voidaan mitata siirtymänä, nopeutena tai kiihtyvyytenä. Kyseisiä suureita voidaan integroida tai derivoida. Näin yksi mainituista mittaussuureista saadaan muutettua joksikin toiseksi, kuten esimerkiksi kiihtyvyyssignaali nopeussignaaliksi. Käyttämällä derivointia ja integrointia voidaan saada myös kokonaan uusia suureita, kuten esimerkiksi kiihtyvyyden derivaatat. Kun värähtelyä mitataan siirtymänä, saadaan kohteen sijainti suhteessa vertailupisteeseen. Värähtelyn mittaus nopeutena ilmaisee kappaleen kulkeman siirtymän tietyn ajan kuluessa ja värähtelyn mittaus kiihtyvyytenä ilmaisee kappaleen nopeuden muutoksen tietyn ajan kuluessa. Kullekin mittaussuureelle on omat anturinsa, jotka poikkeavat toisistaan rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 45)

Kiihtyvyydsantureiden (kuva 14) kokoja on monia, nuppineulan pään kokoisesta aina nyrkin kokoiseen, mutta yleisesti käytetyt kiihtyvyydsanturit ovat pienikokoisia. Kiihtyvyydsanturien mittaustarkkuus ei yleensä heikkene käytössä, koska niissä ei ole liikkuvia osia. Kiihtyvyydsanturin rakenne on melko monimutkainen, mutta sen toimintaperiaate on varsin yksinkertainen. Kiihtyvyydsanturin keskeinen komponentti on pietsosähköinen kide, jonka kiinnityselementit ovat kiinnitettynä anturikuoreen, ja jonka päälle ja sivuille on asennettu massa. Kun anturi on kiinnitettynä kohteeseensa, se liikkuu yhtenevästi mittaushetkensä kanssa. Hitausvoimat vaikuttavat pietsosähköiseen kiteeseen kiinnitettynä massaansa siten, että se hetkellisesti joko puristaa tai venyttää kidettä, johon syntyy anturin kiihtyvyyteen verrannollinen varaus, joka vaihtaa jatkuvasti suuruuttaan ja etumerkkiään. Kyseinen varaus johdetaan anturin sisäiseen tai ulkoiseen varausvahvistimeen, jossa se muunnetaan jatkuvasti muuttuvaksi jännitteeksi. Tämä muodostaa anturista saatavan mittaussignaalin. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 46)

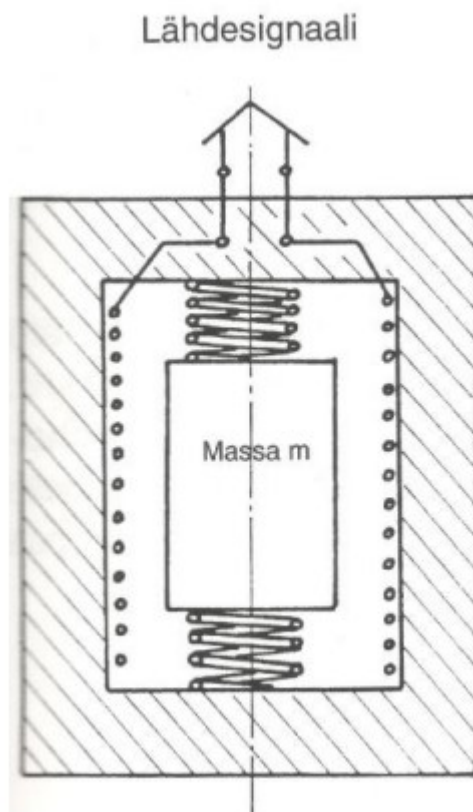


Kuva 14. Kiihtyvyyssanturi (Nohynek & Lumme 2004, s.46)

