

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Jukka Rinta-Luoma

**PAIKALLISEN TUULIVOIMATUOTANNON TEKNISIÄ  
JA TALOUDELLISIA NÄKÖKOHTIA**

**Tapaustutkimus: Ilvesjoen energiakylä**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 6.3.2015

Työn valvoja

Prof. Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

TkL Lauri Kumpulainen

Työn tarkastaja

Prof. Timo Vekara

## ALKULAUSE

Ensimmäiseksi haluan kiittää Levón-instituutin projektipäällikkö Ari Haapasta mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta. Työ on kokonaisuudessaan ollut ainutlaatuinen mahdollisuus oppia uutta ja samalla päästä yhdistämään opiskeluissani saatua kokemusta ja innostustani uusiutuvaa energiaa kohtaan. Kiitos myös kaikille tuulivoima-alan osaajille, jotka ovat olleet mukana työssäni ja tarjonneet tietämystään aina yhtä avoimesti.

Erityiskiitoksen haluan osoittaa työni ohjaajalle projektitutkija Lauri Kumpulaiselle hyvästä ohjauksesta sekä positiivisen työilmapiirin luomisesta. Työni valvojaa professori Kimmo Kauhaniemeä haluan kiittää asiantuntevista neuvoista. Lisäksi haluan kiittää työni tarkastajaa professori Timo Vekaraa, sekä tutkijakollegoita positiivisesta asenteesta ja auttamisesta kaikissa kysymyksissä.

Koko opiskelujeni ajalta haluan kiittää perhettäni loppumattomasta tuesta. Opiskelutovereita, tai paremminkin ystäviä, haluan kiittää ikimuistoisista kokemuksista ja yhdessä tekemisestä. Tämän yhteistyön ansiosta yksikään tentti tai harkkatyö ei tuntunut mahdolltomalta!

Vaasassa 6.3.2015

Jukka Rinta-Luoma

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	1
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	6
ABSTRACT	7
1 JOHDANTO	8
2 PAIKALLISEN TUULIVOIMATUOTANNON HYÖDYNTÄMINEN	11
2.1 Tilastot	11
2.2 Tuuliolot	14
2.2.1 Suomen Tuuliatlas	15
2.2.2 Tuulimittaukset	16
2.3 Tuulivoiman kannattavuus	18
2.3.1 Tukijärjestelmät	20
2.3.2 Kannattavuuslaskelmat	22
2.3.3 Käytetyn tuulivoimalan hankinta	25
2.3.4 Pientuulivoima	26
2.4 Lainsäädäntö ja määräykset	28
2.4.1 Lupamenettelyt	29
2.4.2 Verkkoonliityntämääräykset	30
2.4.3 Tuulivoimatuotannon verotus	32
2.5 Omistussuhteet	34
2.6 Tuulivoiman paikalliset vaikutukset	36
2.6.1 Vaikutus aluetalouteen	36
2.6.2 Ympäristövaikutukset	39
2.6.3 Sosiaaliset vaikutukset	42
2.7 Tuulivoiman yleinen hyväksyttävyyys	44
3 TUULIVOIMATEKNIikka	46
3.1 Tuulivoimalatyypit	46
3.1.1 Suoraan verkkoon kytketty epätahtigeneraattori	47
3.1.2 Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori	48
3.1.3 Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tahtigeneraattori	49
3.2 Tuulivoimala sähköverkossa	50
3.2.1 Hajautetun tuotannon verkkovaikutukset	50
3.2.2 Suojausperiaatteet	51
4 TAPAUSTUTKIMUS: ILVESJOEN ENERGIAKYLÄ	55
4.1 Kylän perustiedot	55
4.2 Energiantuotantopotentiaali	56
4.3 Ilvesjoen tuulivoimalat	58

4.4	Verkon tutkiminen simuloitien avulla	60
4.4.1	Verkon oikosulkuteho	65
4.4.2	Voimaloiden irtoaminen verkosta	66
4.4.3	Jännitteen kohoaminen	68
4.5	Energiaomavaraisuuden kehittämismahdollisuudet	70
5	KOKEMUKSIA YKSITTÄISISTÄ TUULIVOIMALOISTA	73
5.1	Tapaus Väkiparta, Eurajoki	73
5.2	Tapaus Riiho, Tuuri	74
5.3	Tapaus Hautala, Ilmajoki	76
5.4	Tapaus Pettumäen Mylly Oy, Teuva	77
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	79
7	YHTEENVETO	81
	LIITTEET	91

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Symbolit*

$k_1$	Velanderin kerroin 1
$k_2$	Velanderin kerroin 2
$I_k$	Oikosulkuvirta
$P_{\max}$	Maksimipätöteho
$S_{\text{gen}}$	Generaattorin näennäisteho
$S_k$	Oikosulkuteho
$U$	Pääjännite
$W$	Vuosienergia

*Lyhenteet*

DFIG	Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori (Doubly Fed Induction Generator)
ELY	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
EWEA	European Wind Energy Association
gCO <sub>2</sub> eq	Hiilidioksidiekvivalenttigramma
GWEA	German Wind Energy Association
htv	Henkilötyövuosi (kokoaikaisen henkilön työpanos vuodessa)
LIDAR	Light Detection And Ranging
LOM	Saarekekäytön estosuojaus (Loss of mains protection)
MRL	Maankäyttö- ja rakennuslaki
PJK	Pikajälleenkytkentä
PMSG	Kestomagneettitahtigeneraattori (Permanent Magnet Synchronous Generator)
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
SCIG	Epätahtigeneraattori (Squirrel Cage Induction Generator)
SLC	Ruotsin maataloustuottajain keskusliitto (Svenska lantbruksproducenternas centralförbund r.f.)
SODAR	Sound Detection And Ranging

STY	Suomen Tuulivoimayhdistys ry
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
TLE	Tuotannon liittämisehdot
VPE	Verkkopalveluehdot
WRSG	Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori (Wound Rotor Synchronous Generator)
VTT	Teknologian tutkimuskeskus
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset
WWEA	World Wind Energy Association
YVA	Ympäristövaikutusten arviointimenettely

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta****Tekijä:**

Jukka Rinta-Luoma

**Diplomityön nimi:**

Paikallisen tuulivoimatuotannon teknisiä ja taloudellisia näkökohtia. Tapaustutkimus: Ilvesjoen energiakylä

**Valvoja:**

Professori Kimmo Kauhaniemi

**Ohjaaja:**

TkL Lauri Kumpulainen

**Tarkastaja:**

Professori Timo Vekara

**Tutkinto:**

Diplomi-insinööri

**Oppiaine:**

Sähkötekniikka

**Opintojen aloitusvuosi:**

2010

**Diplomityön valmistumisvuosi:**

2015

**Sivumäärä: 92**

---

**TIIVISTELMÄ**

Tuulivoiman rakentaminen Suomessa on lähtenyt kiivaaseen kasvuun 2010-luvun alkupuolella valtion uusiutuvan energian lisäämistavoitteiden vauhdittamana. Lisääntyvä tuulivoima tuo mukanaan uusia haasteita niin sähköverkoille kuin niiden suojauksellekin. Valtion maksama takuuhinta on saanut suuren joukon yrityksiä suunnittelemaan suuria tuulipuistoja eri puolille Suomea, mikä usein aiheuttaa huolta paikallisissa asukkaissa ja hankkeet joutuvat helposti vastatuuleen. Paikallisten ihmisten osallistaminen hankkeisiin onkin tärkeässä roolissa tuulivoiman yleisen hyväksynnän saavuttamisessa.

Diplomityön tavoitteena oli perehtyä yksittäisten jakeluverkkoon kytkettävien tuulivoimaloiden vaikutuksiin sähköverkossa, sekä tuulivoimaloiden hankintaan ja käyttöön liittyviin seikkoihin. Yksittäisten tuulivoimaloiden kannattavuutta ja paikallisia vaikutuksia tarkasteltiin Suomesta saatujen kokemusten ja esimerkkitapausten, erityisesti käytettyinä hankittujen voimaloiden, avulla. Tuulivoimatuotannon yleiseen hyväksyttävyyteen vaikuttavia tekijöitä pohdittiin voimaloiden aluetalouden ja paikallisten vaikutusten näkökulmista. Tapaustutkimuskohteena tarkasteltiin Jalasjärven kunnassa sijaitsevaa Ilvesjoen kylää, jossa on omaa tuulivoimatuotantoa. Verkkoon liitynnän haasteita tarkasteltiin PSCAD-simuloinneilla, joilla mallinnettiin Ilvesjoen jakeluverkon toimintaa. Samalla perehdyttiin tuulivoimalan omistajan kannalta tärkeisiin verkkoon liitynnän määräyksiin. Lisäksi työssä esitellään hankkeen puitteissa tehty selvitys Ilvesjoen energiantuotantopotentiaalista.

Tuulivoimaloiden kannattavuuden osalta havaittiin, että käytetyn voimalan hankkimisella voidaan päästä lyhyeen takaisinmaksu-aikaan, kun tuotannolla katetaan omaa kulu-tusta. Uudella voimalalla taas on merkittäviä aluetaloudellisia vaikutuksia, koska siitä hyötyvät omistajan lisäksi sekä maanomistajat että kunta. Verkkosimulointien tuloksina havaittiin, että tarkastellussa verkossa tuulivoimaloiden vaikutukset verkkoon jäävät äkillisissä pysäytys- ja häiriötilanteissakin pieniksi. Nykyisellään verkon vahvuus ei kuitenkaan riittäisi uusien voimaloiden rakentamiseen sähkönlaatua vaarantamatta.

---

**AVAINSANAT:** Tuulivoima, verkkoliityntä, kannattavuus, energiaomavaraisuus, PSCAD

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology**

**Author:** Jukka Rinta-Luoma  
**Topic of the Thesis:** Technical and economic aspects of local wind power generation. Case Ilvesjoki energy village  
**Supervisor:** Professor Kimmo Kauhaniemi  
**Instructor:** Lic.Sc. tech. Lauri Kumpulainen  
**Evaluator:** Professor Timo Vekara  
**Degree:** Master of Science in Technology  
**Major of Subject:** Electrical Engineering  
**Year of Entering the University:** 2010  
**Year of Completing the Thesis:** 2015

**Pages: 92**

---

**ABSTRACT**

Rapid growth of Finnish wind power capacity started in the beginning of this decade after the state's new goals for renewable energy were announced. Increasing wind power poses new challenges for the power grid and its protection alike. State subsidies for wind power have attracted many companies to start planning vast wind parks across the country, which often concerns the local people and causes opposition against the projects. However, the acceptance of wind power can be increased by involving the local people and distributing profits derived from the wind energy with the locals.

The aim of this thesis was to study distribution network, profitability and local effects of single wind turbines. The study of wind power's profitability and local effects are based on the experiences gained around Finland for both newly developed and used turbines. Local acceptance of wind power is discussed with respect to local population and different forms of ownership. Regulations of grid connection that concern wind power generation are also presented. One of the Energy Village project's villages was used as a subject for a case study. This study includes PSCAD simulations of the subject village's distribution network that demonstrate the wind turbine's effects on the grid. In addition, the calculated energy production potential in the village is presented and examined.

Used wind turbines have proven profitable especially when the energy generated can be consumed at the location. New wind turbines can provide many positive effects, not only for plant owners but also for landowners and municipalities participating in profit sharing, providing considerable economic benefit to rural areas. The results of the grid simulations indicate that the wind turbine effects on the grid load remain low even in sudden failure and stopping situations. However, current capacity of the grid would be unable to cope with more power generation without reducing power quality.

---

**KEYWORDS:** Wind power, grid connection, profitability, energy self-sufficiency, PSCAD



## 1 JOHDANTO

Uusiutuvien energianlähteiden osuuden lisääntyessä perinteisestä keskitetystä tuotannosta ollaan siirtymässä vähitellen kohti hajautettua tuotantoa. Samalla lisääntyvät sähköverkolle asetettavat vaatimukset, kun energiaa siirretään myös kuluttajalta verkkoon. Paikallisiin lähteisiin perustuvalla energiantuotannolla on monia positiivisia vaikutuksia paikalliseen aluetalouteen. Kun tuontenergiaa korvataan hyödyntämällä paikallisia energianlähteitä, alueelle syntyy uutta liiketoimintaa ja työpaikkoja.

Uusiutuvien energianlähteiden hyödyntämiselle ja energiaomavaraisuuden lisäämiselle asetettiin kunnianhimoiset tavoitteet Euroopan unionissa vuonna 2007, kun vuoden 2020 tavoitteista päätettiin. Niin sanottu 20-20-20 tavoite tähtää 20 prosentin päästövähennyksiin, uusiutuvien osuuden nostamiseen 20 prosenttiin sekä energiatehokkuuden parantamiseen 20 prosentilla vuoteen 2020 mennessä. Suomen osuus tavoitteiden saavuttamisessa on nostaa uusiutuvan energian osuus loppukäytöstä 38 %:iin (TEM 2013). Näiden tavoitteiden saavuttaminen vaatii jatkossakin kasvavaa panostusta uusiutuvaan energiaan.

Tämä diplomityö tehtiin osana Vaasan yliopiston Levón-instituutin koordinoimaa Energiakylä-hanketta. Hankkeen tavoitteena on perustaa 10–15 energiakylää, joille laaditaan energiaomavaraisuuteen tähtäävä suunnitelma. Tarkoituksena on, että kohteiden energiahuolto perustuu tulevaisuudessa alueen omiin uusiutuviin energianlähteisiin. Tavoitteena on myös kestävän energiahuollon edistäminen ja sen ratkaisujen kehittäminen yleisesti käyttökelpoisiksi toteuttamismalleiksi sekä tiedon levitys. Hanke toteutetaan Pohjanmaan, Etelä-Pohjanmaan ja Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskusten alueella. Hankkeen toteutuksessa mukana ovat Yrkeshögskolan Novia sekä Rannikon ja Etelä-Pohjanmaan metsäkeskukset.

