



Prizztech

Tuulivoimaloiden huoltokäytännöt Saksassa

Kimmo Palmu, 20.1.2016

Prizztech Oy toteuttaa EAKR –hanketta WINDTEK - maatuulivoimapuistojen käyttö- ja huoltoliiketoiminnan sekä pystytyslogistiikkaratkaisuiden kehittäminen”

Prizztech



SATAKUNTALIITTO

PORI



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020

Tuulivoimaloiden huoltokäytännöt Saksassa

Kimmo Palmu 20.1.2016

Sisältö

Selvitys tuulivoimaloiden huoltokäytännöstä Saksassa	5
Yleistä tuulivoiman kehittämisestä Saksassa	5
Tuulivoiman lisärakentaminen	5
Tuulivoiman rakenteellinen jakautuminen	6
Tuulivoiman omistuksen jakautuminen	9
Tuulivoimaloiden käyttö ja kunnossapito	11
Tekninen käyttö	11
Käytettävyys ja vikailmoitukset	11
Kunnossapito	13
Kuntoon perustuva kunnossapito	16
Kunnossapidon ajoneuvoja	17
Kustannukset ja sopimukset	18
Tuulivoiman kunnossapidon kustannukset	18
Takuuajan ja täyshuoltosopimuksen loppuminen, käyttöajan pidennys	20
Huoltopalvelut ja sopimukset	20
References	21

Selvitys tuulivoimaloiden huoltokäytännöstä Saksassa

Saksassa on investoitu voimakkaasti uusiutuvaan energiaan, josta tuli vuonna 2014 suurin sähköntuotantomuoto 27,7% (160,610 GWh) osuudella ohittaen ruskohiilellä tuotetun sähkömäärän. Suurin osa uusiutuvasta energiasta – 35% -- tuotettiin tuulivoimalla [13]. Tuulivoima ei ole pelkästään nyt tärkeä sähköntuottaja, vaan kapasiteettia kasvatetaan edelleen voimakkaasti (taulukko 1).

Tuulivoimaloiden käyttö, huolto ja korjaukset saavat kasvun myötä lisää painoarvoa, koska on laaja pohja käytäntöjen optimoimiselle. Myös tuhansia tuulivoimaloita on jo toisella käyttövuosikymmenellä (taulukko 2). Yksi taloudellisesti tärkeä osa-alue huollossa ja kunnon selvityksessä tulee lähivuosina olemaan käyttöiän pidentäminen, jolle vaikuttaa olevan hyvät lähtökohdat.

Periaatteessa tuulivoimaloita pitää huoltaa kuin mitä tahansa konetta tai voimalaitosta. Kuitenkin tuulivoimassa on

myös merkittäviä eroja, jotka pitää huomioida käytössä ja huollossa.

- Jokainen tuulivoimala on tietokoneohjauksella varustettu itsenäinen yksikkö
- Tuulivoimaa rakennetaan paikkoihin, joissa ympäristö asettaa kovat vaatimukset
- Hyvin voimakkaat dynaamiset voimat kaikille rakenteille [16]

Tuulivoimaa on nyt rakennettu jo yli neljännesvuosisata teollisessa mittakaavassa ja tekniikka kehittyä edelleen kovaa vauhtia. Tästä syystä on perusteltua aloittaa pienellä katsauksella tuulivoiman kehitykseen Saksassa, sillä huoltokäytännöt on sovellettu juuri vallitsevaan tilanteeseen.

Yleistä tuulivoiman kehittymisestä Saksassa

Saksa oli vielä 2007 maailman johtava maa tuulivoiman rakentamisessa jolloin rakennettua tuulivoimaa oli yli 22 GW. Vuonna 2008 USA ohitti Saksan ja vuonna 2010 Kiina. Varsinkin vuosina 1999 – 2003 rakennettiin ennätysmääriä uusia tuulivoimaloita, joista iso osa voidaan teknillisiltä ratkaisuiltaan edelleenkin luokitella moderneiksi.

Tuulivoiman lisärakentaminen

Vaikkakin tuulivoiman vuotuinen lisärakentaminen halutaan rajoittaa 2.500 MW:iin, niin vuonna 2014 kuitenkin rakennettiin 4.745 MW uusia tuulivoimaloita maalle. Kun huomioidaan repowering, siis vanhojen voimaloiden purkaminen, niin nettolisäyskin oli 4.360 MW.[5]

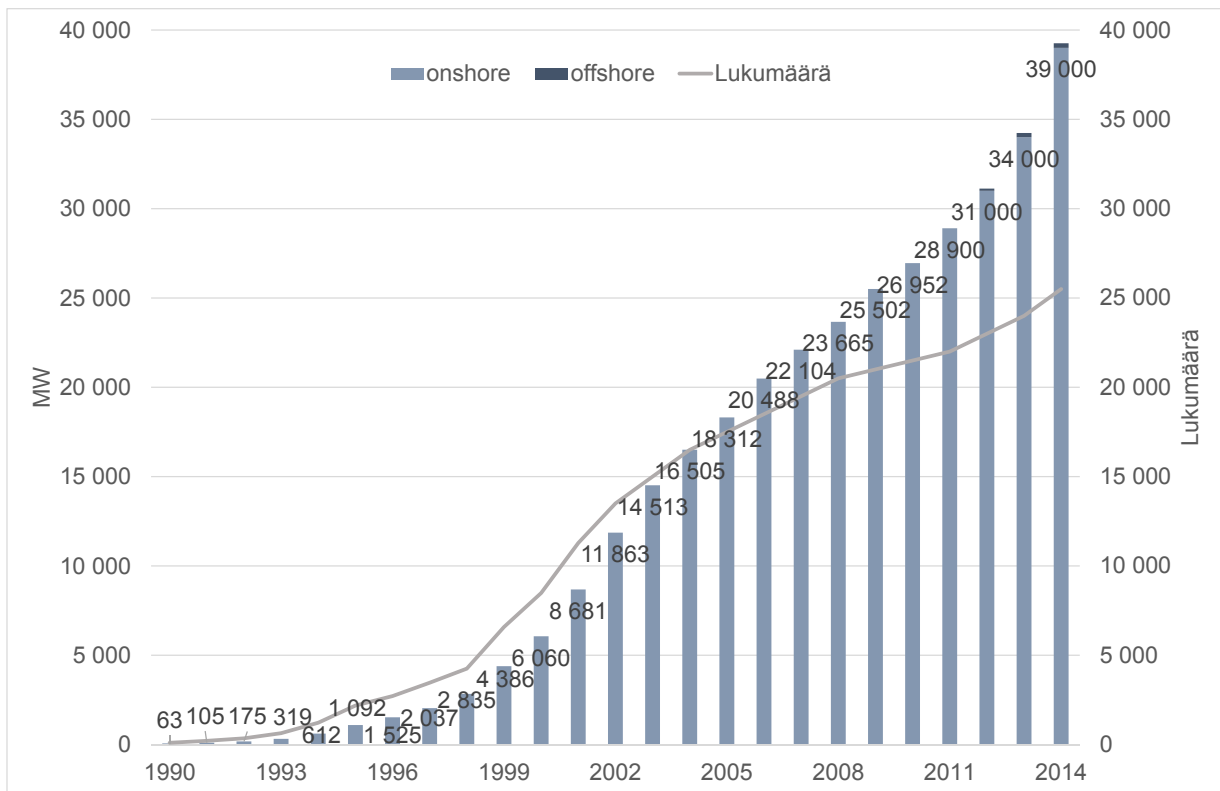
Tuulivoiman rakenteellinen jakautuminen

Varsinkin taulukossa 2 näkyy hyvin selkeästi Tuulivoimaloiden jakautuminen käyttöiän ja nimellistehon mukaan. Vanhoja voimaloita tullaan lähivuosina purkamaan sadoittain, jonka vaikutus rakennettuun nimellistehoon tulee olemaan vielä hyvin pieni. Koska samaan aikaan vuotuinen nimellistehon nettolisäys halutaan rajata 2.500 MW:iin, niin moni omistaja tulee tarkkaan punnitsemaan eri vaihtoehdot. Todennäköisesti suurimmalle osalle varsinkin 2000-luvulla ra-

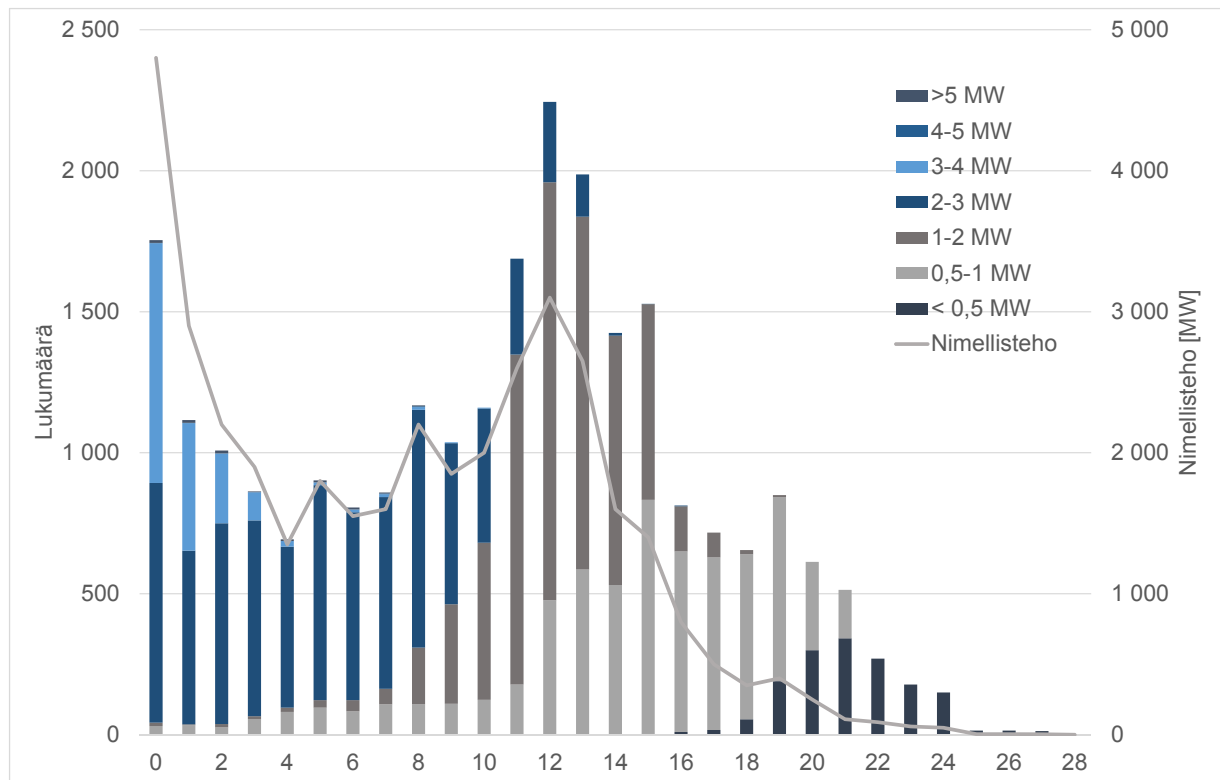
kennettuihin luotettavasti toimiviin tuulivoimaloihin tullaan anomaan viiden ja jopa kymmenen vuoden käyttöluvan pidennyksiä. Toisaalta pitää huomioida, että ensimmäiset tuulivoimalaidat rakennettiin parhaille mahdollisille paikoille ja varsinkin 2000-luvulla on etäisyys rannikkoon kasvanut kokoajan. Koska juuri rannikon läheisten 500/660 kW ja 750/1.000 kW Tuulivoimaloiden uusiminen (repowering) lupaa parhaimman tuoton, tullaan ne lähivuosina uusimaan. Sisämaassa olevan 1,5 MW Tuulivoimalaitoksen korvaaminen antaa huomattavasti pienemmän tuoton lisäyksen. [10]

Varsinkin kaavassa tuulivoimalle varatuista alueista pidetään kiinni ja yksi mahdollisuus varmistaa oikeus tuulivoimaan on jatkaa olemassa olevien tuulivoimaloiden käyttöä, mikä usein on taloudellisestikin kannattavaa.