Kiihtyvyyssantureiden kiinnitys tapahtuu yleisimmin magneetilla, ruuvilla tai käsin painaen, mutta myös mehiläisvahaa voidaan käyttää joissain koh-teissa. Tyypillinen mittausalue kiihtyvyyssanturilla on 2 Hz – 14000 Hz, mutta ylä- ja alarajataajuudet voivat olla hyvinkin erilaiset riippuen anturin ominaisuuksista ja kiinnitystavasta. Kiihtyvyyden mittayksikkönä käytetään joko  $m/s^2$  tai  $g$  eli  $9,8 m/s^2$ . Kiihtyvyyssanturi on yleisimmin käytetty anturi värähtelymittauksissa, johtuen erityisesti sen monipuolisuudesta. Kiihtyvyyssanturin hyvinä puolina voidaan pitää sen pientä kokoa, kevyttä rakennetta, melko edullista hintaa ja laajaa taajuusaluetta. Koska mittalaitteella voidaan integroida kiihtyvyyssignaali nopeudeksi, pystytään samalla anturilla havaitsemaan matala- ja korkeataajuisia vikoja. Huonoja puolia kiihtyvyyssanturilla taas on alttius elektrostaattisille häiriöille, signaalin matalataajuisen osan mahdollinen hukkuminen korkeataajuisen osan alle, herkkä rakenne, joka voi johtaa vaurioitumiseen ja anturin asettumisaika. Anturin asettumisaika johtuu anturin asentamisesta tulevasta iskusta ja siitä, kun anturiin kytketään jännite. Mitä herkempi anturi on kyseessä, ja mitä kovemmin se iskeytyy mittauskohtaan, sitä kauemmin sillä kestää asettua. Jännitteen kytkemisestä johtuvan häiriön keston pituuteen vaikuttaa anturin vahvistimen rakenne ja mittausalueen alarajataajuus. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 46-47)

Nopeusanturit (kuva 15) ovat yleensä hieman kiihtyvyyssantureita kookkaampia. Nopeusanturin kuoren sisällä on käämi, jonka sisällä on anturin päihin kiinnitetty magneettinen massa. Kun anturi on kiinnitettynä mit-tauspisteeseensä ja rakenne värähtelee, jousitettu massa seuraa viiveellä anturin kuoren liikkeitä. Magneettinen massa aiheuttaa anturin käämiin anturin nopeuteen verrannollisen jännitteen, josta saadaan mittaus-signaali. Nopeusanturit kiinnitetään yleensä ruuveilla tai magneetilla. Anturin mittausalue on parhaimmillaan 5 Hz – 2000 Hz. Alarajataajuuteen vaikuttaa anturin sisäinen resonanssi, joka voi olla 3 Hz – 12 Hz, riippuen magneetin massasta ja jousen jäykkyydestä. Mittausalueen alarajataajuuden

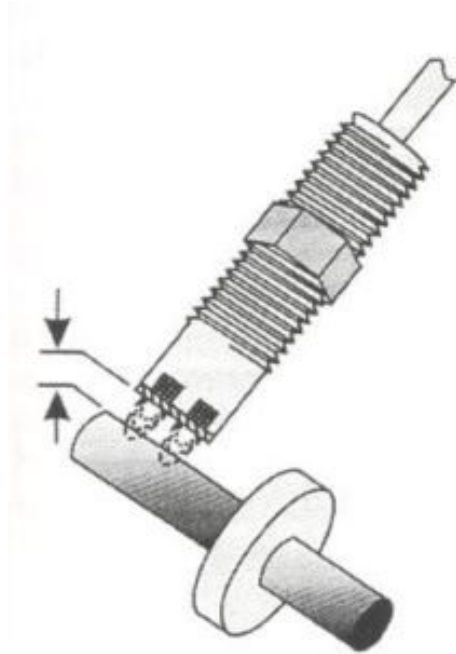
tulee olla joitain hertsejä sisäisen resonanssin yläpuolella. Nopeuden mittayksikkönä käytetään mm/s. Nopeusanturin hyviä puolia ovat erinomainen signaali/häiriösuhde, helppokäyttöisyys, herkkyys ja se, että se ei vaadi ulkopuolista virtalähdettä. Huonoja puolia ovat isokokoisuus, rajoitetut käyttölämpötila ja mittaustaajuus, herkkä rakenne ja se, että anturin asento voi vaikuttaa mittaustuloksiin. Nopeusanturien käyttö on vähentynyt, koska kiihtyvyyssignaali pystytään integroimaan nopeussignaaliksi. Nopeusmittauksissa on käytetty myös laserin avulla tehtävää kosketuksetonta mittausta, mutta sen ongelmana on ollut lasersäteen takaisinheijastumisen ongelmat ja mittaaslaserin korkea hinta. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 47-48)