Diplomityön tavoitteena on tutkia yksittäisten keskijänniteverkkoon kytkettävien tuulivoimaloiden vaikutuksia sähköverkkoon, sekä kannattavuuteen ja aluetalouteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa tarkastellaan yhtä Energiakylä-hankkeen kylistä, Jalasjärvellä sijaitsevaa Ilvesjoen kylää. Kylässä on käytössä kaksi käytettynä hankittua tuulivoimalaa, joiden vaikutusta alueen jakeluverkkoon tutkitaan PSCAD-

sähköverkkosimulointiohjelmiston avulla. Ilvesjoen kylän kohdalla pohditaan lisäksi mikrosähköverkon toteuttamisen vaatimuksia kuvassa 1 esitetyn kestäväen energiahuollon portaiden mukaisesti.



**Kuva 1.** Energiakylä-hankkeen kestäväen energiahuollon portaat (Kaavio: Hannu Laaksonen, Kimmo Kauhaniemi, Sampo Voima).

Työn toinen luku toimii yleisenä tietopakettina tuulivoimasta ja sen hyödyntämismahdollisuuksista paikallisella tasolla. Oman tuulivoimatuotannon aloittaminen on monivaiheinen prosessi, jossa tulee ottaa huomioon monia eri seikkoja aina sopivan paikan ja laitteen valinnasta lupa-asioihin ja verkkoliityntään. Tietopaketin tarkoitus on toimia oppaana erityisesti oman tuulivoimalan hankintaa suunnittelevalle, mutta myös muille tuulivoimasta kiinnostuneille. Luvussa käydään läpi tuulivoiman nykytilanne Suomessa ja maailmalla, kerrotaan perusteet tuulivoimalan hankintaan liittyvistä lupa- ja sopimus-käytännöistä sekä omistusmuodoista ja taloudellisesta kannattavuudesta. Teoriaosuuden tarkoituksena on myös tuoda lukijan tiedot tuulivoimasta ajan tasalle, koska kyseessä on erittäin nopeasti kehittyvä ala, josta varsinkin mediassa liikkuu varsin monenkirjava tietoa ja kärjistettyjä mielipidekirjoituksia. Yleisen hyväksyttävyyden saavuttaminen onkin yksi merkittävimmistä haasteista tuulivoiman lisärakentamiselle. Energiakylä-hankkeen tavoitteiden saavuttamiseksi tälle luvulle on asetettu erityisesti painoarvoa.

Tuulivoimatekniikkaa käsittelevässä luvussa perehdytään yleisimpiin tuulivoimalatyyppeihin, verkkoliityntään sekä suojausvaatimuksiin. Luvun tarkoituksena on syventää tietopakettiosuudessa käsiteltyjä perusteita tuulivoimasta sekä antaa lähtökohdat simuloinneissa tutkittaviin tilanteisiin. Verkkoliitynnän ja suojauksen osalta keskitytään erityisesti tuulivoiman asettamiin vaatimuksiin sähköverkoille ja niiden suojaukselle.

Kolmannessa luvussa tarkastellaan Ilvesjoen kylän energiantuotantopotentiaalia sekä verrataan sitä kylän nykyiseen energiantuotantoon ja -kulutukseen. Luvun painopiste on kylän tuulivoimaloiden esittelyssä, ja niiden verkkovaikutusten tutkimisessa simulointien avulla. Lisäksi arvioidaan kylän energiantuotannon kehittämismahdollisuuksia.

Viimeisessä luvussa esitellään ympäri Suomea rakennettuja yksittäisiä tuulivoimaloita ja kerrotaan niiden käyttökokemuksista. Konkreettiset esimerkkitapaukset toimivat hyvänä taustatietona tuleville hankkeille ja oman voimalan hankintaa suunnitteleville. Muiden kokemuksista oppimalla voidaan välttää ongelmatilanteita, ja lisäksi niistä on hyötyä omaan tarpeeseen sopivan voimalan valinnassa.

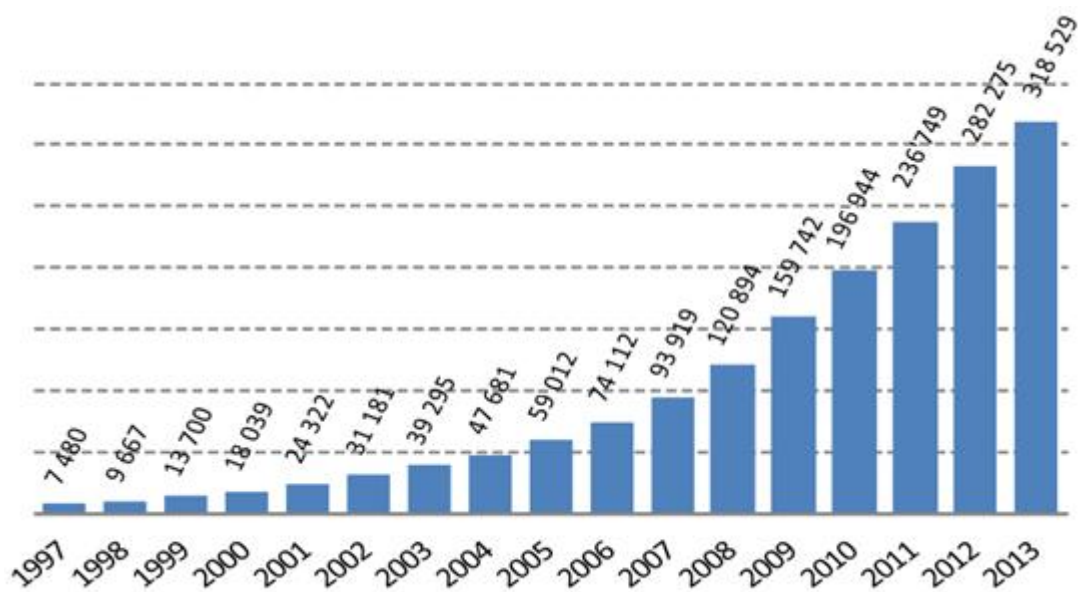
## 2 PAIKALLISEN TUULIVOIMATUOTANNON HYÖDYNTÄMINEN

Energiantuotannon siirtyessä kohti kestävämpiä ja vähäpäästöisempiä tuotantomuotoja on tuulivoimateollisuus kasvanut viimeisen vuosikymmen aikana merkittävästi. Samalla asennetun kapasiteetin yksikköhinta on ollut tasaisessa laskussa. Energian hintaan vaikuttavat monet toisistaan riippumattomat tekijät, mikä tekee tuulivoiman taloudellisen kannattavuuden arvioinnin pitkällä aikavälillä vaikeaksi. Tuulivoiman lisärakentamista ovat ohjanneet valtioiden uusiutuvan energian lisäämistavoitteet, joita on vauhditettu erilaisin tuin ja verohelpotuksin.

### 2.1 Tilastot

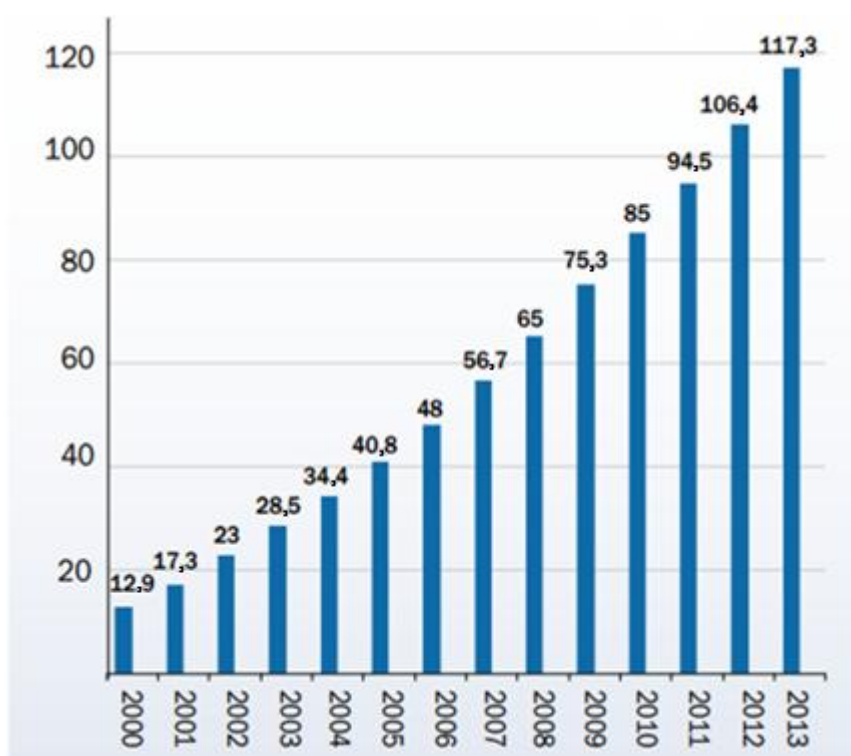
Tuulivoimakapasiteetin rakentaminen Suomessa on lähtenyt nopeaan kasvuun viime vuosina valtion myöntämän energia- ja ilmastostrategian mukaisen uusiutuvan energian tuotantotuen, eli niin sanotun syöttötariffin vauhdittamana. Suomen kansallisenä tavoitteena on nostaa tuulivoimatuotanto 6 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä, mikä saavutetaan noin 2 500 MW tuulivoimakapasiteetilla. Tuotantomäärien globaali lisääntyminen ja uusien valmistajien tuleminen markkinoille ovat laskeneet voimaloiden hintoja ja tehneet tuulivoimasta entistä kilpailukykyisempää muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna.

Kuvassa 2 on esitetty tuulivoimakapasiteetin kehitys koko maailmassa. Kuten kuvasta nähdään, on kasvuvauhti ollut kiivasta. Kasvua on kertynyt 15–30 % vuosittain. Vuonna 2013 rakennetusta uudesta kapasiteetista rakennettiin Kiinaan lähes 50 % ja Eurooppaan kolmannes. Vuonna 2013 tuulivoimalla tuotettiin yhteensä noin 640 TWh sähköä, joka vastasi noin 4 % koko maailman sähköntuotannosta. (WWEA 2014).



**Kuva 2.** Asennetun tuulivoimakapasiteetin kumulatiivinen kehitys maailmassa megawatteina (WWEA 2014).

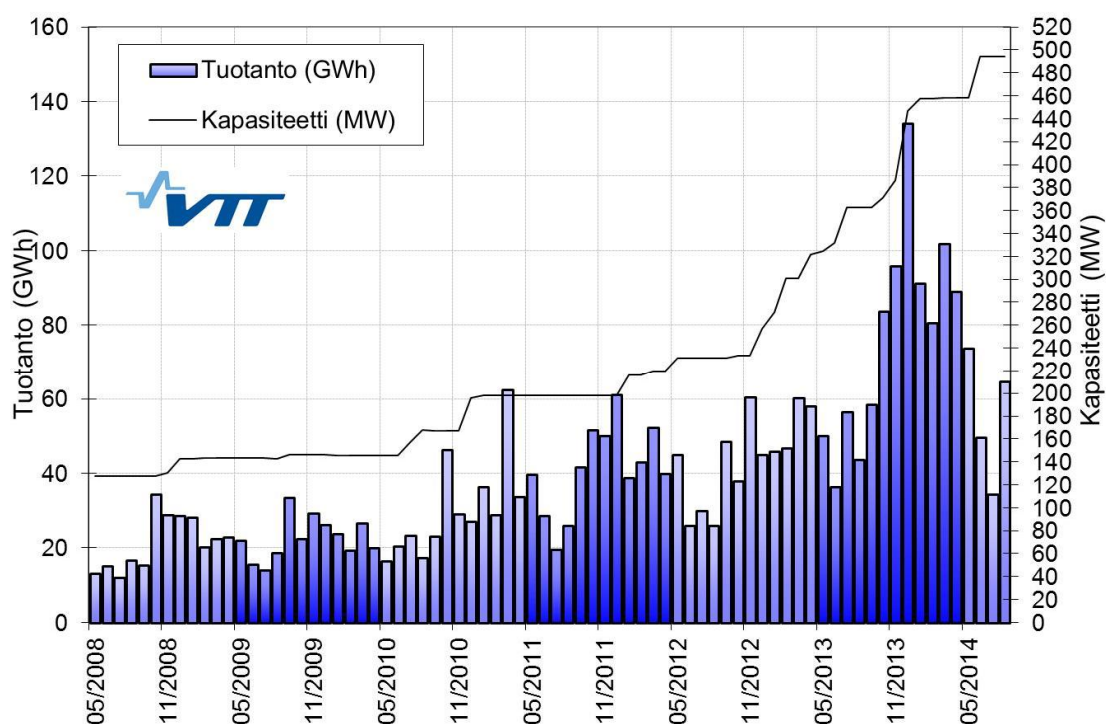
Euroopan unionin alueella tuulivoiman lisärakentamista ovat vauhdittaneet valtioiden omat tukijärjestelmät, joiden avulla tuulivoimaa on tehty kaupallisesti kannattavammaksi. Tukitoimien taustalla on koko EU:ta koskevat uusiutuvan energian lisäämistavoitteet. Eniten tuulivoimakapasiteettia löytyy Saksasta, jossa oli vuoden 2013 lopussa yhteensä 33 730 MW tuulivoimaa. Suhteellisesti suurin tuulivoiman tuottaja on Tanska, jonka sähköstä 34 % tuotettiin tuulivoimalla vuonna 2013. Asennetun tuulivoimakapasiteetin kehitys EU:ssa on esitetty kuvassa 3. (EWEA 2014)



**Kuva 3.** Asennetun tuulivoimakapasiteetin kumulatiivinen kehitys Euroopan unionin alueella gigawatteina (EWEA 2014).

Suomessa tuulivoiman rakentaminen on lähtenyt muuhun Eurooppaan verrattuna myöhemmin käyntiin. Merkittävimpänä syynä nopeaan kasvuun voidaan pitää vuonna 2011 voimaan astunutta valtion myöntämää tuulivoiman tuotantotukea, eli niin sanottua syöttötariffia, jonka avulla tuulivoimasta tehtiin erittäin kilpailukykyinen muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna.