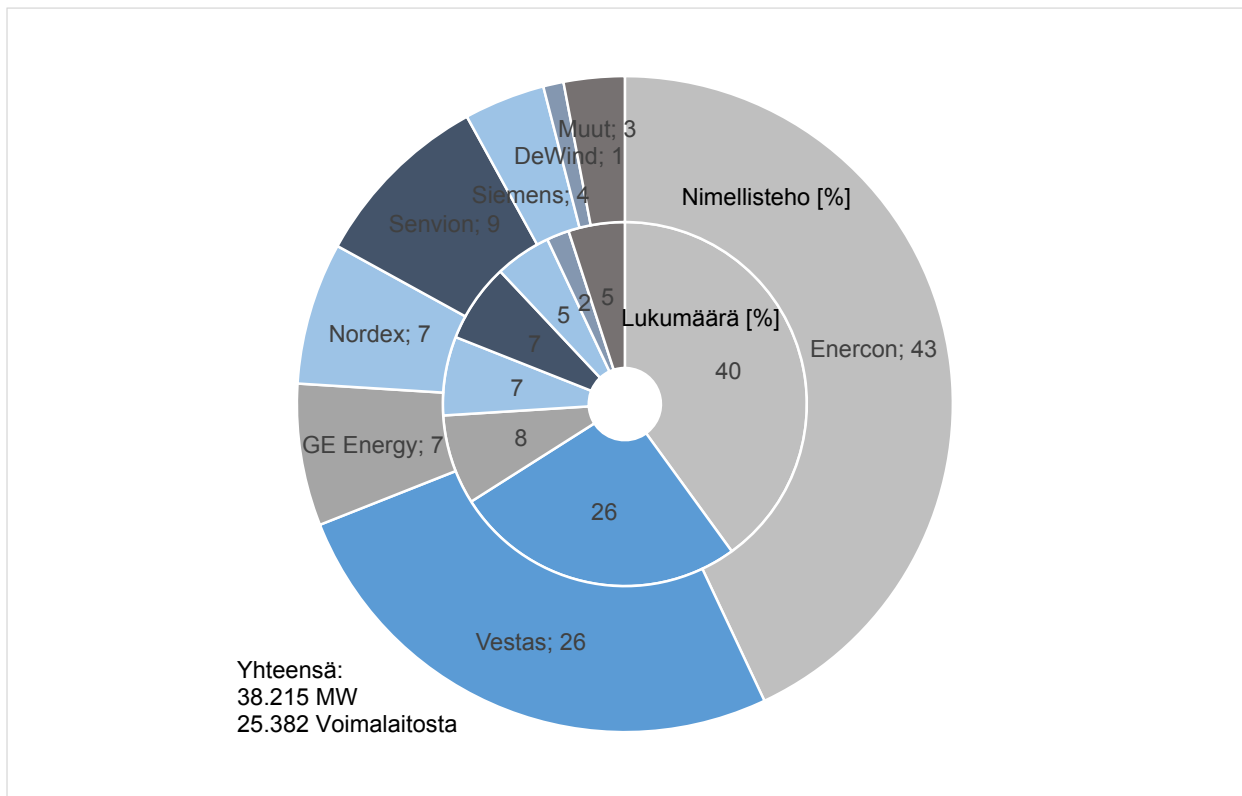
Näistä tekijöistä johtuen tuulivoimaloiden määrä ei todennäköisesti tule vuoteen 2030 mennessäkään vähenemään, vaikkakin Taulukko 1 antaa viitteitä kappalemääräisen kurvin selkeän taittumisen jatkumisesta. Enercon on myös jo sertifioinut ensimmäisenä lavan käyttöikäksi 30 vuotta, joten 30 vuoden käyttöikä tulee varmasti olemaan tulevaisuuden suuntaus, mikä asettaa myös omat vaatimuksensa tuulivoimaloiden huoltotoiminnalle.



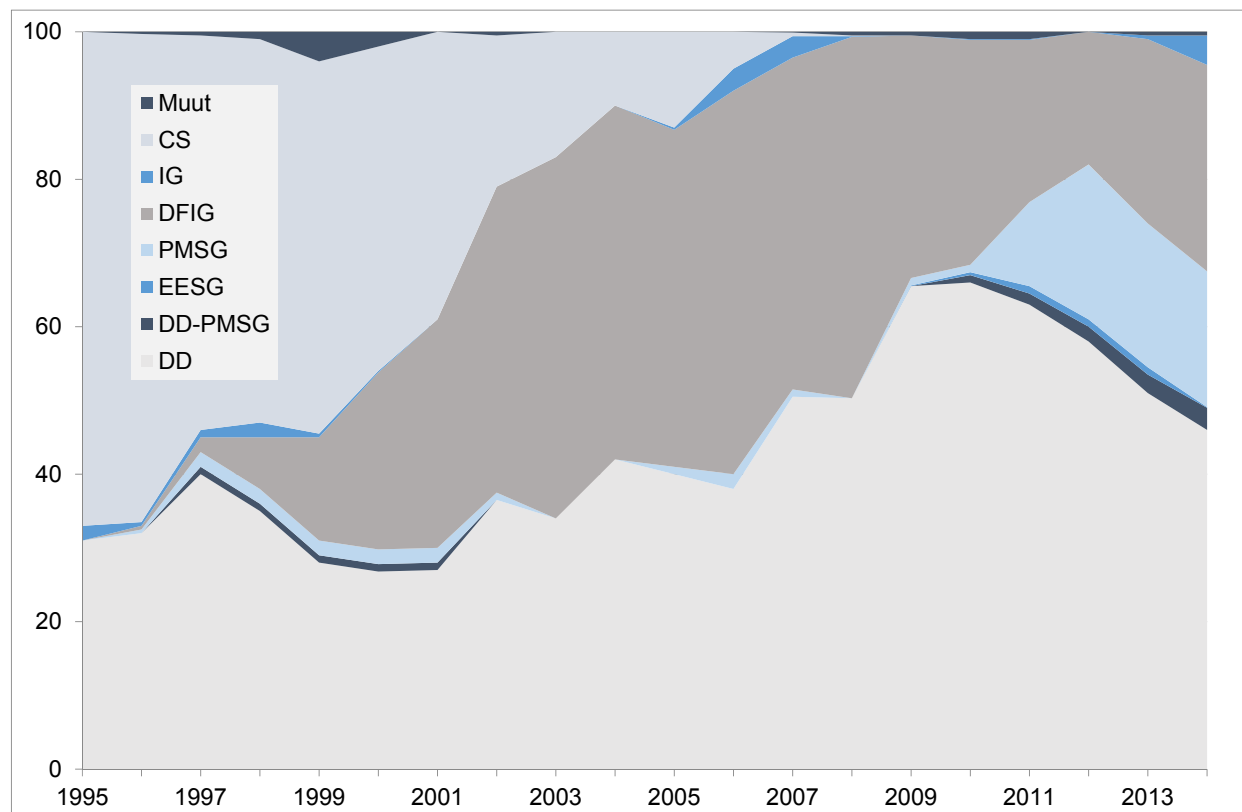
1 Saksassa rakennettu tuulivoima megawateissa ja kappalemääräisesti (kurvi) [13]



2 Tuulivoimaloiden nimellisteho, ikä ja määrä [13]



3 Markkinaosuudet vuonna 2014 käytössä olleissa tuulivoimaloissa [13]



4 Tuulivoimaloiden rakenteellinen jakautuminen [13]

Viimeisen kymmenen vuoden aikana yli 90% rakennetuista tuulivoimaloista kuuluvat kolmeen päätyyppiin DD (direct drive), PMSG (gear mechanism with permanently excited generator), DFIG (gear mechanism with doubly fed asynchronous generator). Yksi syy tähän selkeään jakautumaan on varmasti se, että yli 2/3 tuulivoimaloista tulee kahdelta valmistajalta.[13]

Vaikkakin monessa tutkimuksessa on todettu tehoon suhteutettujen huoltokustannusten (€/kWh tai €/kW) pienentyneen, niin suurimmat osasyöt ovat tuulivoimaloiden koon kasvu, sekä luotettavuuden paraneminen. Yhtenä merkinä luotettavuuden paranemisesta pidetään myös sitä, että valmistajat ovat viime vuosina tarjonneet yhä pidempiä huoltosopimuksia. Esimerkiksi Bloomberg New Energy Finance on laskenut täyshuoltosopimusten hinnan laskeneen vuodesta 2008 31€/kW/a vuoteen 2012 mennessä 20 €/kW/a. Mikä on myös lähellä UK's Department of Energy and Climate Change laskemaa hintaa 23 €/kW/year. [21]

Toisaalta on 2 MW – Tuulivoimalaitokselle 20 vuoden käytön laskennallinen (sis. investointikulut) Arvontuotto n. 1,9 Mio. €. Ja pelkän käytön laskennallinen arvonlisäys on 1 Mio. € jos kaikki palvelut hankitaan omasta maasta. [17]

Taulukko 5 näyttää huollon ja korjausten osuuden huomattavan nousun toisella käyttövuosikymmenellä. Tämä trendi tulee varmasti ainakin osaksi jatkumaan, kun mennään kolmannelle vuosikymmenelle.

Vaikkakin jokaisella kasvulla on rajansa, niin Taulukosta 2 voi päätellä alle 1 MW voimaloiden käytöstä poistamisen kestävän noin kymmenisen vuotta. Tänä aikana tulee tuulivoimaloiden laskennallinen keskimääräinen teho kasvamaan, mikä tulee edelleen alentamaan suhteutettuja huoltokustannuksia ja samalla myös tuulella tuotetun sähkön kustannuksia.

Saksassa on Tanskan jälkeen suurin tuulienergiantuotto suhteessa pinta-alaan. Vaikkakin tuulivoimaloita löytyykin koko maasta, niin eniten tuulipuistoja on rannikoiden läheisillä alueilla. Suomeen verrattuna suuria eroja ovat, että tuulipuistojen väliset etäisyydet ovat huomattavasti pienempiä, melkein kaikille tuulivoimaloille on erittäin hyvät kulkuyhteydet ja talviset kelit haittaavat kulkemista ja työskentelemistä vain satunnaisesti.