Kuva 15. Nopeusanturi (Nohynek & Lumme 2004, s.47)

Siirtymäanturi (kuva 16) on tyypillisesti pyörrevirta-anturi, jolla mitataan yleensä noin 2 mm päästä kiinnityskohtaan ja mitattavan kohteen keskinäistä suhteellista liikettä. Anturin toimintaperiaate on se, että sen päässä oleva kela muodostaa magneettikentän, joka indusoi pyörrevirtoja kohtaan maansa ferromagneettiseen pintaan. Pyörrevirrat aiheuttavat muutoksia anturin päässä olevan kelan jännitteeseen. Kun matka anturin ja pinnan välillä muuttuu, aiheuttaa se muutoksia pyörrevirtoihin ja siten kelan jännitteeseen. Kyseinen muutos saadaan anturista ulos jännitteenä. Tästä signaalista selviää anturin ja mittauspisteen välinen etäisyys. Siirtymää voidaan mitata myös kiihtyvyyssignaaleilla ja nopeusantureilla. Silloin signaali täytyy integroida joko kahdesti kiihtyvyyssignaalista, tai kerran nopeussignaalista. Siirtymän mittayksikkönä käytetään  $\mu\text{m}$ . Siirtymäanturin hyviä puolia ovat pieni koko ja kyky mitata myös staattista etäisyyttä. Huonoja puolia ovat

se, että siirtymäanturi vaatii vakaan kiinnityskohdan suhteellisen liikkeen mittaamiseen, anturi vaatii erillisen virtalähteen ja erilaiset magneettiset ominaisuudet mitattavassa pinnassa muuttavat mittaustulosta. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 49)



Kuva 16. Siirtymäanturi (Nohynek & Lumme 2004, 49)

Siirtymäanturia lukuun ottamatta kaikilla anturityypeillä on rajataajuudet, joiden alapuolella mittauksia ei voida suorittaa luotettavasti. Jos siirtymäanturin kiinnityskohta on riittävän tukeva, päästään sillä mittaamaan 0 Hz:iin asti. Tyypillinen nopeusanturin ominaistaajuus on 2-10 Hz, mikä rajoittaa nopeusanturilla suoritettavien mittausten alarajataajuutta. Kiihtyvyyssanturin käyttöä matalilla taajuuksilla rajoittaa sen taajuusvasteen lineaarisen alueen päättyminen yleensä välillä 0,1-3 Hz. Matalimmilla taajuuksilla voidaan yleensä käyttää raskaita ja suurikokoisia kiihtyvyyssantureita, joilla alarajataajuus on lähellä 0,1 Hz. Nämä anturit ovat yleensä herkkiä ja niissä on pitkä asettumisaika, minkä takia niitä ei ole kannattavaa käyttää normaaleissa reittimittauksissa. Kun kiihtyvyyssanturilla tehdään mittauksia matalilla taajuuksilla, tulee ottaa huomioon, että jos halutaan muuttaa kiihtyvyyssignaali nopeudeksi, voi mittalaitteiden integrointikyky loppua 1-3 Hz välille. (Nohynek & Lumme, 2004, s. 56)