Vuoden 2013 aikana Suomessa saatiin tuotantoon yhteensä 58 uutta tuulivoimalayksikköä ja Suomen tuulivoimakapasiteetti nousi 447 MW:iin. Tuulivoimalla tuotettiin noin 771 GWh, joka oli 0,9 % Suomen sähkönkulutuksesta. (VTT 2014.) Vuoden 2014 loppuun mennessä tuulivoimakapasiteetti nousi 43 % vuoden takaiseen verrattuna, kun kapasiteetti saavutti 627 MW (STY 2015). Suomen tuulivoimatuotannon ja -kapasiteetin kehitys on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Tuulivoimatuotanto ja asennettu kapasiteetti Suomessa ajanjaksona 2008–2014. (VTT 2014)

Suomen kansallisen tuulivoimatavoitteen, 6 TWh:n vuosituotannon, saavuttamiseen on siis vielä paljon matkaa, mutta vuonna 2013 nähtiin jo merkkejä voimakkaasta kasvusta ja valtion tukemana tavoite on mahdollista saavuttaa. VTT:n (2014) tietojen mukaan syyskuussa 2013 Suomessa oli suunnitteilla 11 013 MW edestä tuulivoimahankkeita, josta merelle suunniteltujen voimaloiden osuus oli 2 974 MW. Varsinais-Suomen ELY-keskusken toimialapäällikkö Markku Almin (2015) mukaan vuoden 2020 tavoite voidaan lukuisten hankkeiden johdosta saavuttaa jo vuosien 2018–2019 aikana. Tuulivoiman lisärakentamisen vaikutuksia sähköverkon toimintaan sekä kansalliseen ja aluetalouteen tullaan arvioimaan seuraavissa kappaleissa.

## 2.2 Tuuliolot

Suomen tuulivoimatuotantopotentiaali on teknisesti erittäin korkea. Hyvät tuuliolot varsinkin rannikko- ja tunturialueilla, sekä maamme suuri pinta-ala tarjoavat hyvät mahdol-

lisuudet laajamittaiseen tuotantoon. Ympäristöministeriön julkaisemassa yhteenvedossa maakuntaliittojen selvityksistä todetaan, että tuulivoimatuotantoon soveltuville alueille voitaisiin sijoittaa yhteensä 12 600 MW tuulivoimakapasiteettia. Tässä luvussa on otettu kuitenkin huomioon potentiaali vain maakuntakaavoituksen näkökulmasta ja jätetty muut seikat huomiotta. Käytännössä potentiaali on siis selvästi tuota lukua pienempi. (Tarasti 2012.)

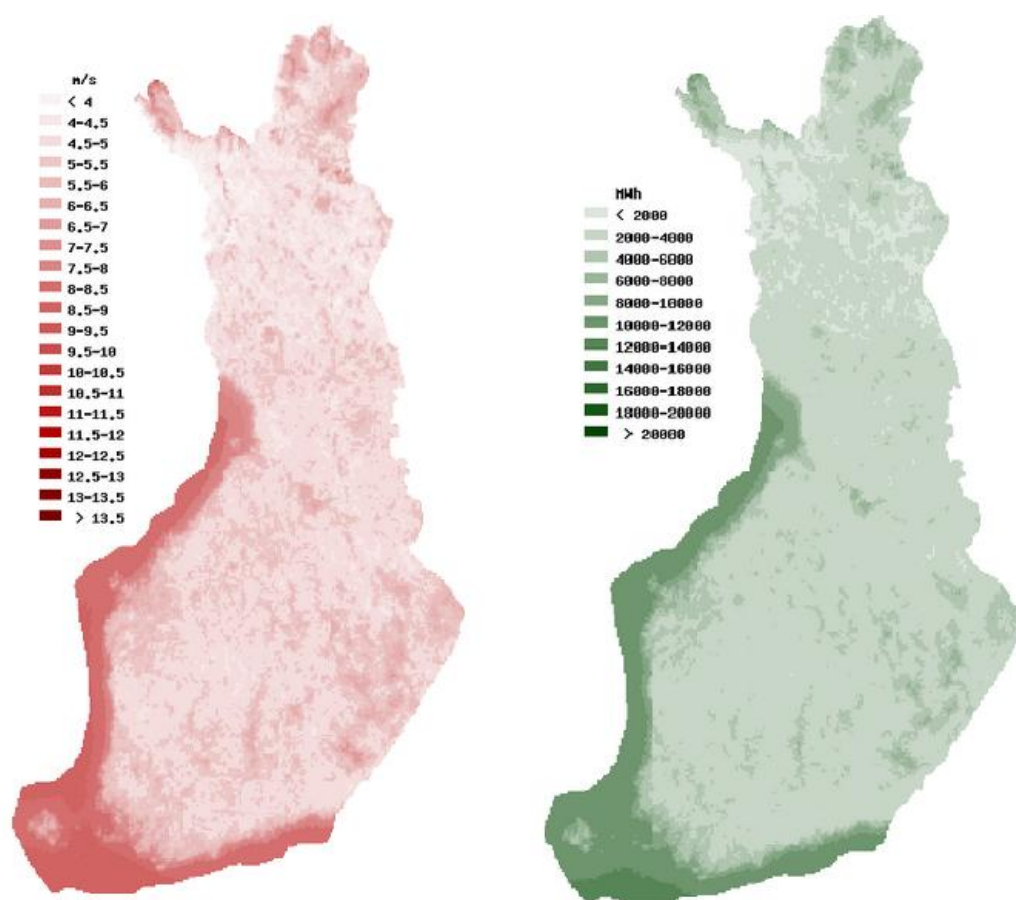
Tuulivoimatuotannon kannattavuus perustuu aina tarpeeksi hyviin tuulioloihin. Mahdollisen tuulivoimatuotantoalueen tuulioloja voidaan tutkia suunnitteluvaiheessa eri tavoin. Alustavaa selvitystä tehtäessä on nykyisin käytössä muun muassa Suomen Tuuliatlas. Lisäksi ennen uuden tuulivoimalan rakentamispäätöstä tulee alueella suorittaa tuulimitauksia joko perinteisellä meteorologisella mastolla tai nykyaikaisilla etämittaussmenetelmillä. Seuraavaksi perehdytään näihin menetelmiin tarkemmin.

### 2.2.1 Suomen Tuuliatlas

Vuoden 2009 lopussa Ilmatieteen laitoksen julkaisema Suomen Tuuliatlas on numeerinen säämalli koko Suomen tuulioloista. Malliin on simuloitu 72 kuukauden todelliset säätilanteet ja kyseiset kuukaudet on valittu 50 vuoden ajalta kuvaamaan parhaiten keskimääräisiä tuulioloja. Tuuliatlaksen WWW-pohjainen sovellus on kaikkien saatavilla ja sillä voi tarkastella Suomen tuuliolosuhteita 50–400 metrin korkeudelta 2,5 x 2,5 kilometrin kokoisten ruutujen tarkkuudella. Valituilla hyvätuulisilla alueilla ruutujen resoluutio on tarkempi, 250 x 250 metriä. (Ilmatieteen laitos 2011.)

Tuuliatlas antaa tuulen keskinopeuden lisäksi myös muun muassa tuulen suunnan jakauman sekä energiantuotantomäärät erikokoisilla voimaloilla (Ilmatieteen laitos 2011). Myös nämä tekijät auttavat taloudellisesti kannattavien tuulivoimapaikkojen suunnittelussa. Kuvassa 5 on Tuuliatlaksen graafiset esitykset tuulen keskinopeuksista sekä 3 MW tuulivoimalan tuotantoarvioista. Kuvista havaitaan, että parhaat alueet tuulivoimatuotannolle ovat meri- ja rannikkoalueet, sekä sisämaassa etenkin tunturialueet.





**Kuva 5.** Tuuliatlaksen graafiset esitykset tuulen keskinopeuksista ja tuotantoarvioista (Ilmatieteen laitos 2011).

Tuuliatlas on erinomainen työkalu tuulivoima-alueiden alustavaan suunnitteluun. Karttaliittymästä on hyötyä etenkin kaavoituksessa, sekä alue- ja voimalaitosrakentamisen suunnittelussa (Ilmatieteen laitos 2011).

### 2.2.2 Tuulimittaukset

Tuulimittausten suorittaminen ennen tuulivoimalan rakentamista on erittäin tärkeää kannattavan tuulivoimatuotannon saavuttamiseksi. Suomen Tuulivoimayhdistyksen (STY) mukaan tuulimittauksia tulee tehdä suunnitellun voimalan napakorkeudella yhdestä kahteen vuoteen investointipäätöstä. Näin varmistutaan siitä, että muun muassa keskituulennopeus ja turbulentsisuus ovat tuulivoimatuotannon kannalta sopivia. Lisäksi tuloksia tulee vertailla sääasemien mittaustietoihin, jotta vuosittaisten vaihteluiden vaikutus saadaan eliminoitua. (STY 2014.)

Tuulimittauksia voidaan tehdä perinteisellä mastoon asennetulla tuulimittarilla eli anemometrillä tai nykyisin yleistyvillä SODAR (Sound Detection And Ranging) ja LIDAR (Light Detection And Ranging) -menetelmiin perustuvien mittauslaitteiden avulla. Suomessakin käytössä olevien SODAR-mittausvaunujen avulla voidaan mittaus suorittaa ilman maston rakentamista, mikä säästää ympäristöä ja kustannuksia. Lähteen Lang & McKeogh (2011) mukaan perinteinen tuulimittari antaa tarkemman kuvan tuulennopeuden käyttäytymisestä alueilla, jossa maanpinnan muodot aiheuttavat paikallista vaihtelua tuulen nopeudessa. Edellä mainitut etämittauslaitteet mittaavat tuulioloja laajalta alueelta, minkä vuoksi paikallisia vaihteluita ei havaita niin tarkasti (Lang & McKeogh 2011).

SODAR-mittalaite lähettää ilmakehään lyhyitä sini-muotoisia akustisia pulsseja ja mittaa takaisin heijastuneet ääniaallot. Mittaustulosten analysointi perustuu sekä ääniaaltojen intensiteettiin että Doppler-siirtymään. Niiden avulla voidaan määrittää tuulen suunta, nopeus ja turbulentsisuus jopa 2 km korkeuteen asti. Tyypillisesti SODAR lähettää ääniaaltoja kolmessa keilassa, joiden avulla tuulen käyttäytymisestä voidaan muodostaa kolmiulotteinen kuva. (Lang ym. 2011.) Suomessakin käytetyllä AQSystemsin valmistamalla SODAR-laitteella saadaan valmistajan mukaan suoritettua mittaus 200 metriin asti viiden metrin resoluutiolla. (Tuulisampo Oy 2014.)

Kahran (2011) mukaan Suomessa käytettävien SODAR-laitteiden ongelma on niiden sertifiointin puute. Tämän seurauksena rahoituslaitokset eivät hyväksy SODARia ainoana mittausmenetelmänä tehdessään päätöksiä tuulivoimainvestoinneista. Kahran tekemän kyselytutkimuksen mukaan suomalaiset tuulivoima-asiantuntijatkin suhtautuvat varuksella pelkän SODAR-mittausten perusteella tehtäviin tuulivoimainvestointeihin.

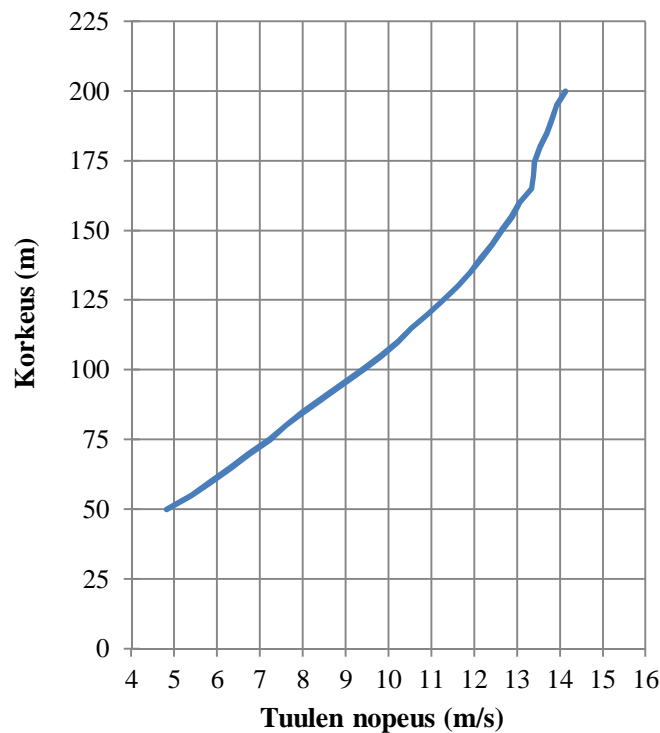
LIDAR-menetelmässä ilmakehään lähetetään laser-säde, joko jatkuvana tai pulssimaisena, ja takaisin heijastuneet säteet mitataan analysointia varten, kuten SODARissakin. LIDAR voi käyttää valon eri aallonpituuksia ultravioletista aina infrapunaan asti. Nämä aallonpituudet käyttäytyvät ilmakehässä eri tavoin, minkä ansiosta mittaustekniikalla on mahdollista saada tuulen lisäksi dataa myös ilman lämpötilasta ja ilmakehän koostumuksesta. (Lang ym. 2011.) LIDAR-mittalaitteista on olemassa muutamia kaupallisia versioita, mutta tietävästi niitä ei ole vielä Suomessa käytössä.

### 2.3 Tuulivoiman kannattavuus

Tuulivoiman kannattavuuden määrittämiseen vaikuttaa merkittävästi onko kyseessä uusi vai käytetty voimala. Uusi, yli 500 kVA:n tuulivoimala, on mahdollista saada valtion myöntämän tuotantotuen piiriin, jolloin tuotetusta sähköstä maksettava takuuhinta poistaa sähkön markkinahinnan muutoksiin liittyvän riskin ensimmäisen 12 vuoden ajaksi. Käytetyn voimalan tapauksessa verkkoon myydystä energiasta saa markkinahinnasta riippuvan korvauksen, joka neuvotellaan sähköyhtiön kanssa. Käytetyn voimalan osalta merkittäväksi tekijäksi kannattavuutta tarkasteltaessa muodostuu oman kulutuksen osuus, jota kattamalla omalla tuotannolla säästää energian hinnan lisäksi myös verkkoyhtiölle maksettavat siirtomaksut.