Vuonna 2013 arvioitiin Saksassa maa tuulivoiman huollon ja käytön työllistävän noin 18.200 henkilöä. [22]. Jos tämän luvun suhteuttaa silloiseen tuulivoimaan ~34.000 MW tai ~28.000 voimalaitosta, niin varovainen arvio olisi, että noin 2 MW tai 1,5 Tuulivoimalaitosta työllistää yhden ihmisen. Pitää

kuitenkin huomioida, että Saksasta käsin ajetaan ja huolletaan monia Euroopassa olevia tuulivoimaloita ja näitä lukuja ei ole eritelty. Saksassa kehitetään määrätietoisesti uusiutuvan energian alaa uutena vientituotteena ja tärkeänä työllistäjänä. [6, 7] Monissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että energiansäästön myötä syntyneet työpaikat ovat aiheuttaneet työpaikkojen katoamista esim. lauhdevoimassa ja näin ollen on netto saldo vain muutama kymmenentuhatta työvuotta. [9]

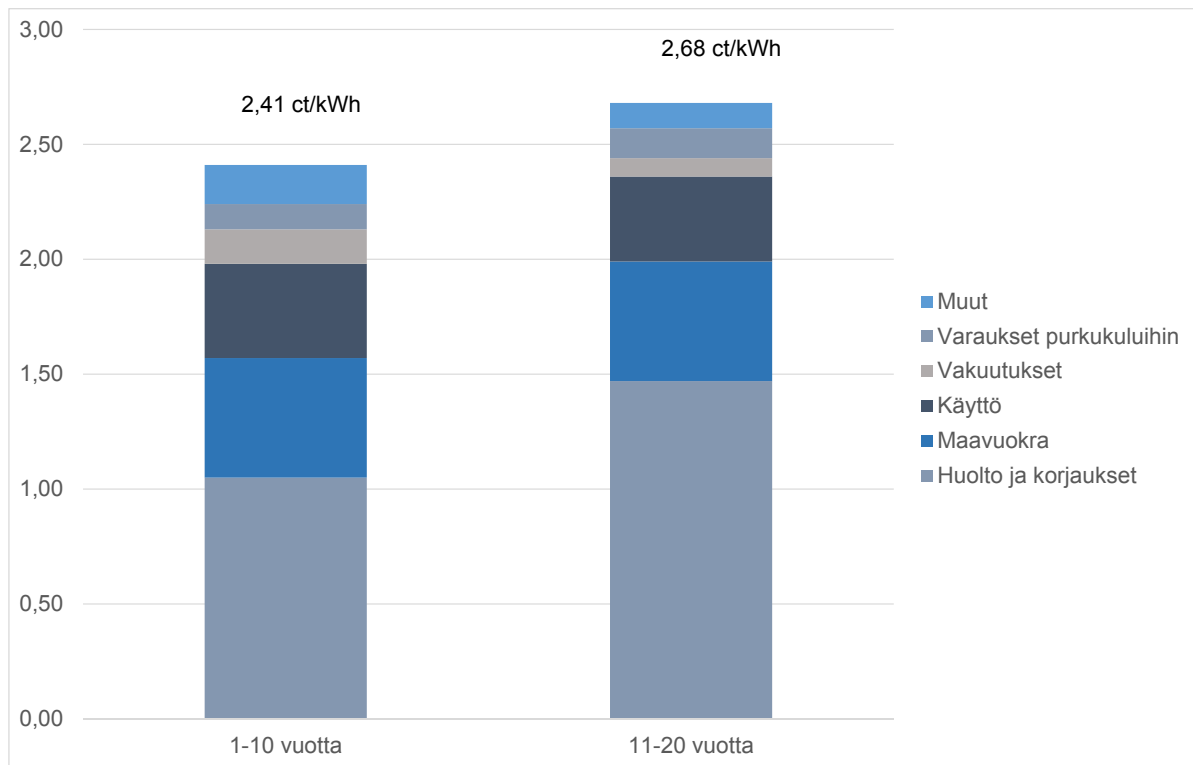
Tuulivoiman omistuksen jakautuminen

Tuulivoiman omistuksen juuret ovat syvällä saksalaisen ympäristöliikkeen historiassa, joka alkoi ydinvoiman vastustuksesta ja ympäristöarvojen esille tuomisesta. Tämä historia on myös se tausta, miksi ydinvoiman vastustus ei ole koskaan vähentynyt, sillä ihmiset tiedostavat edelleen hyvin voimakkaasti radioaktiivisuuden vaarallisuuden.

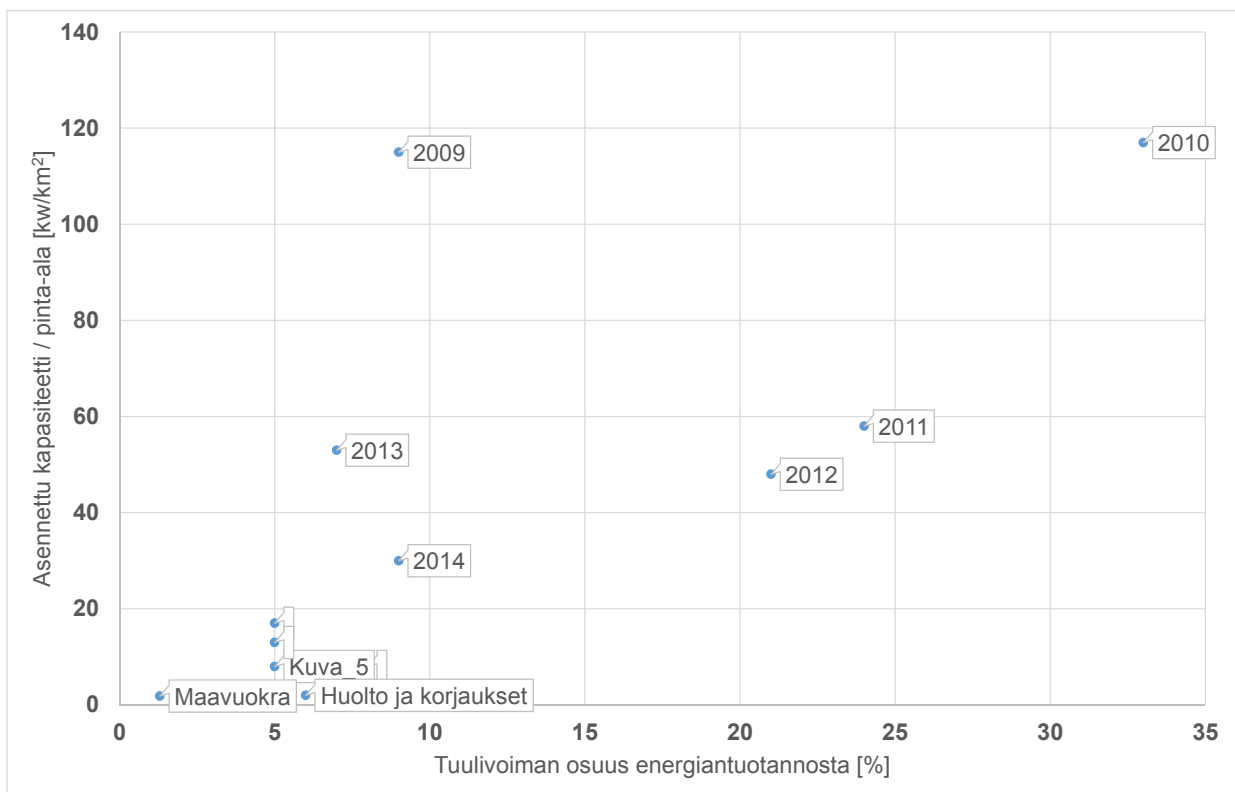
Ympäristöliikkeen tukemat tai sen piiriin kuuluvat ovat aikaisessa vaiheessa alkaneet kehittää uusiutuvan energian ratkaisuja ja energian tukimuotoja on kehitetty niin, että yksityiset ihmisetkin pystyivät hyötymään niistä. Tästä johtuen melkein puolet (56.129 GWh) vuonna 2012 tuotetusta uusiutuvasta sähköstä oli yksityisten omistuksessa olevien voimaloiden tuottamaa. [27]

Jo toisena uudistettuna painoksena 2013 julkaistussa tutkimusraportissa „Bürger Energie“ – 'kansalaisenergia', jaetaan Energian omistus neljään pääryhmään taulukossa 6. Tämä selvitys on ollut haasteellinen varsinkin tuulivoiman osalta, koska rahoitus- ja omistusrakenteet ovat käytännössä jokaisessa tuulipuistossa omanlaiset ja esim. yksi yksityinen, tai osuuskunnat, tai rahastot voivat omistaa osia kokonaisista tuulipuistoista. Ja siksi tämän selvityksen päätavoite oli jakaa yksityinen omistus paikalliseen niin sanottuun kansalaisten omistukseen ”yksityishenkilöt”, sekä yksityishenkilöiden ’pelkkään’ varojen sijoittamiseen ja tuoton hakuun ”Yksityiset rahastot”.

Käytännössä yksityiset eivät osallistu merituulivoiman rakentamiseen, koska tarvittavat sijoitussummat ovat niin suuria. Mutta kuten taulukosta 7 voi laskea yhteen, niin vuonna 2012 asennetusta tuulivoimasta yli puolet oli yksityisessä omistuksessa, joka jakautui hyvin tasaisesti kansalaisenergian ”yksityiset henkilöt” ja ”yksityisten rahastojen” kesken.



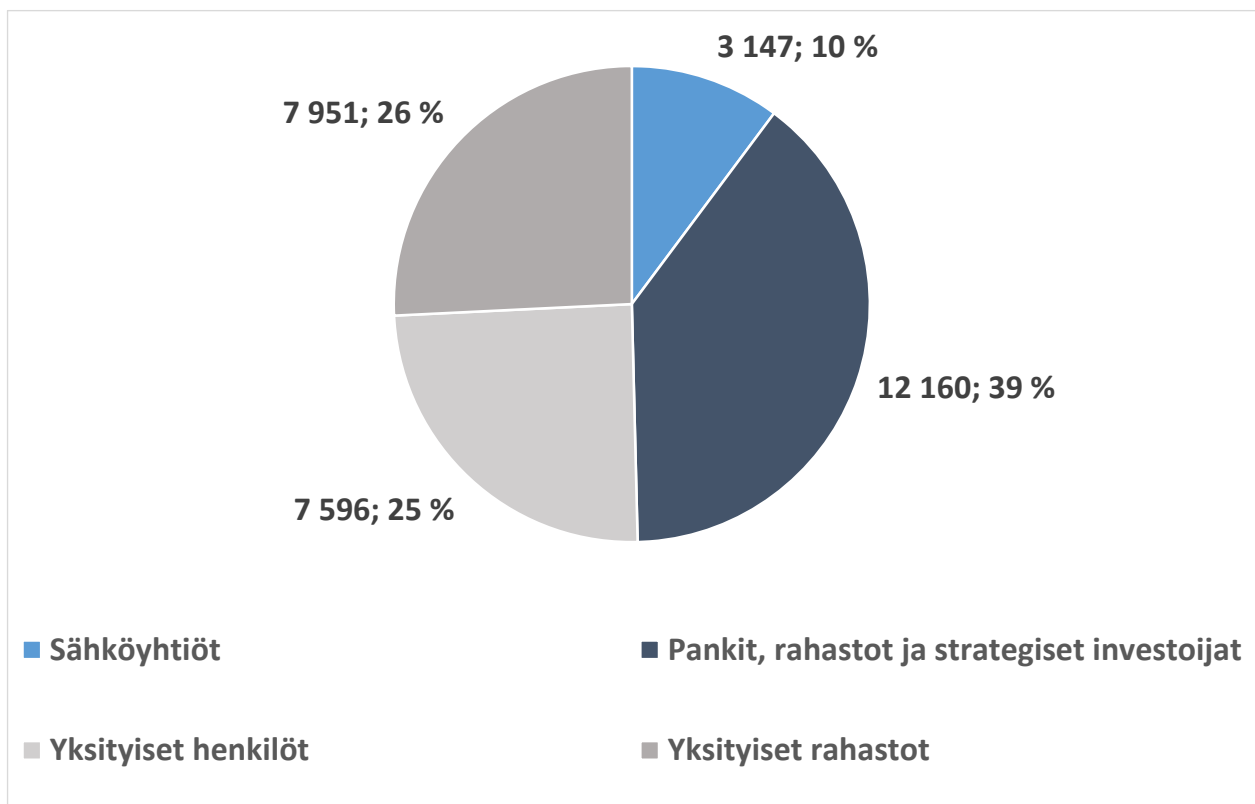
5 Käyttökustannusten jakautuminen käyttövuosikymmenille [13]



6 Tuulivoima suhteessa pinta-alaan [kW/km²] [13]

Yksityinen omistus		Sähkøyhtiöt	Pankit, rahastot ja strategiset investoijat
Yksityiset rahastot	Yksityishenkilöt		
Rahastot ja vähemmistö osakkuudet	- Yksityishenkilöt, kuten maanomistajat, sekä alueelliset pienyritykset - Energiaosuuskunnat	'4' ; RWE, Eon, EnBW, Vattenfall - Alueelliset sähkøyhtiöt - Kansainväliset sähkøyhtiöt - Contracting ja energiapalvelu yritykset	- Sijoitus-rahastot - Teollisuus ja yritykset - Hankkeiden kehittäjät

7 Maatuulivoiman omistajien jako neljään pääryhmään [27]



8 Omistususuudet maatuulivoimasta 2012 (30.854 MW) [27]

Tuulivoimaloiden käyttö ja kunnossapito

Tuulivoiman käyttö jaetaan tekniseen ja kaupalliseen vastualueeseen. Kaupalliseen kuuluu kaikki rahoitukseen, sopimusiin, vakuutuksiin, laskentaan, laskutukseen sekä sähkön myyntiin liittyvät tehtävät. Tekninen käyttö on vastuussa siitä, että tuulivoimalan käytettävyyttä pysyy tavoitteessa (esim. 97%) ja omistajilla on aina käytettävissä kaikki kuntoon liittyvät tiedot ja raportit. Tekninen käyttäjä on siis myös vastuussa kunnossapidon organisoinnista.