### 9.1.2 Akseleiden linjaukset

Laserlinjauksen toiminta perustuu kahteen lähetin/vastaanotin -yksikköön. Ne mittaavat lasersäteen kulun ja ilmoittavat linjausarvot. Sen lisäksi nykyisillä laserlinjauslaitteilla saadaan suoritettua korjauslaskut automaattisesti. (Hiljanen, 2009, s.7) Kuvassa 17 on VLSAT-laserlinjauslaite, joka on langaton, Bluetooth-tekniikkaa käyttävä laite. Kyseisellä laitteella saadaan mittaustulokset ilman ulkoisia häiriötekijöitä, kuten valoisuutta, värinää tai lämpötilan muutosta. (Nome Oy, n.d.)



Kuva 17. VLSAT-laserlinjauslaite (Nome Oy n.d.)

### 9.1.3 Visuaaliset tarkastukset

Endoskoopilla voidaan suorittaa visuaalisia tarkastuksia paikkoihin, joihin ei muuten olisi mahdollista nähdä purkamatta rakenteita. Teollisuudessa käytettävä videoendoskooppi koostuu sisäänvientiputkesta, joka sisältää kuvaukseen ja valaistukseen tarvittavat valokuidut, ja monitoriosasta, josta nähdään kuvattava kohde ja voidaan ohjata kameraa sekä käyttää muita kyseisen endoskoopin ominaisuuksia. Kuvan 18 videoendoskoopilla pystyy esimerkiksi zoomaamaan sekä tallentamaan kuvia ja videoita. Sitä pystyy käyttämään jopa 10 metrin pituudella ja sen sisäänvientiputki on luokitukseltaan IP67.



Kuva 18. Coantec C50 Videoendoskooppi (Nome Oy n.d.)

Lämpötilamittauksissa käytetään yleisesti infrapunakameroita. Ne ottavat vastaan kohteen pinnan lämpösäteilyä, ja kuvaavat ne näytöllään. Lämpökameralla saadaan mitattua kerralla suurelta alueelta ja nähdään lämpötilaerot eri pisteiden välillä. Lämpökameralla tarkastuksia tehtäessä tulee ottaa huomioon lämpöheijastumat, joita eri pinnoista voi tulla.

#### 9.1.4 Öljyanalyysi

Kulumishiukkasanalyysi tehdään voimalassa otetusta voiteluöljynäytteestä, joka lähetetään laboratorioon analysoitavaksi. Voiteluöljystä voidaan tehdä myös paikan päällä analyysi, jonka perusteella nähdään, onko öljy kunnossa vai ei, mutta siitä ei saada sen tarkemmin lisäinformaatiota. Nykyään on myös enemmän online-järjestelmiä voiteluaineiden analysointiin. Tällöin asennetaan öljynlaatuanturi kiinteästi kohteeseen, jolloin saadaan koko ajan reaaliaikaista tietoa öljyn kunnosta.

#### 9.1.5 Äänimittaukset

Yleisimmin käytetyt äänitasomittarit toimivat niin, että ne muuttavat ääniaallot sähköisiksi signaaleiksi ja näyttävät äänenvoimakkuuden desibeleinä digitaalinäytöllä. Käytetyn mittarin tulee täyttää kappaleessa 7.4 annetut vaatimukset. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että mittarin täytyy kyetä mittaamaan mittausalueella, jolla toimitaan. Sen ei kuitenkaan pitäisi olla ongelma useimmille mittareista.

## 9.2 Turvavälineet

Opinnäytetyön asiakaskyselyssä selvitettiin, mitä turvavälineitä kyselyyn osallistuneiden yritysten voimaloissa toimimiseen vaaditaan. Kyselyn vastausten perusteella selvisi, että tuulivoimaloissa toimimiseen vaaditaan melko samat turvavälineet kuin teollisuudessa yleensäkin. Töiden suorittajalla tulee olla henkilösuojaimet, eli kypärä, turvakengät, suojavaatetus sekä silmä- ja kuulosuojaus. Lisäksi töitä suoritettaessa on hyvä olla aina töihin sopivat käsineet.