Kuten edellisessä luvussa todettiin, on tuulimittausten tekeminen ensiarvoisen tärkeää tuulivoimalan hankintaa suunniteltaessa. Tuulisuus onkin merkittävin yksittäinen tekijä tuulivoimalan kannattavuutta tarkasteltaessa. Tuulesta saatava teho on verrannollinen tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin eli tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa teho kahdeksankertaistuu. Tämä kuvastaa hyvin tuuliolojen merkitystä tuulivoimalan kannattavuudelle. (Koskinen 2012: 7.) Pintakitkan vaikutuksesta tuulen nopeus on pienempi lähellä maan pintaa, minkä vuoksi korkeampia voimaloita rakentamalla päästään hyödyntämään parempia tuulioloja (Tuulivoimaopas 2014). Kuvassa 6 on esitetty Yrkeshögskolan Novian SODAR-mittalaitteella tehty tutkimus tuulen nopeudesta eri korkeuksilla.

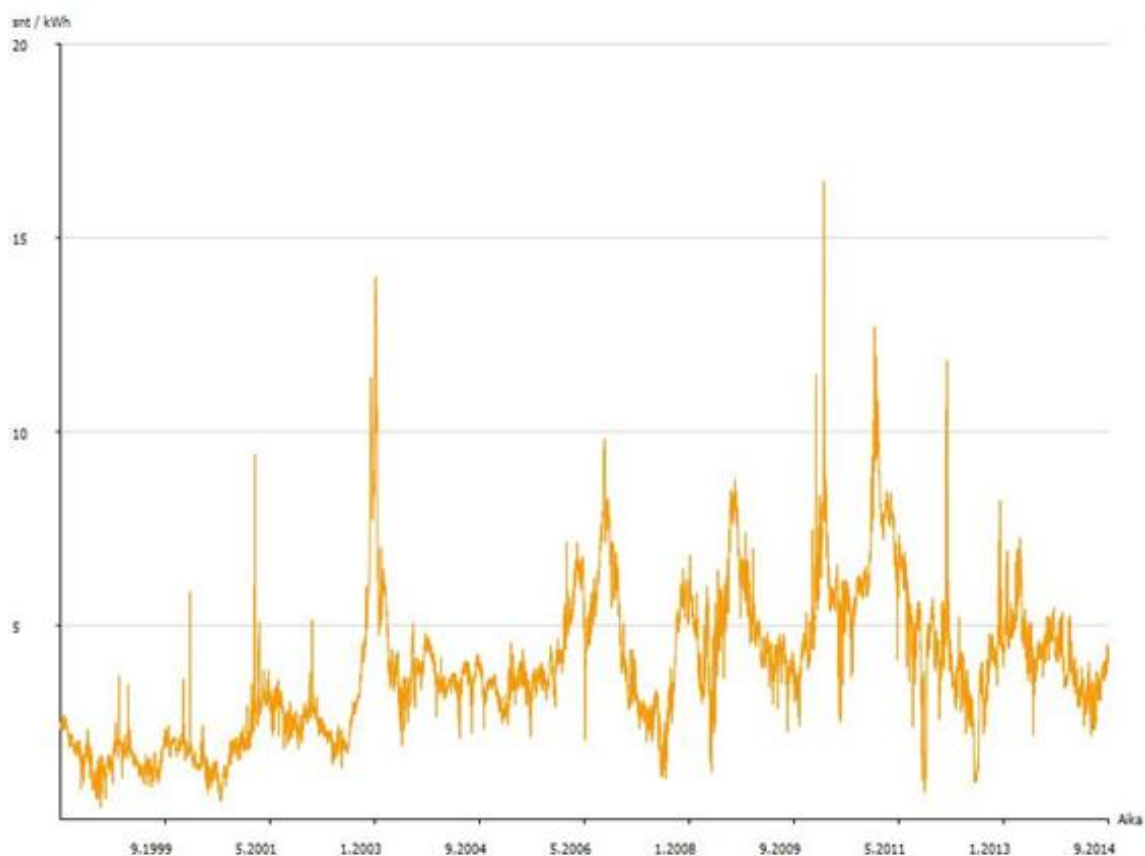
Tuulivoiman yleiseen kannattavuuden parantumiseen on vaikuttanut myös investointikustannusten lasku kasvavan voimalaitoskoon ja aasialaisten voimalavalmistajien lisäämän kilpailun vaikutuksesta. Suuremmat voimalat ovat usein kannattavampia, koska infrastruktuurin kustannukset eivät nouse samassa suhteessa voimalaitoksen koon kanssa ja lisäksi korkeammilla voimalaitoksilla päästään hyödyntämään parempia tuulioloja. Alkuinvestoinnin suuruuteen, ja sitä mukaa kannattavuuteen, vaikuttavat myös liittymisen sähköverkkoon, rakentamista ja huoltoa tukeva infrastruktuuri sekä rakenteiden perustamisolosuhteet. (Koskinen 2012, Ympäristöministeriö 2012.)



**Kuva 6.** Yrkeshögskolan Novian SODAR-mittaus tuulen nopeudesta eri korkeuksilla.

Sähkön hintakehitys on luonnollisesti tärkeässä roolissa kaikkien energiantuotantomuotojen kannattavuutta tarkasteltaessa. Korkeampi sähkön hinta tarkoittaa lyhempiä takaisinmaksuaikoja ja parempia tuottoja, mutta viime vuosina hintojen nousu on pysähtynyt ja jopa kääntynyt laskuun. Pitkällä aikavälillä sähkön hinnan nousu on ollut kuitenkin vakaata.

Kuvassa 7 on esitetty Nordpoolin eli pohjoismaisen sähköpörssin tuntihintojen vuoro-kausikeskiarvot vuodesta 1998 lähtien. Pohjoismaissa hintaan vaikuttavat muun muassa vesitilanne, sekä päästöoikeuksien ja kivihillen hinta. Lisäksi hintoja painaa lisääntyvä tuulivoimakapasiteetti, jonka muuttuvat kustannukset ovat erittäin alhaiset ja täten hyvätuulisina aikoina halpaa sähköä on paljon tarjolla (Elforsk 2008). Samalla hintojen vaihtelu on kasvanut selvästi. Hyvätuulisina tunteina matalan kulutuksen aikana hinnat ovat olleet jopa negatiivisia, kun taas kulutushuippujen aikana tuntihinta nousee huomattavasti. Kuvassa 7 negatiiviset tunnukset eivät kuitenkaan näy, koska vuoro-kausihinnat ovat pysyneet positiivisina.



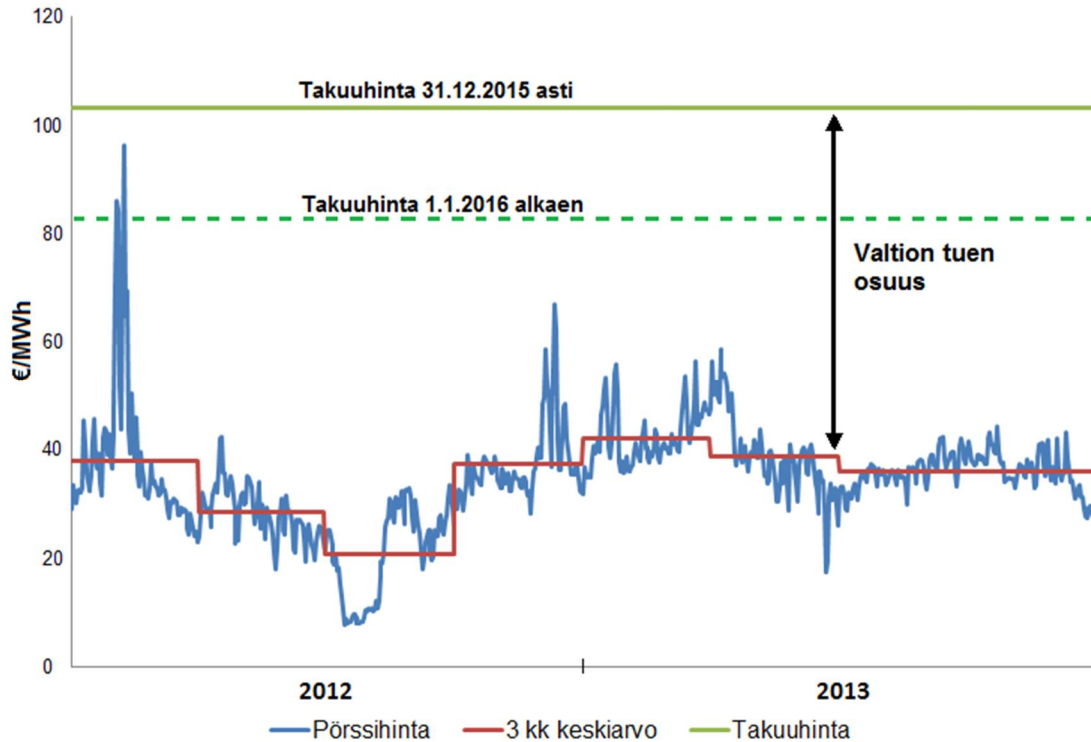
**Kuva 7.** Nordpoolin tuntihintojen vuorokausikeskiarvot vuosina 1998–2014 (Energiavirasto 2014).

### 2.3.1 Tukijärjestelmät

Suomen tuulivoimatuotantotavoitteiden saavuttamiseksi ja tuulivoiman kannattavuuden lisäämiseksi otettiin vuonna 2011 käyttöön tuulivoiman takuuhintajärjestelmä eli niin sanottu syöttötariffi. Aikaisemmin tuulivoimaa tuettiin Suomessa investointituella, jolla oli mahdollista kattaa osa alkuinvestoinnista. Myös muissa EU-valtioissa on käytössä syöttötariffijärjestelmiä, joiden käytännöt poikkeavat toisistaan. (Tuulivoimaopas 2014.)

Syöttötariffin määräytyminen on säädetty laissa uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta (1396/2010), joka koskee tuulivoiman lisäksi muutakin uusiutuvaa energiaa hyödyntävää sähkötuotantoa. Lain mukaan valtio maksaa tuottajalle takuuhinnan ja kolmen kuukauden, eli tariffijakson, markkinahinnan keskiarvon välisen erotuksen. Takuuhinta on 83,50 euroa megawattitunnilta ja vuoden 2015 loppuun saakka

käytössä on korotettu 105,30 euron takuuhinta. Kuvassa 8 on havainnollistettu valtion syöttötariffista maksaman osuuden määräytyminen.



**Kuva 8.** Syöttötariffin määräytymisperiaate.

Tukia myönnetään kunnes järjestelmään hyväksytyjen voimaloiden nimellisteho ylittää 2 500 MVA. Takuuhintaa maksetaan enintään 12 vuotta alkaen siitä, kun oikeus syöttötariffiin alkaa. Valtion talousarvioesityksessä vuodelle 2015 uusiutuvan energian tuotantotuelle varattiin yhteensä 204 miljoonaa euroa, josta 137,9 miljoonaa oli kohdennettu tuulivoimalle.

Syöttötariffin piiriin haettavan tuulivoimalan tulee täyttää seuraavat vaatimukset (Laki uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 1396/2010 9§):

- Tuulivoimala ei ole saanut valtiontukea
- Voimala on uusi eikä se sisällä käytettyjä osia
- Generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho on vähintään 500 kVA.

Tuulivoimahankkeelle on mahdollista hakea myös investointitukea, eli niin sanottua energiatukea, joka on säädetty Valtioneuvoston asetuksessa energiatuen myöntämisen

yleisistä ehdoista (1313/2007). Energiatukea myönnetään ilmasto- ja ympäristömyönteisille investoinneille. Tuulivoimainvestoinnille tai -selvityshankkeelle voidaan myöntää enintään 40 % energiataukea investoinnin kokonaisarvosta. Hakemukseen hyväksyttävät kustannukset voivat investoinnin osalta olla enintään 3 000 000 euroa ja selvityshankkeen osalta enintään 250 000 euroa. Lain mukaan energiataukea voidaan myöntää yrityksille, kunnille ja muille yhteisöille. Tukea ei kuitenkaan myönnetä asunto-osakeyhtiöille, asuinkiinteistöille, valtionosuutta saaville perustamishankkeille eikä maataloille tai niiden yhteyteen toteutettaville hankkeille (1313/2007 3§). Tuulivoimainvestointeihin ei kuitenkaan nykyisin juuri haeta investointitukea, koska se sulkisi pois mahdollisuuden päästä tuotantotuen piiriin.

Kuten kappaleessa 2.1 todettiin, on syöttötariffijärjestelmä saanut aikaan huomattavan määrän uusia tuulivoimahankkeita. Hankkeiden suuri määrä on herättänyt huolta kansalaisissa lisääntyvästä verorahan käytöstä tuulivoiman tukiin. Asetettu 2 500 MVA katto tukien myöntämiselle estää kuitenkin tukimäärän nousun hallitsemattomasti. Hankkeiden suuri määrä on osoitus siitä, että tukijärjestelmä on toiminut suunnitellusti ja tuulivoiman rakentaminen on saatu hyvään vauhtiin. Sähkön hinnan kehityksestä riippuu menettääkö syöttötariffi merkityksensä jo ennen kuin ensimmäiset voimalat ovat edes ehtineet saada tukea 12 vuotta. TEM:n energiaosaston ylijohtajan Esa Härmälän mukaan tuulivoimabiznes ei ole ylikuumentunut ja syöttötariffin määrä on sopivalla tasolla (Pellervo 2014).