Saksassa ovat valmistajat kasvaneet yli kaksi vuosikymmentä yhdessä omistajien määrän ja alan muiden yritysten kanssa. Sekä yhteisistä kokemuksista on syntynyt yhteinen luottamus pohja, että omistajuuden pirstoutunut rakenne (taulukko 3) ja voimakkaat markkinavaihtelut (myyjän / ostajan markkinat) ovat kaikki osaltaan nykyisen tilanteen syntymiseen. Laajan omissuhteen tukena on pinempi määrä yrityksiä, jotka käyttävät joko omia tuulipuistojaan ja/tai myyvät käyttöpalveluita muille yrityksille ja osuuskunnille. Huollosta vastaavat edelleen pääosin valmistajat, jotka eivät pelkää myynnin jälkeen ota päävastuuta tuulivoimalaitosten huollosta, vaan ovat myös monessa suhteessa etulyöntiasemassa:

- Yksinoikeus kaikkien valmistamien tuulivoimaloiden käyttötietoihin (tietokanta)
- Kaikki tekniset dokumentit
- Sopimukset komponenttien valmistajien kanssa

Kuitenkin, niinkuin taulukossa 2 näkyy, niin tuhansia tuulivoimaloita on toisella käyttövuosikymmenelle ja se on mahdollistanut myös riippumattomien huoltoyritysten kehittymisen. Varsinkin vuotuisessa käyttäjille suunnatussa kyselyssä, ovat riippumattomat saaneet huomattavasti parempia arvosanoja kuin valmistajat – ainoa poikkeus on Enercon, joka on vuosi vuodelta saanut parhaimmat arvosanat [8].

Tekninen käyttö

Tekninen käyttäjä on vastuussa

- Tuulipuiston käytöstä 24/7
- Kunnossapidon ja tarkastusten organisoinnista
- Puolivuotistarkastus ja kunnossapito
- Lapojen tarkastus (esim. joka toinen vuosi)
- Isommat kunnossapito ja parannus toimenpiteet
- Kuntoon perustuva kunnossapito
- Kunnan valvonnasta ja valmistajan huolto-ohjelman seuraamisesta
- Kuukausittaisesta raportointinnista
- Käytettävyyden optimimisesta

Käytettävyyttä ja vikailmoitukset

Jotta tuulivoimalat toimivat luotettavasti ja turvallisesti pitää niitä huolta säännöllisesti, niin kuin kaikkia koneita. Ja niinkuin kaikissa koneissa, liittyy huoltoon osien ja käyttömateriaalien (öljyt, yms.) vaihtoa. Niinkuin koneissa yleensä, johtuvat ensimmäisinä vuosina ilmaantuvat viat tuulivoimalan kokoomis- ja rakennusvaiheesta tehdyistä virheistä. Sen jälkeen pitäisi useamman vuoden ajan kaiken toimia luotettavasti, kunnes erilaiset kulumiset alkavat taas aiheuttamaan

erilaisten vikojen ilmaantumista. Alkuvaiheen korjaukset jäävät useimmiten valmistajan vastuulle, kun viat ilmaantuvat takuuaikalla. Riippuen huoltosopimuksen pituudesta, on suurin osa ajasta vähävikaisista 2 – 10 vuotta. Jossain vaiheessa 10 - 15 käyttövuoden jälkeen alkaa vikojen määrä taas nousta. 15 käyttövuoden jälkeen pitää myös tehdä päätös siitä, aiotaanko jatkaa Tuulivoimalaitoksen käyttöä kolmannelle vuosikymmenelle ja suunnitella huolto-ohjelma sen mukaan.

Tuulipuiston kustannukset, tuotto ja kannattavuus lasketaan projektin kehittämisvaiheessa ja päivitetään säännöllisin välein, koska laskelmissa on monta oletusarvoa. Tuottotavoitteen saavuttamiseen vaikuttavat pääasiassa:

- Todelliset tuuliolosuhteet (verrattuna tuottoennusteseen)
- Tuulivoimalan tuotto (performance)
- Tekninen käytettävyyttä

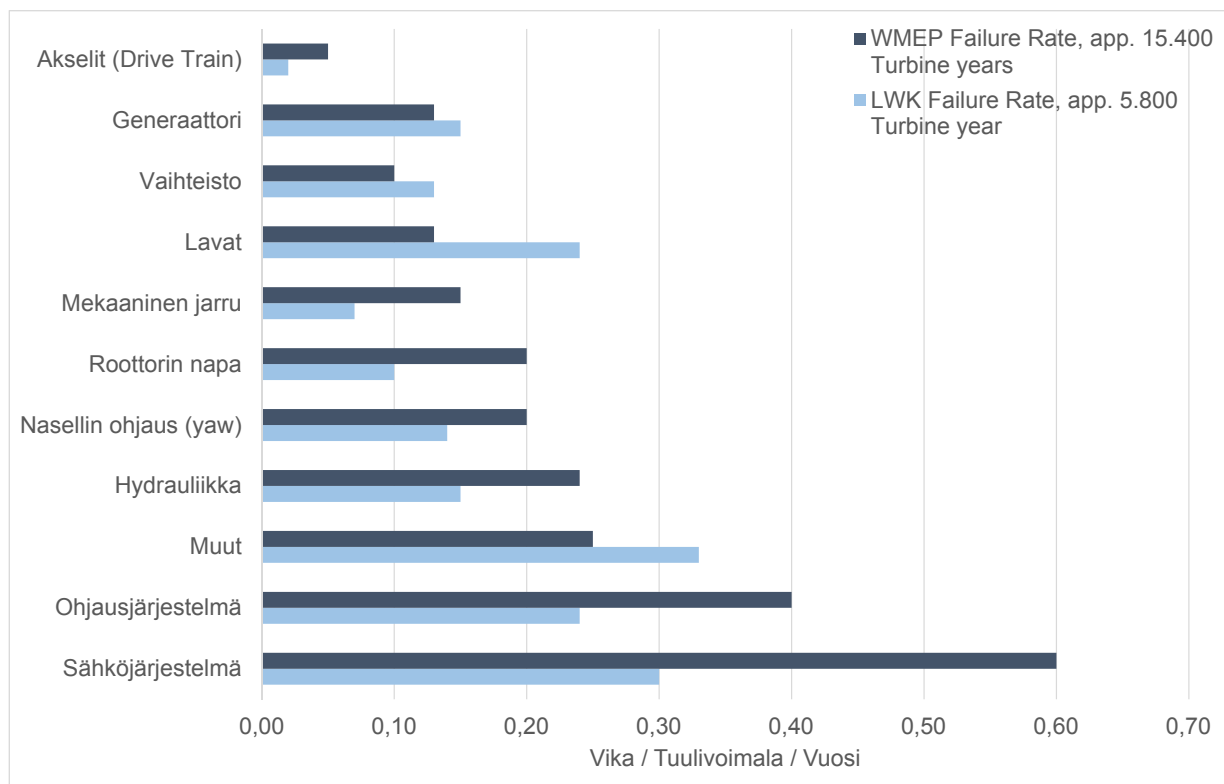
Tuulivoimalan tuottoon voi vaikuttaa, kun pidetään huolta, että lavat ovat hyvässä kunnossa, lapojen kulmat pysyvät oikeina, ja roottori seuraa tuulta oikeassa kulmassa. Pienetkin virheet kulmissa eivät pelkää pienennä tuottoa, vaan myös rakenteisiin vaikuttavat voimat kasvavat ja osien kuluminen lisääntyy. Käyttötietoja ja tuotantokurvia tarkastelemalla voi päätellä onko tuulivoimalan tuotto optimaalinen. Sen lisäksi voidaan ulkoisilla mittauksilla varmistaa kaikkien toimintojen luotettavuus.

Tekniseen käytettävyyteen vaikuttavat voimalaitoksen vihakarkkyyden lisäksi teknisen käyttäjän reaktionopeus, varaosien ja huoltohenkilökunnan saatavuus, sekä korjausten ja huoltojen hyvä suunnittelu ja organisointi. Tämän lisäksi teknilliseltä käyttäjältä odotetaan selkeää ja täydellistä dokumentointia voimalaitoksen kunnosta ja kaikista toimenpiteistä.

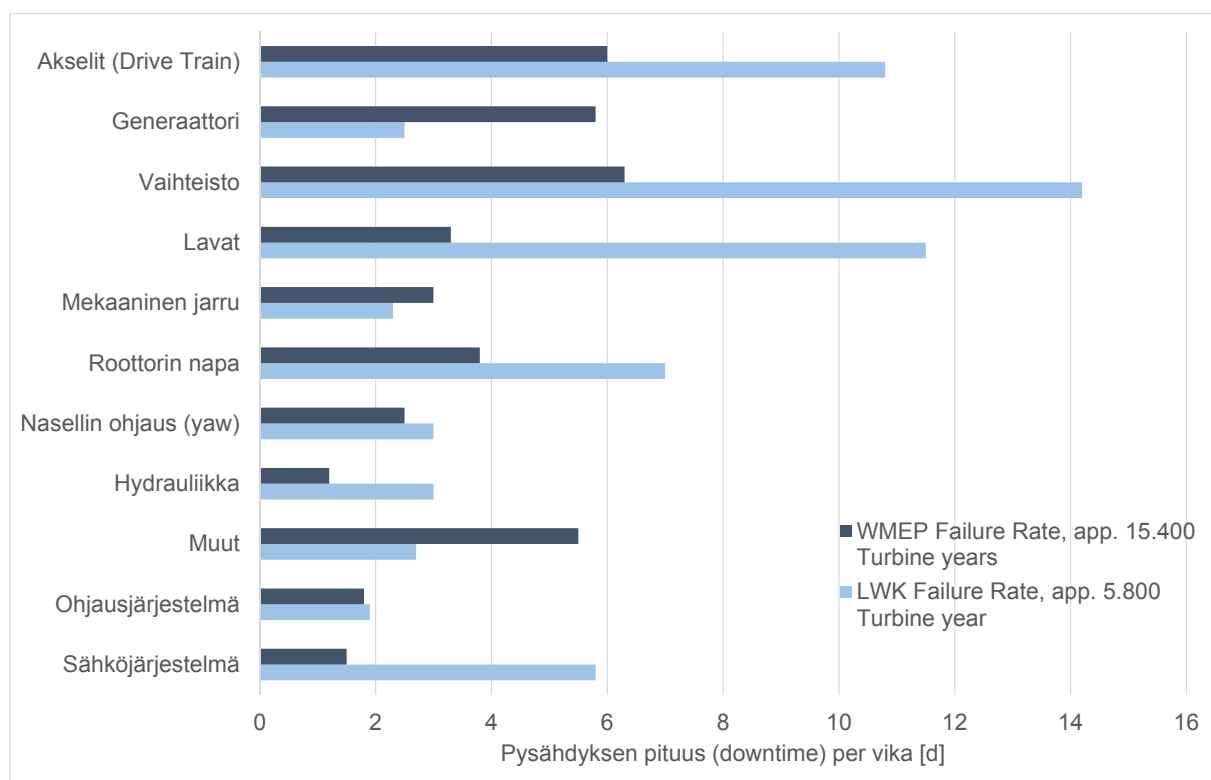
Tekninen käyttäjä vaikuttaa suoraan tuulipuiston kannattavuuteen, kun kunnospitokulut saadaan minimoitua ja tekninen käytettävyyttä maksimoitua. On hänen vastuullaan löytää taloudellisesti paras tasapaino näiden kahden tavoitteen välillä.