Koska tuulivoimaloissa työskennellään korkealla, tulee töiden suorittajalla olla valjaat ja tarrain tikkaisiin. Näiden lisäksi voidaan vaatia ainakin yhaara vaimenninköyttä ja apuköyttä. Tikastarrain on yleensä mallikohtainen, eli eri voimaloissa voidaan eri mallisten tikkaiden vuoksi tarvita omat tarraimet. Työskenneltäessä korkealla tulee työn tekijän olla aina riittävästi ja huolellisesti kiinnitettynä.

## 10 KOULUTUKSET JA PÄTEVYYDET

Opinnäytetyön asiakaskyselyssä selvitettiin, mitä pätevyksiä ja koulutuksia yritykset vaativat, jotta heidän voimaloihinsa voidaan mennä suorittamaan tarkastuksia. Kyselyn vastausten perusteella selvisi, että tuulivoimaloissa toimimiseen vaaditaan pääasiassa samat pätevyudet kuin muussakin teollisuudessa. Ainoana erityisempänä pätevytenä on GWO-koulutus, joka vaaditaan tuulivoimaloissa toimimiseen.

Yleisiä teollisuudessa toimimiseen edellytettyjä pätevyksiä ovat, työturvallisuus ja hätäensiapukorttien omaaminen. Näiden lisäksi, kun ollaan sähkölaitteiden kanssa tekemisissä, vaaditaan yleensä sähkötyöturvallisuuskortti.

Värähtelymittausten tekijältä vaaditaan joissakin tapauksissa myös näyttöä pätevydestä. Tällaisena toimii esimerkiksi SKF:n tarjoama koulutus, jonka suorittamalla värähtelyanalysoija voidaan sertifioida. Tason 2 sertifikaatti on yleinen vaatimus värähtelymittausten suorittamiseen. Sertifikaatti vastaa standardin SFS-ISO 18436-2:en vaatimuksia.

Global Wind Organisationin, eli GWO:n koulutus on käytännössä kaikissa voimaloissa työskentelemiseen vaadittu standardi. Koulutuksen perusosa sisältää neljä moduulia: Working at heights, First aid, Fire awareness ja Manual handling.

## 11 YHTEENVETO

Tuulivoima on kasvava ala. Vihreät arvot ovat koko ajan tärkeämpiä ihmisille. Tämän ja ensi vuoden aikana Suomeen odotetaan nousevan yli sata uutta voimalaa ja hallituksen tavoite on, että vuoteen 2030 mennessä 50 % Suomen energian tuotannosta olisi uusiutuvilla energiamuodoilla. Koska Suomessa vesivoima voi kasvaa vain rajallisesti maastonmuotojen takia, on tuulivoimalla hyvät mahdollisuudet suureen kasvuun. Lisäksi tuulivoima on kilpailukykyisin tapa lisätä tuotantokapasiteettia olemassa olevaan verkkoon maailman markkinoilla. Näistä syistä myös kunnonvalvontaa tehdään yhä enemmän tuulivoimaloihin.

Työssä tehtyjen selvitysten perusteella kunnonvalvontatarkastusten tekemisen aloittaminen tuulivoimaloissa helpottuu. Tarvittavat tiedot on kerätty valmiiksi, joten tarkastustoiminta pääsee alkamaan suoraviivaisesti. Koska voimaloissa tarvittavat välineet ja pätevyudet on nyt tiedossa, voidaan ne hankkia jo ennen kuin varsinaista tarkastustoimintaa aloitetaan.