### 2.3.2 Kannattavuuslaskelmat

Tuulivoimainvestoinnin kannattavuutta laskettaessa käyttökelpoisia menetelmiä ovat nykyarvo- ja takaisinmaksuajan menetelmät. Takaisinmaksuajaksi kutsutaan sitä määrää vuosia, joiden kuluessa tulojen lisäyksellä tai menojen säästöillä investointi maksaa hankintamenoja. Takaisinmaksuajan menetelmä ei ota huomioon hankinnan jäännösarvoa. (Vierros 2009.) Täten se sopii hyvin käytetyn voimalan kannattavuuden tutkimiseen, koska tarkoitus on yleensä käyttää voimala elinikänsä loppuun asti. Nykyarvomenetelmä taas toimii hyvin uuden voimalan kannattavuutta laskettaessa, koska siinä otetaan huomioon voimalan jäännösarvo sekä rahan arvon muuttuminen pitkäaikaisen investoinnin pitoaikana. Nykyarvomenetelmässä kaikki tulevat maksusuoritteet diskon-

tataan hankkimishetkeen ja näin saatujen tulojen ja menojen nykyarvojen erotus kertoo hankkeen kannattavuuden (Vierros 2009).

Käytetyn tuulivoimalan kannattavuuden arviointia vaikeuttavat monet epävarmuustekijät, kuten hankittavan laitteen jäljellä oleva elinikä, jota on vaikea arvioida tarkasti. Lisäksi tuulioloista riippuvan voimalan vuosituotannon arviointi on haastavaa, koska käytettyjen tapauksessa suhteellisen kalliita täsmällisiä tuulimittauksia ei yleensä tehdä (Riiho 2014). Voimalat ovat myös uusiin verrattuna matalampia, minkä vuoksi maanpinnanmuodot vaikuttavat tuulisuuteen enemmän, eivätkä Tuuliatlaksen tiedot siten todennäköisesti pidä yhtä hyvin paikkaansa.

Käytetyn tuulivoimalan kannattavuus perustuu menojen säästöön oman kulutuksen kattamisella tuulivoimalan tuotannolla. Oman kulutus on siten yksi takaisinmaksuajan määrittämiseen tarvittavista lähtötiedoista. Lisäksi tarvitaan arvio vuosituotannosta ja tuotannon muuttuvista kustannuksista, kuten huoltokuluista. Sähkön hinnan kehittymiseen vaikuttavat monet tekijät, mutta suuntaa antavassa laskelmassa voidaan sen olettaa pysyvän nykyisellä tasolla. Taulukossa 1 on esitetty esimerkkilaskelman tulokset käytetyn tuulivoimalan takaisinmaksuajasta tilanteissa, joista toisessa suuri osa tuotannosta saadaan omaan käyttöön ja toisessa kaikki tuotettu sähkö myydään verkkoon. Esimerkin lähtöarvot ovat eri puolilta Suomea saatujen käyttökokemusten mukaan valittuja arvoja.

**Taulukko 1.** Käytetyn 600 kW tuulivoimalan takaisinmaksuajan esimerkkilaskelma.

	<b>Omaa kulutusta</b>	<b>Koko tuotanto verkkoon</b>
Huipunkäyttöaika	1000 h	1000 h
Vuosituotanto	600 MWh	600 MWh
Oma kulutus	450 MWh	0 MWh
Myyntihinta	40 €/MWh	40 €/MWh
Ostosähkön hinta	100 €/MWh	100 €/MWh
Huoltokustannukset	15 €/MWh	15 €/MWh
Huoltokustannukset vuodessa	9 000 €	9 000 €
Alkuinvestointi	300 000 €	300 000 €
Säästö ja tuotto vuodessa	42 000 €	15 000 €
Takaisinmaksuaika	7,1 vuotta	20,0 vuotta



Takaisinmaksuajan laskelma havainnollistaa hyvin oman kulutuksen merkityksen käytetyn tuulivoimalan kannattavuudelle. Seitsemän vuoden takaisinmaksuaika tarkoittaa käytetyn voimalan kohdalla taloudellisestikin kannattavaa investointia, mutta koko tuotannon verkkoon myymisen kohdalla taloudellinen hyöty jää pieneksi ja motivaatio investoinnille voi olla etupäässä arvopohjainen sijoitus uusiutuvaan energiaan.

Uuden voimalan hankinta on pitkäaikainen investointi, jonka kannattavuuden arviointiin nykyarvomenetelmä on käyttökelpoinen. Taulukossa 2 on listattu esimerkkilaskelmassa käytetyt lähtöarvot, jotka ovat Suomen oloissa tyypillisiä ja perustuva suomalaisiin tuulivoimatilastoihin ja voimaloiden omistajien kokemuksiin.

**Taulukko 2.** Nykyarvomenetelmä-laskelmassa käytetyt lähtöarvot.

Teho	2,5 MW
Huipunkäyttöaika	2520 h
Vuosituotanto	6300 MWh
Hankintahinta	3 M€
Sähkön pörssihinta	40 €/MWh
Huoltokustannukset	37 800 €
Korkokanta	4 %

Taulukossa 3 on esitetty tulokset esimerkkilaskelmasta, jossa KNA tarkoittaa kustannusten nykyarvoa, TNA tuottojen nykyarvoa ja NNA nettotulojen nykyarvoa. Nykyrahasa investointi tuottaisi siis 2,5 miljoonaa euroa 20 vuoden aikana. Kustannuksissa otettiin lisäksi huomioon kiinteistövero ja maanvuokra. Liitteessä 1 on esitetty laskennassa käytetty Excel-tilauskokonaisuudessaan.

**Taulukko 3.** Esimerkkilaskelma uuden voimalan kannattavuuden määrittämisestä nykyarvomenetelmällä.

Vuosi	Hankinta (€)	Kustannukset (€)	KNA (€)	Tuotot (€)	TNA (€)	NNA (€)	Jäännösarvo (€)
0	3 000 000	-	-	-	-	-3 000 000	-
1	-	55 300	53 173	526 050	505 817	452 644	-
5	-	54 578	44 859	526 050	432 375	387 516	-
10	-	53 772	36 326	526 050	355 381	319 054	-
15	-	53 062	29 463	252 000	139 927	110 463	-
20	-	52 436	23 931	252 000	115 010	91 078	200 000
20 vuotta yhteensä				Nykyarvosumma:		2 463 477 €	

Epävarmuustekijöitä laskelmassa ovat etenkin muuttuvat kustannukset, eli pääasiassa huollon aiheuttamat kustannukset, sekä sähkön markkinahinta 12 vuoden jälkeen. Huoltokustannusten arvona käytettiin Maatuuli Oy:ltä (2014) saatuja tietoja ja voimalan huipunkäyttöaikana vuoden 2013 Suomen tuulivoimaloiden keskiarvoa. Lisäksi jäännösarvon, eli voimalarakenteiden arvo pitoajan jälkeen, ennakointi on vaikeaa ja voi joissain tapauksissa olla jopa negatiivinen purkukustannusten vuoksi. Epävarmuustekijöistä huolimatta investoinnin kannattavuus syöttötariffin ansiosta käy laskelmasta hyvin ilmi. Vastaavan laskelman mukaan nykyarvosumma ilman syöttötariffia olisi noin 100 000 € negatiivinen.

### 2.3.3 Käytetyn tuulivoimalan hankinta

Viime vuosina Suomeen on tuotu käytettyinä useita tuulivoimaloita Keski-Euroopasta, pääasiassa Saksasta. Laitteita on tarjolla edullisesti, koska maalla sijaitsevat tuulivoimaloille soveltuvat paikat on usein jo käytetty ja vanhemmat voimalat kannattaa korvata uudemmilla ja tehokkaammilla laitteilla. Käytetyistä voimaloista ei pidetä Suomessa samanlaista rekisteriä kuin uusista, mutta eri toimijoiden antamien tietojen mukaan käytettyjä voimaloita löytyy Suomesta noin 20 kappaletta.

Voimalan valinnassa kannattaa olla huolellinen, koska käytettyjä voimaloita löytyy paljon erimallisia, -ikäisiä ja erilaisen historian omaavia laitteita. Käytettyjä voimaloita hankkineet neuvovat ostamaan laitteen niin sanotusti *pystystä päin* eli myyntihetkellä

toiminnassa olevan voimalan, jota ei ole säilytetty purettuna. Lisäksi tulee huolehtia, että kaikki osat ovat samasta voimalasta. Näin voidaan varmistua siitä, että voimala toimii uudelleenpystytyksen jälkeenkin. Laitteen valinnassa tulee kiinnittää huomiota myös siihen, että jos voimalaa ei olla rakentamassa rannikolle, tulee sen olla suunniteltu sisämaassa käytettäväksi. Tällöin voimalan napakorkeus on suurempi suhteessa roottorin halkaisijaan ja voimala on mitoitettu pienemmille tuulen nopeuksille. Yli 500 kW voimalan tulee lisäksi täyttää Fingridin voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV) (Fingrid 2013).

Käytettyjä voimaloita Suomeen tuova ja asentava Maatuuli Oy suosittelee, että hankintahetkellä tehdään huoltosopimus laitevalmistajan valtuuttaman huoltoyrityksen kanssa, jolla on vastuu laitteen toiminnasta. Tämä edellyttää myös etäyhteyttä huoltoyrityksen keskusvalvomoon, jossa laitteen toimintaa tarkkaillaan jatkuvasti. Jos omistaja haluaa tehdä huollot itse, voi ongelmaksi muodostua tarvittavien tietojen ja varaosien saanti, koska jotkut valmistajat luovuttavat niitä vain valtuutetun huoltoyrityksen käyttöön. Maatuuli tuo pelkästään suoravetoisia eli vaihteettomia voimaloita, koska ne on havaittu Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuviksi ja huollontarpeeltaan pienemmiksi. Maatuulen tietojen mukaan nuorehko voimala maksaa pystytettynä noin puolet uuden vastaavan hinnasta, ja käyttövuosia laitteilla on vielä 20–25 vuotta. (Ahtee 2014.)

Useita voimaloita Suomeen on tuonut myös yrittäjä Terho Riiho. Hänen mukaansa voimalan hankinnassa tärkeintä on hyvä, ympäristöään korkeammalla oleva, sijoituspaikka ja sisämaahan suunniteltu laite. Lisäksi tärkeää on, että 20 kV sähkölinja kulkee suhteellisen lähellä, mieluiten alle 1,5 km päässä. Voimaloiden hankinnasta Riiho on vastannut itse, kuten kuljetuksistaakin, jotka hänen mukaansa aiheuttaa merkittävän osuuden hankintahinnasta. 1 MW voimalan kuljetus Saksasta Suomeen maksaa noin 200 000 € ja pienemmän, 600 kW voimalan, noin 100 000 €. Tämä vastaa noin kolmasosaa investoinnin hinnasta. (Riiho 2014.)

#### 2.3.4 Pientuulivoima

WWEA:n raportin mukaan vuonna 2011 pientuulivoiman asennetun kapasiteetin määrä maailmalla oli 576 MW, josta 40 % oli Kiinassa ja 35 % Yhdysvalloissa. Kasvua edel-

lisvuoteen kertyi jopa 27 %. Raportin mukaan kasvua on kertynyt etenkin sähköverkon ulkopuolisissa kohteissa, joissa sähköä on perinteisesti tuotettu diesel-generaattoreilla. Polttoaineen hinnan noustessa pientuulivoimasta on tullut näillä alueilla kilpailukykyinen vaihtoehto. (WWEA 2013.)

Pientuulivoimala määritellään IEC 61400-2 standardissa pyyhkäisyypinta-alaltaan alle 200 m<sup>2</sup> kokoiseksi, korkeudeltaan alle 50 m ja lapojen pituudeltaan alle 9 m laitteeksi. Pientuulivoimaloita löytyy markkinoilta laaja kirjo niin pysty- kuin vaaka-akselisiakin malleja. Tyypillisin kohde pientuulivoimalalle on sähköverkon ulkopuolinen kohde, johon oman sähköliittymän rakentaminen ei ole kannattavaa tai mahdollista. (Parkkari & Perkkiö 2011.)



**Kuva 9.** Suomalaisvalmisteisia Windside-tuuliturbiineja kiinalaisella tutka-asemalla (Kuva: Windside Oy).

Pientuulivoimala on myös tavalliselle kuluttajalle mahdollisuus tuottaa omaa ympäristöystävällistä sähköä, mutta taloudellisen kannattavuuden saavuttaminen tarpeeksi hyvillä tuulioloilla on erittäin haastavaa. Hyvätuulisellekin paikalle pystytetyn pientuulivoimalan takaisinmaksuaika olemassa olevan sähköverkon alueella voi venyä kymme-

niin vuosiin (Suoniemi 2014). Pientuulivoimaloista onkin liikkeellä valitettavan paljon huonoja kokemuksia, sillä usein huonosti sijoitetut voimalat eivät tuotakaan sähköä siinä määrin kuten oletettiin.

Lupakäytännöt pientuulivoimaloiden rakentamisen osalta vaihtelevat kunnittain. Tavallisesti pientuulivoimalan rakentaminen edellyttää kaava-alueella rakennus- tai toimenpideluvan ja kaava-alueen ulkopuolella riittää toimenpidelupa. Sähköveron osalta alle 50 kVA:n mikrovoimalaitokset on vapautettu kokonaan maksuvelvollisuudesta. Yli 50 kVA:n, mutta alle 2000 kVA:n voimalat on vapautettu verovelvollisuudesta silloin, kun sähköä ei siirretä verkkoon. Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon vaatii aina luvan paikalliselta verkkoyhtiöltä. (Parkkari ym. 2011.)

Viitteessä Suoniemi (2014) tutkittiin pientuulivoiman soveltuvuutta kuluttajien sähköenergian lähteeksi. Työssä tutkittiin neljää eri puolille Tamperetta asennettua pientuulivoimalaa, joiden tuottoa seurattiin useamman vuoden ajan. Tuloksina havaittiin, että tutkittavilla laitteistoilla sähköenergian hinta oli markkinahintaan nähden moninkertainen, eivätkä investoinnit tulisi maksamaan itseään takaisin ennustetun elinkaarensa aikana. Tutkimuksessa todettiin myös, että tuotto pystyttiin arvioimaan tarkasti teoreettisen analysoinnin pohjalta ja valmistajien antamat tehokäyrät pitivät paikkansa.

Taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto tuulivoimasta kiinnostuneille yksityishenkilöille, joiden kulutuspiste on kytketty sähköverkkoon, olisi liittyminen esimerkiksi tuulivoimaosuuskuntaan. Tällöin pienemmällä sijoituksella on mahdollista päästä osakkaaksi hyviä tuuliolosuhteita hyödyntävän teollisen kokoluokan voimalan tuotantoon. (Wizelius 2010: 4) Yhteisöllisesti omistettuja tuulivoimaloita käsitellään kappaleessa 2.5.

## 2.4 Lainsäädäntö ja määräykset

Tuulivoimaan liittyviä lupakäytäntöjä pidetään yleisesti monimutkaisina ja aikaa vievinä. Kuten muussakin rakentamisessa, myös tuulivoimaloissa tulee ottaa huomioon monia tekijöitä, kuten vaikutukset ympäristöön ja ihmisiin. Ympäristöministeriö on muo-

toillut asian seuraavasti: ”*Tuulivoimarakentamisen ohjauksen tavoitteena on myötävaikuttaa tuulivoimatuotannon lisäämiseen siten, että samalla huolehditaan luonnon ja kulttuuriarvojen säilymisestä sekä ihmisten elinympäristön hyvästä laadusta.*” (Nylund 2013.) Tässä kappaleessa käydään läpi tuulivoimaan liittyviä määräyksiä ja lainsäädännön tärkeimpiä kohtia.

#### 2.4.1 Lupamenettelyt

Maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL 132/1999) asettaa puitteet tuulivoimarakentamisen lupamenettelyille. Tuulivoimalan rakentaminen vaatii aina joko rakennus- tai toimenpideluvan (MRL 125§ ja MRL 126§). Jos alue on osoitettu maakunta- tai yleiskaaressa tuulivoima-alueeksi, voidaan voimala lähtökohtaisesti toteuttaa luparatkaisulla ilman erillistä kaavoitusta. Yksittäisen tuulivoimalan rakennuslupa haetaan kunnalliselta rakennusvalvontaviranomaiselta. (Ympäristöministeriö 2012, STY 2014.)

Tuulivoima-alueen kaavoitus voidaan joissakin tilanteissa korvata suunnittelutarveratkaisulla, jota sovelletaan, kun rakentaminen ei johda alueella vaikutuksiltaan merkittävään rakentamiseen tai aiheuta merkittäviä haitallisia vaikutuksia (MRL 137§ ja MRL 72§). Päätökseen vaikuttavat pääasiassa tuulivoima-alueen sijainti, voimaloiden lukumäärä ja suhde ympäröiviin alueisiin. (Nylund 2013, Ympäristöministeriö 2012).

Muita huomioonotettavia lupia ovat muun muassa ympäristö-, vesi- ja lentoesteluvat, sekä selvitys voimalan vaikutuksesta Puolustusvoimien tutkavalvontaan. ELY-keskuksen myöntämä ympäristölupa tarvitaan, jos voimalan lähistöllä on pysyvää tai loma-asutusta, joille voi koitua naapuruussuhdelaisissa osoitettua kohtuutonta rasisusta melu- tai välkevaikutuksista johtuen. Aluehallintovirastolta haettavaa vesilupaa tarvitaan, jos voimala rakennetaan vesistöön tai se vaikuttaa merkittävästi vesistöihin. Lentoestelupa vaaditaan kaikille yli 30 m korkuisille rakennelmille lentoasemien läheisyydessä ja yli 60 m korkuisille rakennelmille muualla Suomessa. Lentoesteluvan myöntää Liikenteen turvallisuusvirasto Trafí. Tutkavaikutusten arviointi on voitu tehdä kaavoitusvaiheessa joillekin alueille, mikä on mahdollista selvittää kunnalliselta rakennusviranomaiselta. Jos selvitystä ei ole tehty, tulee Puolustusvoimilta pyytää lausunto voimalan vaikutuksista. (Ympäristöministeriö 2012).

Valtioneuvoston asetuksen ympäristövaikutusten arviointimenettelystä (713/2006) mukaan ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA) vaaditaan aina tuulipuistolle, kun yksittäisten laitosten määrä on vähintään kymmenen kappaletta tai kokonaisteho vähintään 30 MW. YVA-menettelyn tavoitteena on hankkeen haitallisten ympäristövaikutusten vähentäminen tai ehkäiseminen sekä huomioon ottaminen suunnittelussa ja päätöksenteossa, sekä kansalaisten tiedonsaannin ja osallistumisen lisääminen. Myös pienemmät tuulivoimahankkeet voidaan määrätä arvioitavaksi YVA-menettelyssä, jos hanke tulee todennäköisesti aiheuttamaan merkittäviä haitallisia ympäristövaikutuksia alueella. ELY-keskus tekee hankkeesta tarveharkintapäätöksen, jossa selvitetään tarvitseeko YVA-menettely suorittaa. Se perustuu alueelta koottuun ympäristöselvitykseen, joka sisältää selvityksen alueen luontoarvoista, maankäytöstä, sekä voimaloiden vaikutuksesta maisemaan ja kulttuuriympäristöön. Lisäksi selvitykseen kuuluu melu- ja välkemallinnukset. (Saari 2015, Ympäristöministeriö 2012).

Yleisradion haastatteleman (9.1.2013) VTT:n erikoistutkija Petteri Antikaisen mukaan tuulivoiman lupaprosessit Suomessa ovat vielä keskeneräisiä. Antikaisen mukaan tuulivoimahankkeen eteneminen aloitusvaiheesta rakentamisen aloittamiseen voi viedä jopa viidestä kuuteen vuotta. (YLE 2013). Lupamenettelyjen sujuvoittamiseksi yksi vaihtoehto voisi olla Lähienergialiitto ry:n ehdottama niin sanottu *yhden luukun palvelu*, jonka avulla varsinkin pientuottajien kohtaamaa byrokratiaa voitaisiin keventää (Suomen Lähienergialiitto ry 2014).

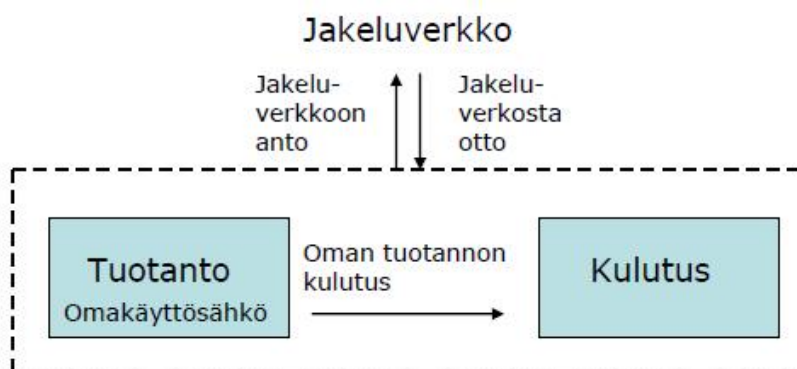
#### 2.4.2 Verkkoonliityntämääräykset

Ennen oman sähköntuotannon aloittamista tulee paikalliseen verkonhaltijaan olla yhteydessä, jotta tuotantolaitoksen soveltuvuudesta liittämipaikkaan voidaan varmistua jo ennen sen hankintapäätöstä. Tällöin verkkoyhtiö pystyy myös hyvissä ajoin valmistautumaan tuotantolaitoksen verkkoon liittämiseen ja mahdollisiin verkon muutostöihin. (Lehto 2011a: 2.)

Energiateollisuus ry on antanut ohjeistuksen tuotantolaitoksen verkkoon liittämisessä huomioitavista määräyksistä. Kun tuotantolaitos liitetään sähköverkkoon, tehdään siitä yleensä paikallisen verkkoyhtiön kanssa tuotannon liittymissopimus. Liittymissopimuk-

sen tarve arvioidaan tapauskohtaisesti. Energiateollisuus ry on antanut suositukset tuotannon verkkoon liittämisen ehdoista (TLE11), joita sovelletaan tuotannon liittymissopimuksessa. Kun voimalaitoksen tuottama energia voidaan siirtää osin tai kokonaan sähköverkkoon, tulee siitä tehdä verkkopalvelusopimus sähköverkonhaltijan kanssa. Tässä sopimuksessa sovelletaan Energiateollisuus ry:n suosittelemia yleisiä verkkopalveluehtoja (VPE10). (Lehto 2011a: 1–2.)

Pientuottajan sähkönmittaustapa on määritetty laissa siten, että enintään 3 x 63 A pääsulakkeella varustetuilla sähkönkäyttöpaikoilla riittää, kun liittymispisteessä mitataan verkosta otetut ja verkkoon syötetyt tuntienergiat erikseen. Yli 3 x 63 A käyttöpaikoilla tulee mitata lisäksi omakäyttösähkön osuus, jolla tarkoitetaan tuotantoyksikön omaa sähkönkulutusta. Käyttöpaikan sähkönkulutusta vähennettynä omakäyttösähkön osuudella kutsutaan oman tuotannon kulutukseksi. (Motiva 2012: 21, Lehto 2011a: 4.) Edellä esiteltyt termit on havainnollistettu kuvassa 10.



**Kuva 10.** Mitattavat suureet liittämispisteessä, jossa on sekä sähkönkulutusta että tuotantoa. Katkoviivalla rajattu alue kuvaa sähköliittymää. (Lehto 2011a: 4.)

Verkkoon kytkettävien tuulivoimaloiden tulee teknisesti täyttää Fingridin määrittelemät voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV). Vaatimukset koskevat kaikkia Suomen sähköjärjestelmään kytkettyjä ja kytkettäviä voimalaitoksia, joiden mitoitusteho on vähintään 0,5 MW. Erilliskäytössä, eli verkosta irrallaan, toimivien voimalaitosten ei tarvitse täyttää kyseisiä vaatimuksia ellei niitä tahdisteta sähköjärjestelmään. (Fingrid 2013.)



Sähköverkkoyhtiöitä sitovat Sähkömarkkinalaissa niille asetetut velvoitteet, joista pien-tuottajan kannalta tärkeimpiä ovat kehittämis-, liittämisen- sekä siirtovelvollisuus. Kehit-tämisvelvollisuus sitoo verkonhaltijaa ylläpitämään, käyttämään ja kehittämään verkko-aan asiakkaiden kohtuullisten tarpeiden mukaisesti ja turvaamaan riittävän hyvälaatui-sen sähkön saanti asiakkaalle. Liittämisenvelvollisuus velvoittaa verkonhaltijan liittämään verkkoonsa tekniset vaatimukset täyttävät voimalaitokset ja käyttöpaikat. Siirtovelvol-lisuus puolestaan velvoittaa verkonhaltijaa myymään sähkönsiirtopalveluita niitä tarvit-seville verkkonsa siirtokyvyn rajoissa kohtuullista korvausta vastaan. Nämä velvolli-suudet on säädetty Sähkömarkkinalakiin, koska Suomessa sähköverkkoliiketoiminnassa vallitsee luonnollinen monopoli. Velvollisuuksien noudattamista valvoo Suomessa Energiavirasto. (Motiva 2012: 18.)

#### 2.4.3 Tuulivoimatuotannon verotus

Sähköntuotannosta maksetaan sähkövero, joka pitää sisällään valmisteveron ja huolto-varmuusmaksun. Tuotantolaitoksella ei ole kuitenkaan sähköverovelvollisuutta, jos ge-neraattorin teho on alle 50 kVA, tai alle 2000 kVA ja sähköä ei siirretä lainkaan verk-koon. Huomionarvoista kuitenkin on, että kun sähköä myydään verkkoon, eli käytän-nössä sähköyhtiölle, ei sähkön tuottaja maksa lainkaan sähköveroa, vaikka generaattorin teho ylittääkin 50 kVA rajan. Tällöin sovelletaan sähköverolain 7§, jonka mukaan säh-köverkkojen välillä siirretty tai verkkoon luovutettu sähkö on verovapaata. Tuottaja on tällöin kuitenkin ilmoitusvelvollinen ja sähköveroilmoitus on tehtävä alueen tullipiirille kuukausittain. (Tulli 2014: 9–10, Suoninen 2014.)

Kun edellä mainittu sähköverovelvollisuuden raja ylitetään, noudatetaan oman kulutuk-sen osalta seuraavaa periaatetta. Oman tuotannon kulutus, eli itse kulutusasteella käy-tetty osuus tuotannosta, on verotettavaa. Verotonta kuitenkin on omakäyttösähkö, eli tuotantolaitoksen omakäyttölaitteiden kuluttama sähkö. Kyseiset termit havainnollistet-tiin kuvassa 10. (Motiva 2012: 14.)

Vuoden 2014 loppupuolella Suomen hallituksen esityksessä (HE 349/2014) esitettiin pientuotannon verotuksen ulkopuolelle jäävän tuotannon nimellistehon rajan nostamista 100 kVA:iin. Lisäksi ehdotettiin vuosituotannoltaan alle 800 MWh voimalaitosten va-

pauttamista verovelvollisuudesta. Ehdotuksen tavoitteena on lisätä sähkön pientuotannon kannattavuutta.