Huollon organisointi alkaa huolto-ohjelma jaksottamisella valmistajan ohjeiden mukaan ja sekä huolto-ohjelman puitteissa tehtävien tarkastusten sopimisesta, kuten esim. öljynäytteiden ottaminen.

Seuraava tärkeä tehtävä on vikailmoitusten ja pysäytysten analysoiminen, että voidaan laskea todellinen käytettävyyttä. Analyysissä on tärkeää eritellä jokaiseen pysäytystyyppiin kuluva aika (Taulukko 9). SCADAn automaattisesti laskema käytettävyyttä perustuu joko valmistajan oletusarvoihin tai toimitussopimuksessa sovittuun laskutapaan, jotka eivät huomioi kaikkia pysäytyksiä, kuten jäävaroitusta, huolto, yms.. Kannattavuuslaskelmissa pitää tietenkin huomioida todellinen käytettävyyttä, että kaikki tulosta pienentävät tekijät tunnetaan (esim. jäätymisaika, tai sähköverkon häiriöt).



9 Kahden ison saksalaisen tutkimuksen LWK ja WMEP tulokset vikojen arvioimisesta [25]



10 Kuuden kriittisimmän komponenttien määrittäminen [23]

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

11 Tärkeimmät vikatilat 6:sa kriittisimmässä järjestelmässä [23]

Käyttäjien tärkeä tehtävä on siis sekä pysähtymisaikojen minimointi ja jos mahdollista tiettyjen pysähdysten eliminointi, sekä samalla taata tuulivoimalan hyvä tekninen kunto.

Vikojen yleisyyden ja tuulivoimaloiden luotettavuuden tilastointi on vain osaltaan onnistunut. Yksi voi todennäköisesti alla, että valmistajat pelkäävät silmätikuksi joutumista. Kahdessa isommassa tilastoinnissa noin 10 vuotta sitten selvitettiin erilaisia syitä vikailmoituksiin ja niistä johdettujen katkojen pituudet. Nämä tutkimukset olivat 'LWK' Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (1993 - 2006) ja 'WMEP' Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Fraunhofer IWES (1989 - 2006), joista on yhteenveto taulukossa 9. Myös EU:n rahoittamassa ReliaWind projektin tavoite oli parantaa tuulivoimaloiden suunnittelua ja luotettavuutta. Projektissa analysoitiin tietokantoja, joihin oli rekisteröity tuulivoimaloiden vikoja ja vian poistoon kulunut aika. Tällä menetelmällä määriteltiin tuulivoimalaitosten herkimpiä/kriittisempiä komponentteja ja niiden aiheuttamia käyttökatoja (downtime). Katso taulukko 10.

Jotta pystyisi kehittämään strategiaa vikojen välttämiseksi, eriteltiin viisi tärkeintä vikatilaa niille kriittisille järjestelmille. Taulukko 11. Jo 90-luvun alkupuolesta asti on Allianz Technickzentrum (AZT) tutkinut pääkomponenttien vioittumisen syitä ja esimerkiksi vaihteiston ja akselin laakerien ja hampaiden vaurioiden suurin aiheuttaja (>50%) vuosina 1993-2012 oli rasitus. [15] Pohjoisen ilmastoon aiheuttamat rasitukset tulevat olemaan suurempia monestakin syystä, kuten esim. ilman tiheyden ja jäätyneen johdosta.

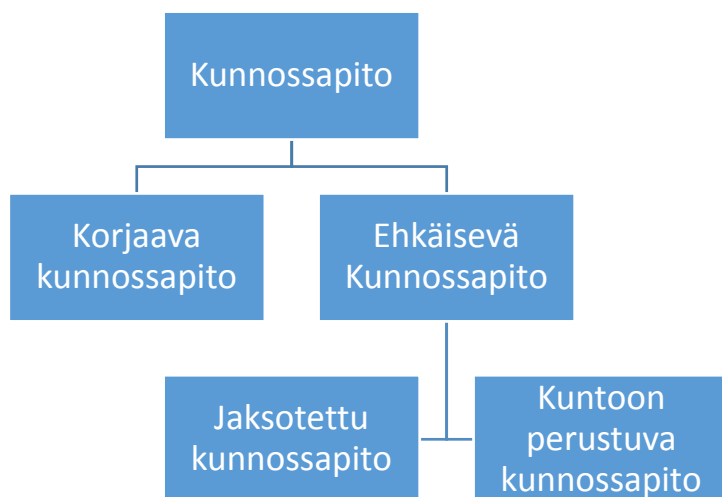
Juuri julkaistussa raportissa, joka perustuu vakuutusyhtiöiden tilastoihin, todettiin vuosittain yhden vaihdelaatikon vioittuvan 145:stä tuulivoimalaitoksesta ja korvaussumman olevan keskimäärin 200 – 300 tuhatta € [14].

Kunnossapito

Niinkuin kaikissa koneissa, tuulivoimalan osille ja kuluville osilla, sekä materiaaleilla on huolto- ja tarkastusväli, mutta silti osia rikkoontuu myös yllättäen. Kunnossapidon suurin haaste onkin logistiikka, sillä iso osa tuulivoimaloista on pitkien matkojen takana ja voimalaitoksen hissi ja nosturi asettavat myös omat rajoitteensa osien kuljetukselle ja työn nopeudelle. Suomessa on Saksaan ja keskieurooppaan verrattuna todella pitkät kulkumatkat, jota myös kuvastaa taulukko 6, jossa tuulivoiman teho suhteutetaan pinta-alaan kW/km².

Suomessa pitää vielä huomioida ilmastonasennat vaati-mukset, mikä voi rajoittaa tiettyjen korjausten tekemisen vain osaksi vuotta, tai ainakin nostaa huomattavasti korjausten kuluja, kuten esim. lämpötilan käyttö lasikuidun korjauksessa. Ankarat olosuhteet rajoittavat myös ihmisen työnte-kokyä, koska kylmässä ilmassa väsy nopeammin ja paksu vaatetus haittaa liikkumista. On hyvä järjestää huoltohenkilö-kunnalla lämmitetty taukopaikka, vaikkapa autossa. [2]

Huoltotarpeen ja käyttöiän määrittäminen kylmissä olosuhteissa on vielä kesken. Esim. VTT:n mittaukset Nordexin, Senvio-nin ja TCEn jään kerääntymisestä näyttävät, että rasitukset



kasvaisivat tornissa. Näiden rasitusten vaikutuksesta käyttöikä on silti vaikeaa tehdä päätelmiä. On myös olemassa hyvin vähän tietoa kylmän ilmassa ja jään aiheuttamasta rasituksesta eri komponentteihin. [29]

Suomen vaatimustaso on siis korkeampi eurooppalaiseen maatuulivoiman verrattuna. Tästä johtuen ehkäisevän kunnossapidon sekä hyvän suunnittelun ja organisoinnin tärkeys korostuu ja ehkäpä oppia voisi ottaa merituulivoimasta, jonka yksi päätavoitteista on vähentää huoltokerrat kahdesta yhteen vuodessa.

Vaikkakin etähuollon mahdollisuudet kasvavat kehittyvän tietokoneohjauksen ja tunnistimien tekniikan myötä, ei jaksotetusta ja korjaavasta kunnossapidosta voida luopua.

Kunnossapidon organisoinnin tavoite on, että tarvittava tietotaito on oikeassa paikassa oikeaan aikaan – ja mukana on tarvittavat työkalut ja materiaalit. Samalla pitää minimoida ajomatkat ja huomioida asiakkaan toiveet.

Jotta työtehtävät saadaan tärkeysjärjestykseen, pitää tuntea asiakkaiden vaatimukset, vikailmoitukset, tuulivoimaloiden pysäytykset ja tietenkin sääolosuhteet. Sen lisäksi pitää huomioida, että työmatkalla oleva huoltoryhmä saa tarvittavat varaosat ja materiaalit, sekä voi hankkiutua eroon kerääntyneistä jätteistä kierrätyspisteissä.

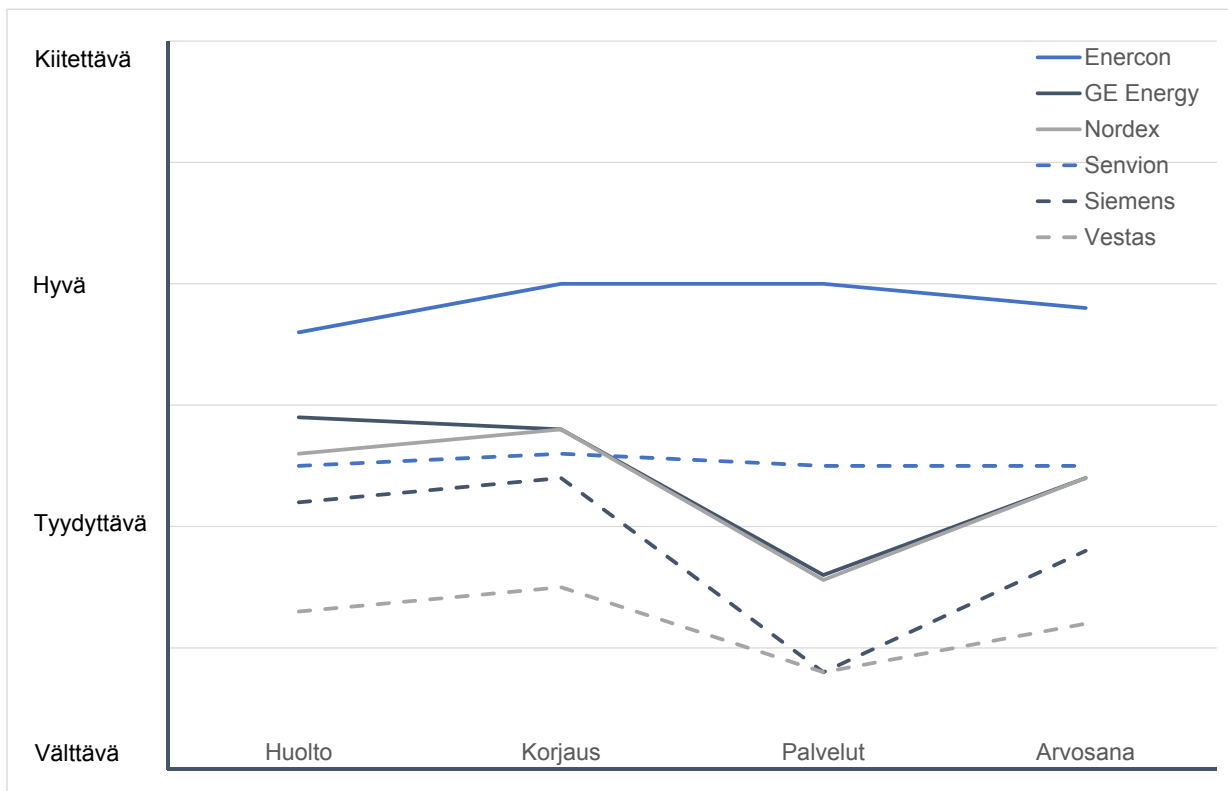
Tuulivoimalaa huolletaan tavallisesti kaksi kertaa vuodessa, joka jakautuu pinempään puolivuotis- ja isompaan vuosihuoltoon, jotka kestävät ½ - 1 ja 1 – 2 päivää riippuen tuulivoimalaitoksen mallista. Tyypillinen huoltoryhmä on kaksi henkilöä, jotka ovat yhdellä autolla liikkeellä. Autoon pitää mahtua kaikkiin suunniteltuihin huoltotoimenpiteisiin tarvittavat osat, mutta myös kuntotarkastuksen perusteella voi tulla myös akkujen, sähkömoottorien, yms. vaihtoja. On myös tärkeä osa huoltoa, että henkilökunta pysyy valppaana ja tarkastaa kaikki odottamattomat epäkohdat, kuten valumat, pintojen rikkoutumiset, outdot äänet jne.