Tarkastuksiin sovellettavia standardeja kyllä löytyi, mutta ainakaan vielä ei valitettavasti ole olemassa standardisoituja raja-arvoja tuulivoimaloiden värähtelyille. Tällä hetkellä värähtelyn rajat on sovittava voimalan omistajan tai valmistajan kanssa. Tähän on varmaankin suurimpina syinä kattavan datan puuttuminen sekä tuulivoimaloihin liittyvät erityispiirteet, kuten tuulen alituinen suunnan ja voimakkuuden muuttuminen.

Työhön selvitettiin voimaloiden tarkastustarpeet, jotka olivat odotetun laiset. Pääpaino työn selvityksissä oli värähtelymittauksessa, öljyanalyyseissä ja endoskoopilla tehtävässä visuaalisessa tarkastuksessa. Näiden lisäksi akseleiden linjaus ja lämpökamerakuvaus olivat jo etukäteen päätetty tarjottaviksi tarkastusmenetelmiksi. Näiden tarkastusten lisäksi selvisi, että äänitasojen mittaukselle voisi olla tarvetta. Sähkön ja sähköasennusten laatuun liittyviä mittauksia ei edes tarjottu asiakkaille, joten niiden tarpeeseen tämä opinnäytetyö ei selvitystä tuonut.

Työtä tehtäessä pääsi tutustumaan Suomessa tuulivoimatoimintaa harjoittavien yritysten skaalaan sekä tuulivoimaloihin tehtävään kunnonvalvontaan. Työn laajuus on sovittu työn tilaajan tarpeeseen, kuitenkin jo jokainen tarkastustapa voisi olla oma opinnäytetyönsä. Pääpaino työtä tehtäessä oli siinä, että työn valmistuttua tilaajan olisi helppo aloittaa tarkastustoiminta, kun asiakkaat ja töiden suorittamisen vaatimukset olisivat tiedossa.

## LÄHTEET

- Clean energy wire (2018). German onshore wind power – output, business and perspectives. Haettu 22.1.2019 osoitteesta <https://www.cleenergywire.org/factsheets/german-onshore-wind-power-output-business-and-perspectives>
- Edu (n.d.). Lämpökamera. Haettu 12.3.2019 osoitteesta [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k5\\_lampokamera.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k5_lampokamera.html)
- Electrek (2017). World's tallest wind turbine built in Germany. Haettu 22.1.2019 osoitteesta <https://electrek.co/2017/11/02/worlds-tallest-wind-turbine-built-in-germany/>
- Energiateollisuus (2019). Energiavuosi 2018 – Sähkö. Haettu 22.1.2019 osoitteesta [https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi\\_2018\\_-\\_sahko.html#material-view](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_sahko.html#material-view)
- Fingrid (n.d.). Tietoaaineistojen haku. Haettu 24.1.2019 osoitteesta [https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected\\_data\\_sets=124](https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected_data_sets=124)
- Halme J., (2005). Planeettavaihteet – rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. Haettu 28.1.2019 osoitteesta [http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servoplaneettavaihteet\\_btuo43-051349.pdf](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servoplaneettavaihteet_btuo43-051349.pdf)
- Hiljanen, E. (2009). *Laserlinjaus*. Opinnäytetyö. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Haettu 10.3.2019 osoitteesta [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2999/Hiljanen\\_Eero.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/2999/Hiljanen_Eero.pdf?sequence=1)
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. (2013). Voimalaitostekniikka. 2. painos. Helsinki: Opetushallitus.
- KHK Gears(n.d.). Characteristics of gears. Haettu 24.1.2019 osoitteesta [https://khkgears.net/new/gear\\_knowledge/introduction\\_to\\_gears/characteristics\\_of\\_gears.html](https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/characteristics_of_gears.html)
- Kaim, C. (2000). The World of Planetary Gears. Haettu 31.1.2019 osoitteesta <https://www.machinedesign.com/motion-control/world-planetary-gears>
- Korpela, A. (2016). Tuulivoiman perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka

Letcher, T. (2017). Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. Cambridge: Academic Press.