Tuulivoimaloista maksetaan kunnalle kiinteistövero, kuten muistakin rakennuksista. Maksettavan veron määrä perustuu verotusarvoon, joka määräytyy jälleenhankinta-arvon ja siitä tehtävien ikäalennusten perusteella. Jälleenhankinta-arvoksi määritellään 75 % vastaavan rakennelman rakennuskustannuksista, joihin lasketaan perustukset, torni ja konehuone. Vuotuinen ikäalennus on 2,5 % ja verotusarvo on vähintään 40 % alkuperäisestä jälleenhankinta-arvosta. Itse kiinteistöveroprosentti määräytyy tuulivoimalan sijaintikunnan perusteella. Kiinteistöverolain mukaan kunnanvaltuusto voi erikseen määrätä veroprosentin, jota sovelletaan voimalaitokseen ja siihen kuuluviin rakennuksiin. Tällöin veroprosentiksi voidaan määrätä enintään 2,85. (Verohallinto 2014.) Taulukossa 4 on esitetty esimerkki kiinteistöveron kertymisestä tilanteessa, jossa 3 MW rakennuskustannuksiksi oletetaan miljoona euroa ja kiinteistöveroksi 1 %. Tällöin veron perusteena käytettävä jälleenhankinta-arvo on ensimmäisenä vuotena 750 000 €

**Taulukko 4.** Esimerkkilaskelma yksittäisen 3 MW tuulivoimalan kiinteistöveron määräytymisestä.

	<b>Kiinteistövero</b>
Vuosi 1	7 500 €
Vuosi 5	6 780 €
Vuosi 10	5 970 €
Vuosi 20	4 640 €
20 vuotta yhteensä	119 000 €

Kiinteistövero on yksi tuulivoiman alueelle tuomista tuloista, mikä osaltaan lisää tuulivoiman yleistä hyväksyntää, koska myös paikalliset asukkaat hyötyvät osaltaan rakennettavasta tuulivoimasta.

## 2.5 Omistussuhteet

Tuulivoimaloiden omistusmuodoille on Suomessa muutamia erilaisia vaihtoehtoja, jotka sopivat eri tilanteisiin. Suomessa tunnetuista viidestä yhtiömuodosta laajamittaiseen tuulivoimatuotantoon sopivat osakeyhtiö ja osuuskunta. Erityisesti omaan käyttöön tarkoitettu pienimuotoisempi tuotanto sopii hyvin myös yksityiselle elinkeinonharjoittajalle. Yritysmuodon valintaan vaikuttavat myös muut tekijät, kuten perustajien lukumäärä, pääoman tarve sekä se, halutaanko tuottaa edullista sähköä omaan käyttöön vai saada pääomalle tuottoa sähkön myynnillä. (Koskinen 2012.)

Vuoden 2011 tilastojen mukaan 48 % Suomen tuulivoimakapasiteetista oli sähköyhtiöiden omistamaa, 39 % kuluttajaomisteista ja loput 13 % teollisuuden omistuksessa (Turkia & Holttinen 2013). Vuoden 2011 ja 2014 välillä tuulivoimakapasiteetti on yli kaksinkertaistunut, lähinnä tuotantoon saatujen tuulipuistojen ansiosta, minkä vuoksi sähköyhtiöomisteisten tuulivoimaloiden osuus on todennäköisesti vuodesta 2011 kasvanut.

Muualla Euroopassa yhteisöllisesti omistetut tuulivoimalat ovat Suomeen verrattuna selvästi yleisempiä. Suomalaisista energiaosuuskunnista vain yksi on tuulivoiman tuottaja ja sekin sijaitsee Ahvenanmaalla. (Koskinen 2012.) Pohjanmaalle perustettiin tuulivoimaosuuskunta vuonna 2013, mutta sillä ei ole vielä käytössä omaa tuulivoimakapasiteettia. Yhteisöllisesti omistettujen tuulivoimaloiden on usein havaittu vaikuttavan positiivisesti alueen asukkaiden suhtautumiseen tuulivoimaa kohtaan, koska tällöin paikalliset pääsevät hyötymään enemmän lähialueellaan tapahtuvasta energiantuotannosta (Koskinen 2012).

Yksityisen elinkeinonharjoittajan näkökulmasta tuulivoimatuotanto voi olla kannattavaa ensisijaisesti omaan käyttöön mitoitettulla tuotannolla. Tällöin omasta sähkönkulutuksesta säästää energian ja siirtomaksun hinnan, sekä alle 50 kVA:n järjestelmissä myös sähköveron osuuden. Tämän ansiosta tuulivoimalainvestoinnin takaisinmaksuaika lyhenee merkittävästi. (Koskinen 2012).

Yksityisellä elinkeinonharjoittajalla alkuinvestoinnin suuruus ja liiketoimintariski ovat usein esteenä kaupallisen tuulivoimatuotannon harjoittamiselle (Koskinen 2012). Parempien tuuliolosuhteiden hyödyntäminen korkeammilla voimaloilla ja syöttötariffin

piiriin pääseminen voi olla yksityiselle elinkeinonharjoittajalle mahdotonta, mutta kannattavaan tuotantoon on mahdollista päästä myös käytetyllä voimalla, kun tarkoituksena on tuottaa sähköä omaan käyttöön.

Osakeyhtiön perustaminen tarjoaa hyvät lähtökohdat kaupalliseen tuulivoimatuotantoon. Tarpeeksi suuren pääoman kerääminen megawatti-luokan tuulivoimalan investointiin on mahdollista laajalta omistajapohjalta ja omistajien riski rajoittuu sijoitettuun pääomaan. Osakeyhtiössä omistajien tuotto koostuu yleensä sijoitetulle pääomalle maksettavasta osingosta, mutta ei tarjoa mahdollisuutta omakustannushintaisen sähkön myymistä osakkaille. (Koskinen 2012).

Osuuskuntamallin käyttö tuulivoimatuotannon pohjana tarjoaa monia etuja ja erilaisia mahdollisuuksia omistajilleen hyötyä voimalansa tuotosta. Patentti- ja rekisterihallitus (PRH) määrittelee osuuskunnan seuraavasti: ”*Osuuskunnan toiminnan tarkoituksena on jäsenten taloudenpidon ja elinkeinon tukemiseksi harjoittaa taloudellista toimintaa siten, että jäsenet käyttävät hyväkseen osuuskunnan tarjoamia palveluita.*” Tuulivoimaosuuskunta voi käytännössä tarjota osakkailleen sähköä omakustannushintaan tai osakeyhtiön tavoin maksaa korkoa sijoitetulle osuuspääomalle (Koskinen 2012).

Koskinen (2012) esittelee kolme mallia, joita Ruotsissa käytetään tuulivoimaosuuskunnissa. Perinteisessä mallissa osuuskunta myy kaiken tuottamansa sähkön sähköyhtiölle. Omakustannushintamallissa sähköyhtiö ostaa kaiken osuuskunnan tuottaman sähkön ja myy osuuskunnan jäsenille omakustannushintaan heidän tarvitsemansa sähkön. Nettovähennysmallissa sähköyhtiö vähentää osuuskunnan jäsenten sähkölaskusta suoraan osuuskunnan tuottaman sähkön osuuden jäsenten osuuksien suhteessa. Tuulivoimaosuuskunta tarvitsee käytännössä aina kumppanikseen sähköyhtiön, jolla on tasevastuu tuotettavasta sähkön määrästä. Vastaavien toimintatapojen toteuttaminen onnistuisi Suomessakin hyvin, koska Ruotsin lainsäädännön määrittelemä taloudellinen yhdistys vastaa hyvin Suomen lainsäädännössä määriteltyä osuuskuntaa ja Ruotsissa on jo pitkään harjoitettu tuulivoimaosuuskuntatoimintaa tältä pohjalta. (Koskinen 2012.)

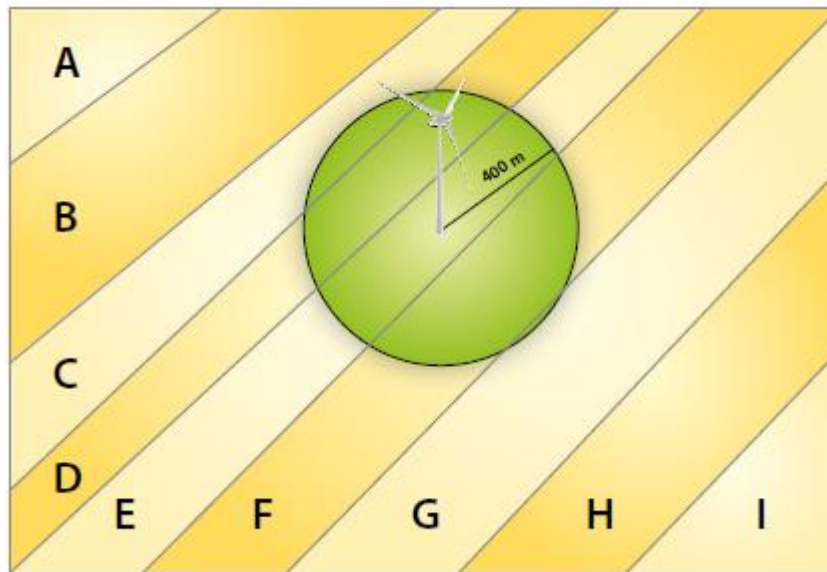
## 2.6 Tuulivoiman paikalliset vaikutukset

Tuulivoiman vaikutukset paikallisella tasolla ovat erittäin moniulotteisia ja niitä tarkasteltaessa olisikin tärkeää hahmottaa vaikutusten kokonaiskuva. Parkkila (2013) jakaa tuulivoiman paikalliset vaikutukset kolmeen ulottuvuuteen kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti: sosiaaliseen, taloudelliseen ja ekologiseen. Tässä työssä keskitytään tuulivoiman aluetaloudellisiin vaikutuksiin, mutta yhtäläillä tärkeät sosiaaliset ja ekologiset vaikutukset käydään läpi.

### 2.6.1 Vaikutus aluetalouteen

Tuulivoimatuotannolla on useita positiivisia vaikutuksia paikalliseen aluetalouteen. Rakennusvaiheessa tuulivoiman työllistävä vaikutus on merkittävä ja tuotannon alettua tuulivoimala tuottaa alueelle pääasiassa pääomatuloja kiinteistöverona ja vuokratuloina. Lisäksi, jos tuulivoimalalla on paikallista omistusta, se tuo myös osaltaan lisätuloja alueelle. Tuontienergian korvaaminen on myös yksi positiivisista vaikutuksista, mutta sen merkitys näkyy enemmän kansantalouden mittakaavassa energiataseen ja energiaomavaraisuuden parantumisena.

Kaupallinen tuulivoimala, joka on rakennettu vuokratulle maa-alueelle, tuottaa maanomistajille tuulivoimayhtiöstä riippuen noin 10 000 euroa vuokratuloja vuodessa (Niemi 2012). Ministeri Lauri Tarasti esittää selvityksessään (2012), että korvaus maanvuokras- ta maksetaan kuvassa 11 esitetyn periaatteen mukaan niin sanotun tuulenottoalueen maanomistajille. Jos vuokraa maksettaisiin pelkästään sille maanomistajalle, kenen ton- tille voimala rakennetaan, olisi se epäoikeudenmukaista naapureita kohtaan, koska voi- mala vaikuttaa myös heidän mahdollisuuteensa vuokrata tai käyttää itse maataan tuuli- voima- tai muuhun rakentamiseen. Tarasti esittääkin selvityksessään Suomeen yhtenäi- siä menettelytapoja tuulivoimalan maanvuokraukseen liittyen. Tarastin selvityksessä ehdotetaan, että tuulivoimalaa suunnitteleva toiminnanharjoittaja tekee maankäyttöso- pimuksen paitsi maanomistajan, jonka maalle voimala rakennetaan, myös läheisyydessä olevin maanomistajien kanssa. Lisäksi korvauksissa pitäisi yhtäläillä huomioida maan- omistajat, joiden maalle rakennetaan tuulivoimalan tarvitsemaa tiestöä tai siirtojohtoja.



**Kuva 11.** Esimerkki tuulenottoalueen määräytymisestä. Tässä tapauksessa tuulenottoalue ulottuu kiinteistöihin C, D, E, F ja G käsittäen yhteensä noin 50 hehtaaria. (SLC 2013.)

Kiinteistöverotulot ovat merkittävä lisä kunnan taloudelle ja maa-alueen vuokratulot voivat jopa kolminkertaistaa metsänomistajan tuotot metsänhoitoon verrattuna. Taulukossa 5 on laskettu 3 MW kaupallisen tuulivoimalan alueelleen tuomat tuloja ensimmäisen 12 vuoden aikana, eli ajanjaksona kun sille maksetaan syöttötariffia, sekä 20 vuoden arvioidun käyttöiän aikana. Vuokratulojen laskennassa on käytetty aikaisemmin mainittua 10 000 €/vuosivuokraa. Kiinteistöveron laskennassa käytettiin sivulla 31 mainittuja kiinteistöveron laskenta-arvoja: 75 % verotusarvo, 2,5 % ikälennus ja 1 % kiinteistövero.

**Taulukko 5.** 3 MW tuulivoimalan tuomat paikalliset kiinteistövero- ja vuokratulot.

	<b>12 vuotta</b>	<b>20 vuotta</b>
Kiinteistövero	78 600 €	119 000 €
Vuokra maanomistajille	120 000 €	200 000 €
<b>Yhteensä</b>	<b>198 600 €</b>	<b>319 000 €</b>

Teknologiateollisuus ry:n (2009) mukaan 100 MW tuulipuiston työllistävä vaikutus on yhteensä 1180 henkilötyövuotta (htv), jotka jakautuvat seuraavasti:

- Projektikehitys ja asiantuntijapalvelut 10 htv
- Infrastruktuurin rakentaminen ja asentaminen 70 htv
- Käyttö ja kunnossapito 20 vuotta 800 htv
- Voimaloiden valmistus, materiaalit, komponentit ja järjestelmät 300 htv.

Arvio täsmää hyvin Ruotsissa Havnäsin tuulipuistosta saatuihin kokemuksiin, joiden mukaan 95,4 MW tuulipuisto työllisti projektivaiheessa 50 htv ja rakennusvaiheessa 964 htv. Paikallisen työllistävyyden osuudeksi arvioitiin 267 htv. Näin suureen paikalliseen työllistävyyteen on mahdollista päästä käyttämällä rakennusvaiheessa mahdollisimman paljon paikallisten yrittäjien palveluita. (Parkkinen 2013.)