Osien ja tarvikkeiden logistiikka riippuu osien koosta ja tarvittavasta määrästä, niitä voi olla huoltoautossa, välivarastoja tarvitaan hyvien kulkuyhteyksien päähän ja isoimmat ja harvemmit tarvittavat osat ovat joko keskusvarastossa tai ne joudutaan tilaamaan valmistajalta. Yksi vaihtoehto on myös varastoida osa C-osista tuulipuiston alueella.

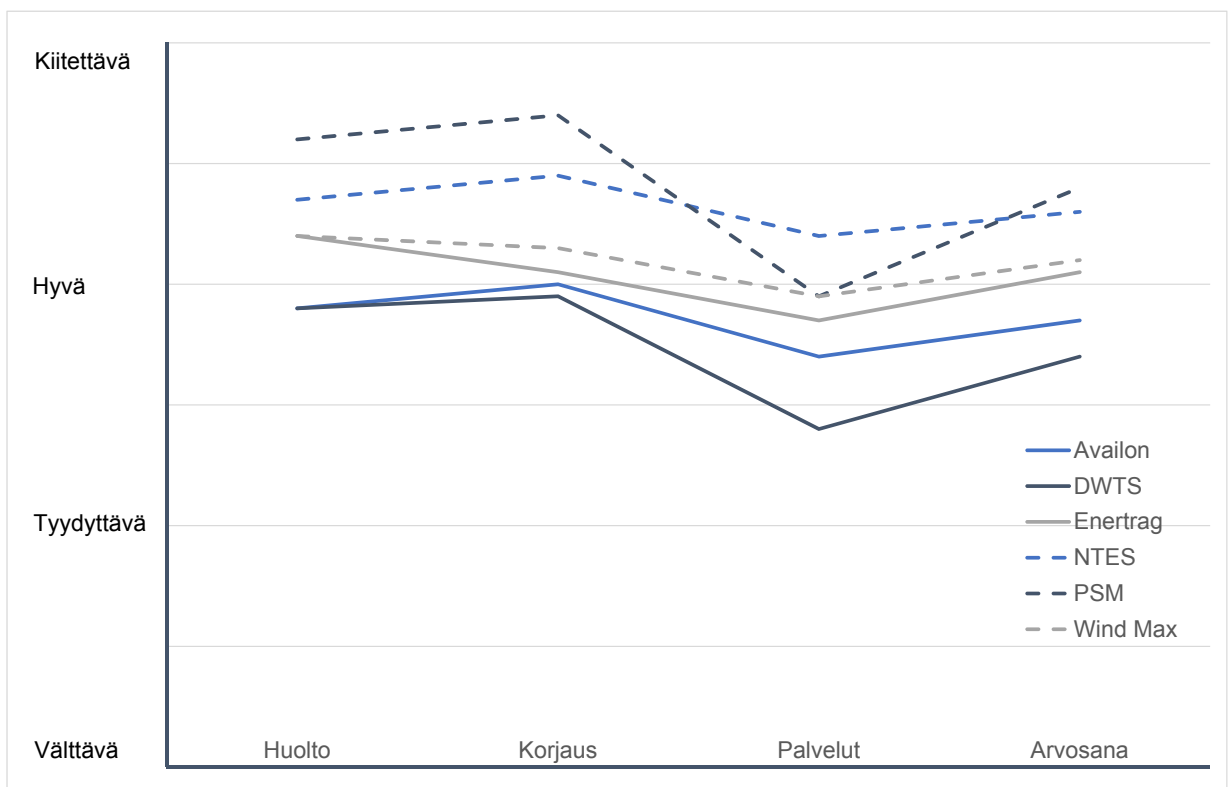
Varsinkin akkujen ja öljynvaihtojen yhteydessä pitää kuljettaa tarvittavat materiaalit huolto paikalle ja sama määrä materiaalia huollon jälkeen kierrätyspisteeseen. Öljyn vaihdot voi suorittaa esim. 20 l öljykannujen kanssa. Periaatteessa hydraulikkaöljyt pitäisi vaihtaa kahden ja vaihteistoöljyt kolmen vuoden välein. Uudella kannettavalla suodatintekniikalla voi hydraulikkaöljyn puhdistaa ja näin pidentää käyttöikää. Vaihteistoöljyn voi kytkeä kunnonvalvonnan (CMS) piiriin ja suorittaa öljyn kuntoon perustuvat vaihdot.

Kuten taulukossa 17 näkyy, niin lavat ovat kalleimpia pääkomponentteja ja niiden kunto ja suorituskyky (performance) on hyvin tärkeää koko tuulivoimalaitoksen tuotolle. Huolto toimenpiteisiin ei kuulu pelkästään lavan kulmien (pitch) tarkastaminen, vaan myös lapojen kunnon tarkastaminen. Se suoritetaan yleensä laskeutumalla köysillä alas jolloin voidaan silmämääräisesti arvioida pinnankunto, koputtelemalla löytää rakenteellisia puutteita ja samalla tarkastaa ukkosensojtimet. Jos lapoihin on asennettu lämmitys, niin sekin tulee samalla tarkastettua. Yleisenä käytäntönä on vakiintunut 2 vuoden intervalli. [3]

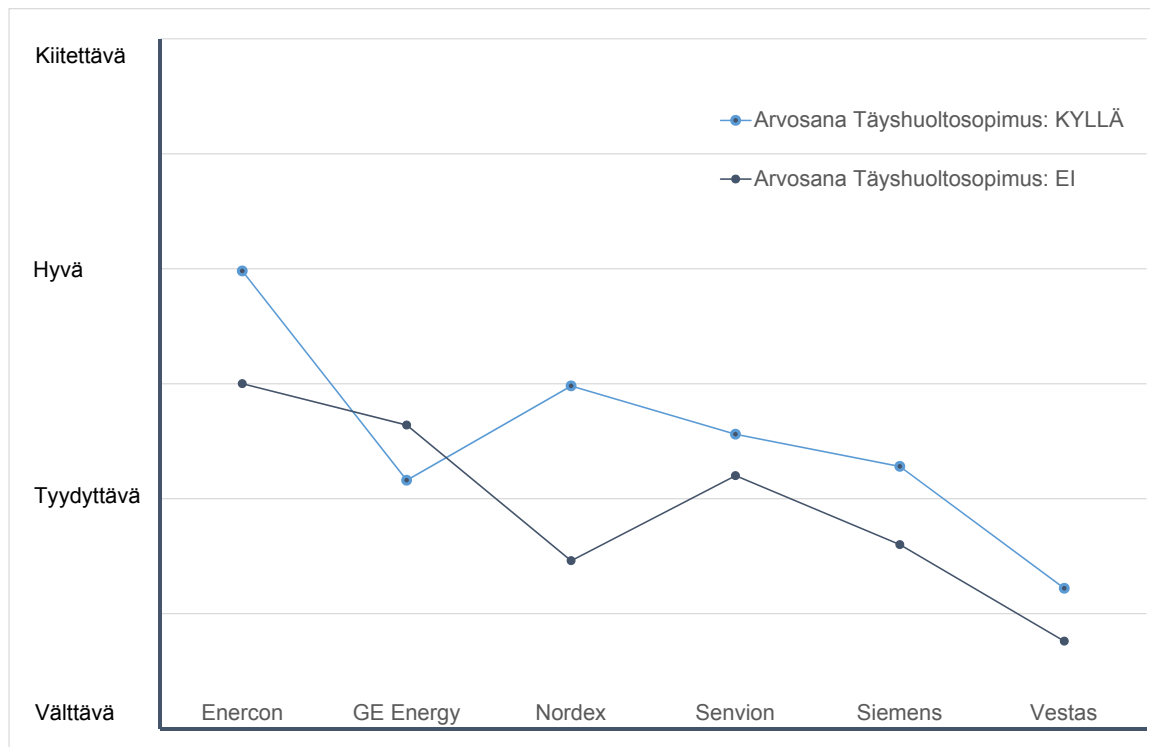
On olemassa muitakin tapoja tarkastaa lapojen kunto, kuten laser mittaus, ultraäänimittaus, lämpökamera tai kameralla varustetulla multikopterilla kuvaaminen. Varsinkin multikopterista ennustetaan kustannustehokasta tapaa tulevaisuudessa tarkastaa lapojen kunto. Tämän teknologian kehitys on kuitenkin vasta alkusuoralla ja tiettyjä vikoja voi havaita luotettavasti vain laskeutumalla lapaa pitkin. Tärkeitä osa-alueita ovatkin automaattisen kuvantunnistuksen ja palvelujen kehittäminen. [4]



13 Huoltosopimus valmistajan kanssa [8]



14 Huoltosopimus huoltoyrityksen kanssa [8]



15 Vertailu valmistajan huolto- ja täyshuoltosopimus [8]

On huomioitava, että Suomessa rakennettavat tuulivoimalat ovat cold climate – malleja, mikä asettaa omat vaatimuksensa huoltotoimenpiteille. Valmistajalta on jokaiselle tuulivoimalatyypille ja kaikille sen osille jaksotettuun kunnossapitoon perustuva huolto tai tarkastussuunnitelma, mitä pitää noudattaa. Osan järjestelmistä voi kuitenkin ottaa kunnonvalvonnan piiriin.

Saksan tuulivoimayhdiyitys on jo 15. kerran mitannut käyttöpäälliköiden tyytyväisyyden huolto- ja korjaustoimintaan. Kysely jakautuu valmistajiin ja huoltoyrityksiin, sekä huoltosopimuksiin yksittäisillä toimeksiannoilla ja täyshuoltoon.

Huollosta (Wartung) arvosteltiin luotettavuus, laatu, dokumentointi ja hinta-/laatusuhde. Korjauksista (Reparatur) arviotiin lisäksi tavoitettavuus, reaktioaika käytönkannalta välttämättömistä osista, sekä muista osista. Palvelun (Service) taso mitattiin ilman toimenpitoa suoritetuista parantavista korjauksista, sekä maksuttomat (ex gratia) työt.

Niinkuin taulukoista 13 ja 14 voi verrata, niin huoltoyritykset ovat saaneet huomattavasti paremmat arvostelut kuin valmistajien tarjoamat palvelut. Ja perinteisesti Enercon on pitänyt ylivoimaista kärkipaikkaa muihin valmistajiin verrattuna.

Sopimustyyppien välisessä vertailussa olivat täyshuoltosopimuksen tehneet huomattavasti tyytyväisempiä, kuin pelkä huoltosopimuksen tehneet. Sama sääntö päti myös huoltoyritysten välisessä vertailussa.