Machine Lubrication (2004). High-speed Helical Gear Cooling and Lubrication. Haettu 12.3.2019 osoitteesta <https://www.machinerylubrication.com/Read/797/cooling-lubrication-of-high-speed-helical-gears>

Mainio, T. (2019). 10 000 asukkaan li on pian Suomen kovin tuulivoimamagneetti: "Voimaloiden kokonaismäärä ylittää 200:n, jos hankkeet toteutuvat" - tuulivoiman rakennus virkistynyt. *Kauppalehti*, vaatii kirjautumisen. Haettu 18.1.2019 osoitteesta <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/10-000-asukkaan-ii-on-pian-suomen-kovin-tuulivoimamagneetti-voimaloiden-kokonaismaara-ylittaa-200n-jos-hankkeet-toteutuvat-tuulivoiman-rakennus-virkistynyt/d104422a-3900-481e-a994-96abb0d3379f>

Nohynek, P. & Lumme, V. (2004). Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. 2. täydennetty painos. Rajamäki: KP-Media

Nome. (n.d.). Tuotteet. Haettu 10.3.2019 osoitteesta <https://nome.fi/products/>

SFS-ISO 10816-21 (2015). Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 21: Horizontal axis wind turbines with gearbox. SFS Online. Haettu 10.2.2019 osoitteesta <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-ISO 81400-4 (2005). Wind turbines – Part 4: Design and specification of gearboxes. SFS Online. Haettu 19.1.2019 osoitteesta <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Suomen Tuulivoimayhdistys (n.d.). Tietoa tuulivoimasta, tuulivoimaloiden rakenne. Haettu 21.1.2019 osoitteesta <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>

Suomen Tuulivoimayhdistys (n.d.). Tietoa tuulivoimasta, tuulivoimatekniikka. Haettu 21.1.2019 osoitteesta <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka>

Suomen Tuulivoimayhdistys (n.d.). Tietoa tuulivoimasta, äänivaikutukset. Haettu 13.3.2019 osoitteesta <https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/ymparisto-vaikutukset/aanivaikutukset>

Suomen Tuulivoimayhdistys (2019). Tuulivoima Suomessa 2018. Haettu 22.1.2019 osoitteesta <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/1303-STY - Vuosiraportti 2018 Public.pdf>

Tukes (n.d.). Standardien asema vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa. Haettu 9.3.2019 osoitteesta <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/vaatimustenmukaisuus/standardien-asema-vaatimustenmukaisuuden-osoittamisessa>

Turkia, V. & Holttinen, H. (2013). Tuulivoiman tuotantotilastot – Vuosiraportti 2011. VTT. Haettu 31.1.2019 osoitteesta <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T74.pdf>

Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista 1107/2015. Haettu 13.3.2019 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151107>

Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuvilta vaaroilta 26.1.2006/85. Haettu 13.3.2019 osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20060085#P13>

WWEA (2018). Wind Power Capacity reaches 539 GW, 52,6 GW added in 2017. Haettu 29.1.2019 osoitteesta <http://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics/>

Ympäristöhallinnon ohjeita (2014). Tuulivoimaloiden melupäästön todentaminen mittamalla. Haettu 13.3.2019 osoitteesta [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42938/OH\\_3\\_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42938/OH_3_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ympäristöministeriö (2014). Ympäristöministeriöltä ohjeet tuulivoimaloiden melun mallintamiseen ja mittaamiseen. Haettu 13.3.2019 osoitteesta [http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ymparistoministeriolta\\_ohjeet\\_tuulivoima%2828440%29](http://www.ym.fi/fi/FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ymparistoministeriolta_ohjeet_tuulivoima%2828440%29)

## Suomen tuulivoimalaitosten viat vuonna 2011

Komponentti	Vika-aika yhteensä (h)	Osuus vika-ajasta (%)	Vikojen lukumäärä
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>