Kuntoon perustuva kunnossapito

Komponenttien kuntoa seurataan säännöllisin välein tai ko-koajan ja kaikki havainnot dokumentoidaan. Mahdollisista muutoksista voidaan päätellä tämän hetken kunto. Kunnon voi määritellä monella eri tapaa, kuten silmäämääräisesti (lavat, saumat, yms.), laboratoriossa (öljynäytteet), lämpökameralla (vaihteisto) tarkastusten yhteydessä. Tätä kutsutaan myös Offline Condition Monitoring. [12] Vuotuisen pää-tarkastuksen aikana voidaan jo ennalta havaita esimerkiksi vaihteiston normaalista poikkeava kuluminen. Mutta jos toleranssit ylittyy juuri niiden tarkastusten välisenä aikana, voi rikkoutuminen tullakin yllätyksenä. [20]

Lähtökohta kuntoon perustuvassa kunnossapidossa on kunnossapitostrategian optimoiminen: pidentää kuluvien osien ja öljyjen käyttöikää, mutta toisaalta pystyä aina reagoimaan hyvissä ajoin, ennen kuin viat alkavat verottamaan voimalaitoksen tuottoa. Parhaimmassa tapauksessa ehditään varaosat tilaamaan ajoissa ja suunnittelemaan korjaus etukäteen. [20]

Tarkastuskäyntien määrää on vaikeaa lisätä, koska pitkien ajomatkojen takia kustannukset karkaavat käsistä. Tiettyjen komponenttien kuntoa voidaan valvoa sensoreiden avulla. Kun valvotaan akselien, vaihteiston ja generaattorin (drivetrain) kuntoa, niin puhutaan online Condition Monitoring Systemistä (CMS) ja kun valvotaan rakenteita, kuten tornia tai lapoja, niin puhutaan Structural Health Monitoringista (SHM). [12] Kaikkein parhain tulos saavutetaan, kun kerä-

tään automaattisesti normitettua dataa suuresta määrästä tuulivoimaloita. [20]

Kun CMS havaitsee epätasapainoja järjestelmässä, niin voidaan ennalta ehkäisevillä toimenpiteillä estää suuremman vahingon syntyminen ja näin huomattavasti pienentää korjauskuluja. Samalla tätä tietoa voi käyttää huolto-ohjelman suunnittelussa.

Suurin haaste tuulivoimaloissa on tuulenmukaan muuttuva tuotantoteho, mistä johtuen voimalaitoksen rasitus muuttuu koko ajan, mikä vaikeuttaa huomattavasti referenssiarvoihin vertaamista ja vaatii käyttäjältä laajaa kokemuspohjaa. [12]

Suurin osa Euroopassa rakennetuista useamman MW tehoisista voimaloista on varustettu CMS-järjestelmällä. Suurin osa tutkimuksista on tullut myönteiseen tulokseen SHM- ja CMS-järjestelmien kustannustehokkuutta arvioidessa. [12]

Niin kuin taulukoissa 10 ja 11 todetaan, on laipojen kääntöjärjestelmän häiriöt yksi kiusallisimmista vioista, joka aiheuttaa pitkiä pysäytyksiä. Sähköisen järjestelmän heikoin lenkki on akkujen rikkoutuminen (taulukko 11). Akkujen kuntoa voi esimerkiksi valvoa Battery Performance Monitoring Moduulilla (BPMM), joka mittaa tietyin aikavälein akun jännitteen, vastuksen ja määrittää akun kunnon (State of Health – SOH). Nämä tiedot voidaan välittää scadan kautta käyttäjälle, joka voi näiden tietojen avulla suunnitella sopivan ajankohdan akkujen uusimiselle. [19]

Looginen lähestymistapa kuntoon perustuvassa priorisoinnissa ja pitää myös tuntea komponentit, joita ei saada kunnon valvontaan:

- Minkä pitää aina toimia ja mikä tekninen käytettävyyks on tämänhetkinen tavoite ?
- Mikä voi vähentää teknistä käytettävyyttä ?
- Mikä aiheuttaa kunkin vian tai häiriön ?
- Mitä tapahtuu vian ilmetessä (Scada) ?

- Mitä seurauksia siitä viasta on ?

- Miten tämä vika voidaan estää (jaksotettu / kuntoon perustuva) ?

- Mitä pitäisi tehdä, jos ehkäisevää kunnossapitoa ei voi soveltaa ?[1]

Kunnossapidon ajoneuvoja

Merkittäviä eroja Saksaan nähden ovat ajomatkat, teiden kunto ja huoltopisteiden (varastot / jätteenhuolto) vähyys. Kun yksi päivän pää tavoitteista on, että huolto pitää saada tehtyä loppuun asti, niin silloin ei öljyt tai pienetkään varaosat saa loppua kesken. Varsinkin kun pitää varautua yllätyksiin ja suunnittelemttomiin töihin.

Yksi mahdollisuus olisi, että on liikkeellä suuremmalla huototiimillä, jolloin käytössä voisi olla kaksi autoa. Varsinkin merituulivoimassa suunnitellaan isompien tiimien käyttöä, koska yksi kuljetus on niin kallis. Om myös mahdollista varastoita kaikkien yksinkertaisimmat tarvikkeet, kuten lamput, yms. tuulipuiston alueelle. Perävaunun käyttöä kannattaa myös harkita, niin silloin suurempi varasto liikkuu mukana ja sen voi pysäköidä sopivalle etäisyydelle vartioidulle pysäköinti-alueelle tai tuulipuiston alueelle.

Huoltotöihin voidaan käyttää myös erikoisajoneuvoja, kuten öljynvaihtojoneuvo. Kuvan 18 ajoneuvo pystyy kuljetamaan 10 tn uutta öljyä ja 5 tn jätteenöljyä jotka varastoidaan erikseen neljään säiliöön. Se on varustettu 120 m pitkällä letkuilla, sekä öljyn esilämmityksellä (30°C) ja pumpuilla. Öljynvaihto kestää noin 3 h riippuen voimalaitoksen öljyn määrästä, sekä suodattien vaihdosta ja mahdollisesta öljynhuuhtelusta. Öljynvaihdon hintahaarukka on 3 – 5 tuhatta €. Öljynvaihtoauto maksaa yli ¼ miljoonaa euroa, riippuen koosta ja varustuksesta. [www.ammenn-wks.de]





16 Ford-Transit muunnettuna tuulivoiman huoltoajoneuvoksi. Hinta ilman invertteriä/muuntajaa (kaapelit esiasennettu) n. 8.700€ [www.fahrzeugbau-duelmer.de]



17 vas. VW T5/T6 muunnettuna tuulivoiman huoltoajoneuvoksi. Hinta ilman invertteriä/muuntajaa n. 7.800€ ja oikea kuorma-auton pohjalle rakennettu huoltoajoneuvo [www.fahrzeugbau-duelmer.de]



18 Öljynvaihtoajoneuvo [www.ammenn-wks.de]

Kustannukset ja sopimukset

Tuulivoiman kunnossapidon kustannukset

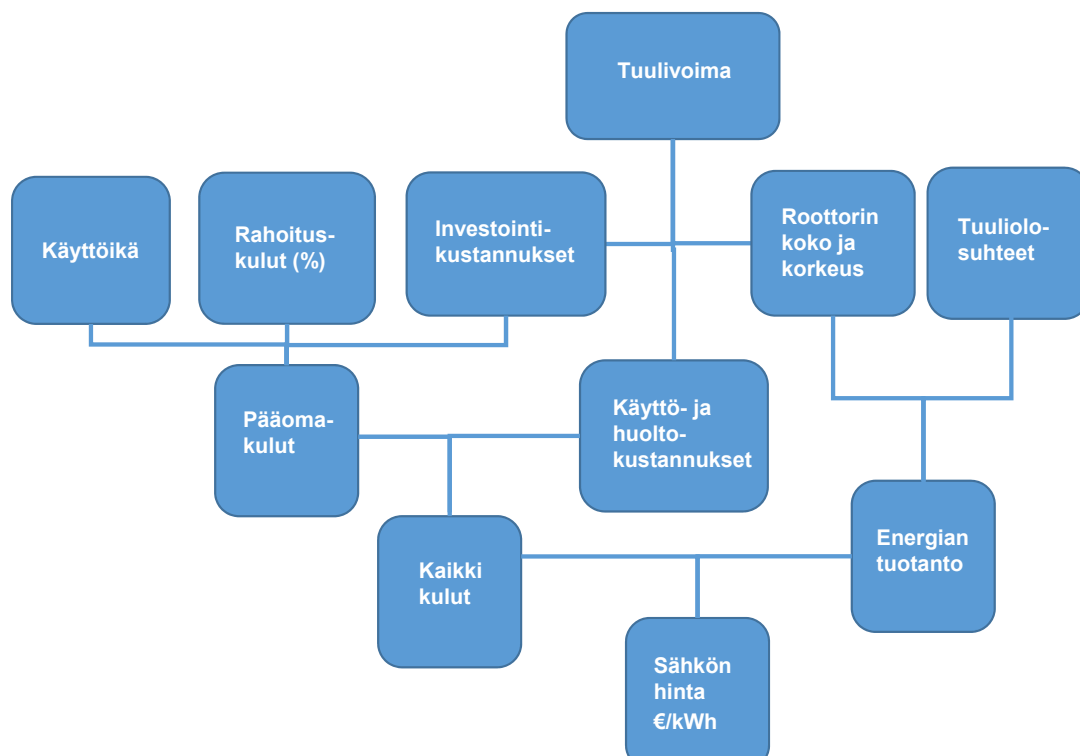
Tuulivoiman käyttökustannuksiin OPEX lasketaan vakuutukset, vuokrat, tekninen ja kaupallinen valvonta, sekä tietenkin huollot ja korjaukset, joiden osuus on noin 44% - 55% kaikista käyttökuluista, joka riippuu tuulivoimalan käyttöiästä. Myös Saksassa OPEX kulut ovat laskeneet ja vuotuiset kulut (€ / kW-vuosi) ovat €57.6/kW vuonna 2008, €57.2/kW vuonna 2010 ja €55.9/kW vuonna 2012. Vuonna 2012 suurin osa projekteista solmi valmistajan tarjoaman täyshuoltosopimuksen (98% 59. projektista). [28]

Taulukkoon 16 on kerätty kaikki tuulipuistoon liittyvät kulut ja OPEX kulujen osuus laskettiin olevan (kysely seitsemässä maassa) 11% ja 30% välillä kaikista maatuulisähkön liittyvistä kuluista (LCOE). [18]

Takuuajan ja täyshuoltosopimuksen loppuminen, käyttöajan pidennys

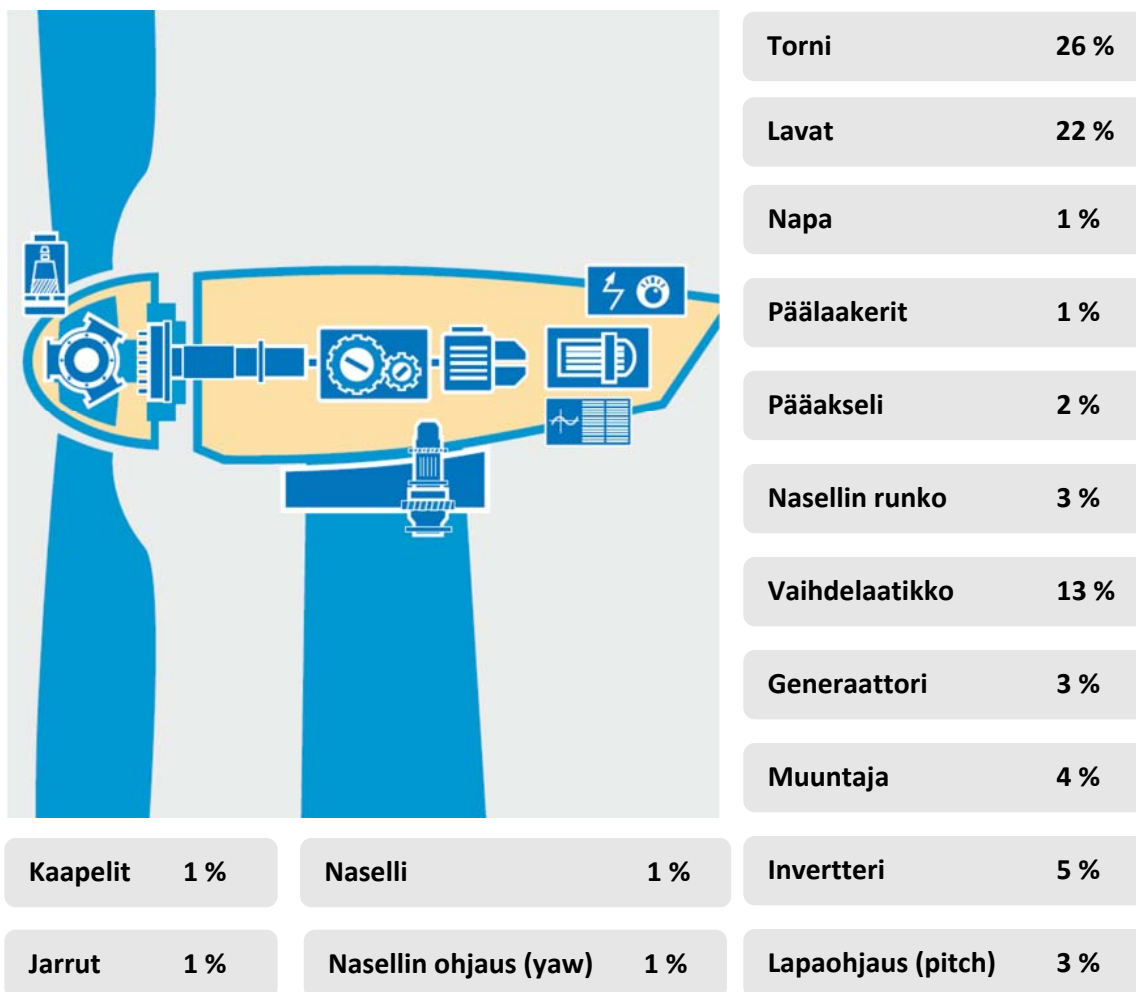
Käyttöajan aikana vastuu ja/tai omistussuhteet voivat muuttua, eikä kukaan halua "ostaa sikaa säkissä". Vastuiden siirtymistä tapahtuu, kun esim. Takuu loppuu ja/tai (täys)huoltosopimus loppuu. Voi myös olla, että tuulipuisto myydään. Myös voimalaitoksen viisi siimeistä käyttövuotta ovat tärkeitä: halutaanko hakea vielä käyttöluvalle jatkoaikaa? Mitä ja miten pitää huoltaa ja korjata, että voimalaitos toimii myös kolmannella vuosikymmenellä luotettavasti ja pystyy takaamaan tuottavuuden.

Niinkuin henkilöautoissa, pätee myös tuulivoimaloissa, että kun kaikki valmistajan määräämät ja suosittelemat huollot ja korjaukset on tehty ja dokumentoitu, niin silloin on vähimmäisvaatimukset täytetty. On kuitenkin niin, että sekä rakenteet, että komponentit ovat jatkuvasti kovassa rasituksessa, eikä tehdyt huollot vielä anna tädellistä kuvaa kulumisesta, korroosiosta, yms.



Tyypillisessä tuulivoimalassa on yli 8.000 komponenttia.

Komponenttien osuus hinnasta on selvitetty Repower MM92 pohjalta.



20 Tuulivoimalan osien kustannukset [18]

Yleinen käytäntö on, että tuulivoimaloiden kunnonarvioimiseen erikoistunut yritys tulee paikanpäällä tarkastamaan voimalaioksen kunnon. Hän voi kuitenkin vain arvioida sen hetkellisen kunnon tekemänsä tarkastuksen perusteella.

Vielä paremman pohjan kunnosta ja kulumisesta antaisi koko käyttöiän pituinen dokumentointi CMS ja SHM-järjestelmissä. Koska takuun umpeutuessa ja Täyshuoltosopimuksen loppuessa siirtyy vastuu valmistajalta omistajalle, niin on perampä, kun tiedot ja tietokannat olisivat puolueettomalla kunnon monitorointiin erikoistuneella taholla.

Valmistajat eivät yleensä kovinkaan avokätisesti jakele tietoa ja dokumentteja ja siitä syystä pitäisi jo ostovaiheessa sopia täydellisestä tiedon, tietokantojen ja dokumenttien luovutukselta omistajalle.

Huoltopalvelut ja sopimukset

On tärkeää tehdä huoltosopimuksessa selkeä rajausta ulkoisten voimien (salama, yms.) ja huoltoyhtiön vastuun välillä. Pahinta molemmille sopimusosapuolille on riitelemisen sopimuksen sisällöstä sillä hetkellä, kun pitäisi nopeasti korjata tuulivoimala. Koska tuulivoimaloissa on monenlaista tekniikkaa, joihin tarvitaan erikoispätevyyksiä ja jotka ovat eri normien piirissä, kuten esim. hissit, sammutuslaitteet, nosturit ja toisaalta taas sähköntuottoon liittyvät osat, niin on olemassa kaksi lähestymistapaa.

Voidaan tehdä täyshuoltosopimus. Isommat ja kokeneemat energiyhtiöt Saksassa jakavat kuitenkin hyvinkin erilaiset vastuualueet erillisiin huoltopaketteihin ja etsivät kuhunkin tehtävään erikoistuneita yrityksiä [11].

Hyvässä sopimuksessa sovitaan vastuun kanto sille, kenelle se kuuluu. Esimerkiksi nämä tärkeät kohdat pitäisi sopimuksessa huomioida:

- Rajaus vakuutuksen; mitkä vahingot pitää vakuuttaa (Salamala, yms.)
- Mitkä komponentin kuuluu huollen piiriin (perustukset, torni jne.)
- Minkälainen huolto (aina uusia varaosia joilla on takuu, korjaus, jne.)
- Kuka on vastuussa varaosien varastoinnista
- Varastoidaan pääkomponentteja
- Kuka tekee turvatarkastukset
- Kuinka nopeasti huolto tulee paikalle
- Osille taattu käytettävyys
- Miten käytettävyys on määritelty?
- Kunnon seuraaminen / Tuulivoimalaitoksen kunnon määrittäminen
- Vakuussummat, jotka vastaavat riskejä [26]

Erittäin hyvä huoltotoiminta ei ole pelkästään nopeaa reagoimista asiakkaan pyyntöihin, vaan pitää pystyä pitämään hyvä huoli asiakkaan omaisuudesta ja kehittää yhdessä asiakkaan kanssa tämän omaisuuden tuottomahdollisuuksia [24].

References

- [1] Andrawus, J., Watson, J., Kishk, M., and Adam, A. 2006. The Selection of a Suitable Maintenance Strategy for Wind Turbines. *Wind Engineering* 30, 6, 471–486.
- [2] Barin-Gould, I., Cattin, R., Durstewitz, M., Hulkkonen, M., Krenn, A., Laakso, T., Lacroix, A., Peltola, E., Ronsten, G., Tallhaug, L., and Wallenius, T. 05 2012. 13. *Wind Energy Projects in Cold Climates. 1 Edition 2011*. iea wind.
- [3] Brassel, S. 2015. Technische Betriebsführung- Instandhaltung Rotorblatt. *Windindustrie in Deutschland*.
- [4] Broehl, J. and Asmus, P. 2015. *Drones for Wind Turbine Inspection. Unmanned Aerial Vehicles and Inspection Services for Wind Turbines: Global Market Assessment and Forecasts*. Navigant Research.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 08 2015. *Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2014*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 11, 2015. *Die Energie der Zukunft. Vierter Monitoring-Bericht Energiewende*.
- [7] Bundesumweltministerium (BMU), w. 2012. *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*.
- [8] Bundesverband Windenergie. 6 2015. 15. *BWE-Umfrage "Servicezufriedenheit"*. Servicezufriedenheit 15. Bundesverband Windenergie.
- [9] Dehnen, N., Mattes, A., and Traber, T. 2015. *Die Beschäftigungseffekte der Energiewende*. DIW Econ GmbH; Bundesverband Windenergie.
- [10] Deutscher Städte- und Gemeindebund. 09, 2012. *Kommunale Handlungsmöglichkeiten beim Ausbau der Windenergie – unter besonderer Berücksichtigung des Repowering*.
- [11] e.on. 09 2013. *E.ON Wind Turbine Technology and Operations Factbook*. e.on, www.eon.com.
- [12] Fischer, K. and Coronado, D. 2015. Condition monitoring of Wind turbines: State of the art, user experience and recommendations. VGB Research Project 383. *VGB PowerTech*, 7.
- [13] Fraunhofer IWES. 2014. *WIND ENERGY REPORT GERMANY 2014*.
- [14] GCube. *WEU Onshore Asset Optimazation & Reliability Benchmarking Report 2015*. GCube.
- [15] Gellermann, T. and Griggel, T. 2012. Schäden an Antriebssträngen von Windenergieanlagen. *VGB PowerTech*, 7.
- [16] Hau, E., Ed. 2008. *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Springer, Berlin.
- [17] Hirschl, B., Böther, T., Schröder, A., and Heinbach, K. 2010. *Wertschöpfung und Beschäftigung durch Windenergie in Baden-Württemberg in den Jahren 2010 und 2020*. Greenpeace e.V.
- [18] IRENA. 2012. *Renewable Energy Cost Analysis: Wind Power. IRENA Working Paper*. IRENA.
- [19] Jungermann, H. and Wahlers, G. 2015. Optimierungspotenziale in der Rotorblattnabe - Batterie-Management für WEA vermeiden unerwartete Ausfälle, Ressourcenverschwendung und Kapitalbindung. *VGB PowerTech*, 7.
- [20] Kerres, B., Fischer, K., and Madlener, R. Economic Evaluation of Maintenance Strategies for Wind Turbines: A Stochastic Analysis. FCN_WP03_2014.
- [21] Milborrow, D. 2013. Turbine advances cut O&M costs. *Wind Power Monthly*, 6.
- [22] O'Sullivan, M., Edler, D., Bickel, P., Lehr, U., Peter, F., and Sakowski, F. 05 2014. *Beschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland: Ausbau und Betrieb. heute und morgen, dritter Bericht zur Bruttobeschäftigung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

- [23] Reliawind. 2011. *Reliability-focused research on optimizing Wind Energy system design, operation and maintenance: Tools, proof of concepts, guidelines & methodologies for a new generation. Final Report*. Reliawind; European Commission.
- [24] Schulze Südhoff, U. 2012. Customer-oriented service as a value contributor for wind turbine operators. *VGB PowerTech*, 7.
- [25] Shuangwen (Shawn) Sheng; NREL. 06 2013. *Report on Wind Turbine Subsystem Reliability(Presentation). A Survey of Various Databases*. National Renewable Energy Laboratory.
- [26] Thüring, H. 2012. *Windenergie Service. Wartung & Instandhaltung*. BWE-Marktübersicht Spezial. Bundesverb. WindEnergie, Berlin.
- [27] trend:research and Leuphana Universität Lüneburg. 2013. *Definition und Marktanalyse von Buergerenergie in Deutschland*. trend:research; Leuphana Universität Lüneburg, Bremen, Lüneburg.
- [28] Vitina, A., Lüers, S., Wallasch, A.-K., Berkhout, V., Duffy, A., Cleary, B., Husabø, L. I., Weir, D. E., Lacal-Arántegui, R., Hand, M. M., Lantz, E., Belyeu, K., Wiser, R., Bolinger, M., and Hoen, B. 06 2015. *IEA Wind Task 26: Wind Technology, Cost, and Performance Trends in Denmark, Germany, Ireland, Norway, the European Union, and the United States: 2007–2012*. iea wind.
- [29] Wadham-Gagnon, M. 2014. *Quebec's Wind Energy industry's concerns and initiatives relative to Cold Climate*. Wind Turbine Optimization, Maintenance and Repair Summit, Toronto.