Työ- ja elinkeinoministeriön (TEM 2009) raportissa arvioidaan, että Suomen tavoitteena oleva 2 500 MW edellyttää noin 3,5 miljardin euron investointeja, josta kotimaisen työn osuus on kotimaisuusasteesta riippuen 1,9–2,5 miljardia euroa, eli 55–70 %. Hankkeen kotimaisuusaste voidaan eritellä seuraavasti:

- Hankkeissa, joissa käytetään ulkomaista valmistetta olevia tuulivoimalaitoksia, joissa ei ole suomalaista teknologiaa kotimaisuusaste voi jäädä tasolle 35–40 %.
- Hankkeissa, joissa käytetään ulkomaista valmistetta olevia voimalaitoksia, joissa on suomalaista teknologiaa, kotimaisuusaste on noin 50 % tai sen yli.
- Hankkeissa, joissa käytetään kotimaista valmistetta olevia tuulivoimalaitoksia, joissa on suomalaista teknologiaa, kotimaisuusaste voi nousta 80 % tasolle.

Tuulivoimayhtiö 3DWS Oy:n tuoreen arvion mukaan nykyisissä tuulivoimahankkeissa kotimaisen ja paikallisen työllistävyyden osuus on suurempi kuin yleisesti uskotaan. Taulukossa 6 on esitetty arvio tuulivoimalan keskimääräisistä työllisyysvaikutuksista voimalan elinkaaren aikana. Laskelmassa ei ole huomioitu itse voimalan valmistusta, eikä rakentamisen välillisiä vaikutuksia, kuten majoitus-, ravitsemus- ja virkamiestöitä. (Gurvits 2014.)

**Taulukko 6.** Tuulivoimalan keskimääräiset työllisyysvaikutukset (Gurvits 2014).

	<b>Kokonaisuus</b>	<b>Kotimainen htv (%)</b>	<b>Paikallinen htv (%)</b>
Valmistelu	0,1	0,1 (87 %)	0,0 (18 %)
Asennus	1,4	1,4 (76 %)	0,6 (45 %)
Käyttö	6,1	4,5 (75 %)	1,7 (28 %)
Purku	0,3	0,2 (80 %)	0,1 (30 %)
Yhteensä	7,9	5,9 (75 %)	2,4 (31 %)

Kotimaisen ja paikallisen työvoiman suhteelliset osuudet ovat merkittäviä, koska ulkomaisetkin toimijat ovat viimeaikoina palkanneet työvoimaa Suomeen. 3DWS Oy:n Feodor Gurvits painottaakin, että lähivuosina Suomeen rakennettavat tuulivoimaloiden osalta puhutaan noin 1,9 miljardin euron markkinoista, josta suomalaisyritykset voivat saada helposti reilun miljardin osuuden. Työllisyyden osalta tämä tarkoittaisi jopa 3 000 henkilötyövuotta. (Gurvits 2014.) Kokonaisuuden kotimaisuusastetta tietenkin vääristää hieman itse voimalan valmistamisen puuttuminen arviosta. Kotimaisen työllisyyden absoluuttinen osuus on kuitenkin merkittävämpi, kuin mitä esimerkiksi mediassa joskus annetaan ymmärtää.

Käytettyjen voimaloiden työllistävä vaikutus rajoittuu rakennusvaiheen jälkeen läheltä pelkästään voimalan omistavaan tahoon, joka joissain tapauksissa hoitaa voimalan huollonkin itse. Rakennusvaiheessa voimala työllistää monen alan ammattilaisia aina maanrakennusurakoitsijoista metsureihin ja sähköalan ammattilaisiin.

### 2.6.2 Ympäristövaikutukset

Merkittävin tuulivoiman positiivisista ympäristövaikutuksista on energiantuotannon hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöjen väheneminen. Se, paljonko päästöt vähenevät, riippuu siitä, mitä energiantuotantoa tuulivoimalla korvataan. Tuulivoiman omat päästöt kokosen elinkaarena tuotettua kilowattituntia kohden ovat noin 11 hiilidioksidiekvivalenttigrammaa (gCO<sub>2</sub>eq/kWh), mikä on alhaisimpia nykyisin käytössä olevista energiantuotantomuodoista. Taulukossa 7 on esitetty vertailuksi muiden energiantuotantomuotojen elinkaaripäästöjä. Suurin osa tuulivoiman, samoin kuin esimerkiksi ydinvoiman, hiilidi-



oksidipäästöistä aiheutuu ennen tuotannon alkamista valmistamisen, kuljetuksen ja rakentamisen päästöistä. (STY 2014).

**Taulukko 7.** Eri energiantuotantomuotojen elinkaaripäästöt (IPCC 2014: 10).

	<b>gCO<sub>2</sub>eq/kWh min / mediaani / max</b>
Kivihiili	740 / 820 / 910
Maakaasu	410 / 490 / 650
Aurinkosähkö	18 / 48 / 180
Vesivoima	1,0 / 24 / 2200
Ydinvoima	3,7 / 12 / 110
Tuulivoima (meri)	8,0 / 12 / 35
Tuulivoima (maa)	7,0 / 11 / 56

VTT:n tekemän tutkimuksen mukaan lisääntyvä tuulivoima korvaa aluksi pääasiassa hiiltä käyttävää tuotantoa. Tällöin päästövähennys on noin 620–700 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. Jos hiilivoima kiellettäisiin tulevaisuudessa esimerkiksi ilmastosyihin vedoten, korvaisi tuulivoima pääasiassa maakaasua käyttäviä laitoksia. Tuulivoiman korvatesa kaasuun perustuvaa tuotantoa on päästövähennys noin 300 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. (Holttinen & Tuhkanen 2004).

Tuulivoimarakentamisella on myös negatiivisia ympäristövaikutuksia, kuten kaikella muullakin energiantuotannolla ja rakentamisella ylipäänsä. Rakennuksen kohteena olevalle alueelle aiheutuu tilapäistä ja pysyvää elinympäristön menetystä, kun maa-alueita joudutaan muokkaamaan. Lisäksi huonosti sijoitettu tuulivoimala aiheuttaa törmäysriskin sekä häirintä- ja estevaikutusta linnuille. (STY 2014, Parkkila 2013: 25–27). WWF (2007) huomauttaa kuitenkin kannanotossaan, että tuulivoiman ympäristövaikutukset tulisi aina suhteuttaa muun energiantuotannon vaikutuksiin.

Tuulivoimaloiden aiheuttama törmäysriski linnuille arvioidaan eri tutkimuksissa yleisesti ottaen pieneksi. Suurin riski on havaittu manner- ja saaristoympäristön tuulipuistoissa, jotka sijaitsevat petolintujen reviirillä tai muuttolintujen reiteillä. Voimaloiden oikealla sijoittelulla onkin erittäin suuri merkitys törmäysriskin vähentämisessä. Ajoksen tuulipuiston alueella vuosina 2008–2010 tehdyn seurannan aikana havaittiin yhden

telkän törmänneen tuulivoimalarakenteisiin. Muutamia eri lintulajeja huomattiin lentävän voimalan lapojen pyörimisalueelle, mutta linnut onnistuivat kuitenkin välttämään törmäyksen väistämällä pyörivät lavat. Tanskalaisen Smølan tuulipuiston alueella lintukuolemia on havaittu selvästi enemmän. Syyksi arvellaan ennen kaikkea heikkolaatuista ympäristövaikutusten arviointimenettelyä ja ennakkoseurainta ennen rakentamista. Alueella tiedettiin pesivän 19 merikotkaparia, minkä johdosta puiston rakentaminen on aiheuttanut suurta kritiikkiä jälkikäteen. Tutkimuksissa on havaittu merikotkan ja muiden petolintujen havaitsevan pyörivät tuulivoimalan lavat muita lajeja huonommin, eivätkä ne häiriinny tai aktiivisesti väistä voimaloita. Tätä pidetään pääasiallisena syynä petolintujen törmäyskuolemiin. (Pöyry 2011: 9–11.)

Elinympäristön menetystä tuulivoimarakentaminen voi aiheuttaa suoraan tuhoamalla olemassa olevan elinympäristön tai vaikuttaa epäsuorasti häirinnän kautta. Elinympäristön menetyksen merkittävyys riippuu siitä, löytyykö alueen eliöstölle korvaavaa elinympäristöä lähietäisyydeltä. Eri lajit sopeutuvat uuteen ympäristöön eri tavoin ja kapeamman ekolokeron lajeilla elinympäristön muutokset ovat merkittävämpiä. Tutkimustuloksia elinympäristön menettämisestä löytyy ruotsalaisen merituulipuiston alueelta, jossa monien lintulajien havaittiin siirtyneen muualle ruokailemaan ja lepäämään menetettyään aiemman elinympäristönsä. Merituulipuiston vaikutuksia elinympäristöön on usein verrattu metsän kaatamisen tai suon ojituksen vaikutukseen mannerluonnossa. (Pöyry 2011: 8).

Ympäristön kannalta hyvänä lähtökohdana tuulivoimaloiden sijoittamiselle STY pitää Suomen luonnonsuojeluliiton myöntämän Ekoenergia-merkin kriteerejä. Ekoenergia-merkki voidaan myöntää tuulivoimalalle, jos se ei sijoitu luonnonsuojelualueelle, valtakunnallisesti ja maakunnallisesti arvokkaille maisema-alueille, kulttuuriperintöalueille tai kansainvälisesti ja valtakunnallisesti merkittävillä lintualueilla. (STY 2014). Lisäksi tuulivoimatuotantoalueen sijoittamisen tulisi perustua kattavaan ympäristöarviointimenettelyyn, jonka yhteydessä tehdään riittävät linnustoselvitykset (Pöyry 2011: 27).

### 2.6.3 Sosiaaliset vaikutukset

Tuulivoiman sosiaalisilla vaikutuksilla tarkoitetaan sen vaikutusta ihmisiin ja ihmisten hyvinvointiin (Parkkila 2013: 9). Taloudellisilla vaikutuksilla on myös sosiaalinen aspektinsa, mutta tässä kappaleessa keskitytään ihmisten asuinympäristöön ja hyvinvointiin vaikuttaviin tekijöihin. Merkittävimpinä sosiaalisina vaikutuksina voidaan pitää tuulivoimalan vaikutusta maisemaan, sekä sen aiheuttamaa melua ja välkevaikutusta.

Tuulivoimaloiden vaikutus maisemaan on usein suurin syy ihmisten vastustukseen tuulivoimahankkeissa. Tuulipuistojen sijoittaminen ympäri Suomea onkin herättänyt kiihkeitä keskusteluja kunnissa. Maisema-arvojen merkitys on jokaisen ihmisen henkilökohtainen asia, samoin kuin se sopivatko tuulivoimalat heidän paikkakuntansa maisemaan. Mielipiteisiin ja tuulivoiman häiritsevyyteen vaikuttaa vahvasti ihmisten yleinen suhtautuminen tuulivoimaan. Tuulivoimatuotannon tulisi kuitenkin aina perustua paikalliseen hyväksyntään. Tämän huomioonottaminen jo suunnitteluvaiheessa on myös tuulivoimayhtiön etu, kun myöhemmiltä konflikteilta paikallisten asukkaiden kanssa voidaan välttyä.

Jo ennestään ihmisen tekemiä rakennelmia sisältävien maisemien katsotaan sietävän paremmin tuulivoimaloita. Koskemattoman ympäristön ja tuulivoimaloiden välillä maisemallinen ristiriita usein on suurempi. (Tuulivoimaopas 2014.) Suunnitteluvaiheessa tuulipuistoista tehdäänkin maisemaselvityksen yhteydessä visualisointeja, joiden avulla on mahdollista saada kuva siitä, miltä maisema näyttäisi tuulipuiston toteutuessa.

Pöyry (2011) suosittelee maiseman kannalta parhaiksi sijoituspaikoiksi alueita, joissa on jo ihmisen rakentamaa infrastruktuuria tai voimakkaasti muokattua talousmetsää. Virkistysalueiden ja vapaa-ajanasuntojen läheisyydessä maisemaan liittyvät arvot koetaan merkittävämmiksi ja tuulivoiman vastustaminen siihen vedoten on ymmärrettävää.

Tuulivoimalan käyntiääni koostuu lapojen aerodynaamisesta melusta sekä matalataajuisesta sähköntuotantokoneiston aiheuttamasta melusta. Aerodynaaminen melu on näistä hallitseva, ja jaksollisesta luonteestaan johtuen sitä voidaan pitää häiritsevimpänä. Jaksollinen käyntiääni on seurausta siiven pyörimisen aiheuttamasta doppler-ilmiöstä. Toisin sanoen äänen lähteenä olevan pyörivän siiven etäisyys kuulijasta vaihtelee ajan

funktiona. Lisäksi jaksolliseen meluun vaikuttaa maston ja lavan välinen ohitusmelu, joka aiheutuu lavan ja tornin väliin jäävän ilman puristumisesta. (Di Napoli 2007: 9.)

Helmikuussa 2014 astui voimaan Ympäristöministeriön uusi ohjeistus tuulivoimaloiden melun mallintamisesta ja mittaamisesta. Ympäristönsuojelulaissa (86/2000) melu tarkoittaa ympäristön pilaantumista aiheuttavaa päästöä. Lakiin on myös määritelty selvitysohjeellisyys, jonka nojalla toiminnan harjoittajan tulee olla riittävästi selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista, -riskeistä ja haitallisten vaikutusten vähentämismahdollisuuksista. (Ympäristöministeriö 2014: 3.)

Tarasti (2012) toteaa, että valtioneuvoston päätöstä melutason ohjearvoista (VN 993/1992) ei voida suoraan soveltaa tuulivoimamelun häiritsevyyden arviointiin melun luonteesta johtuen. Näiden ohjearvojen käyttäminen tuulivoimasuunnittelussa voi johtaa liian suureen meluhäiriöön. Ulkomelutason suunnitteluohjearvot määritetään keskiäänitasona erikseen päivä- ja yöajan osalta. Kyseiset arvot pysyvää asumista sisältävillä alueilla ja virkistysalueilla ovat 45 dB ja 40 dB. Loma-asumiseen käytettävillä alueilla, luonnonsuojelu- ja leirintäalueilla vastaavat arvot ovat 40 dB ja 35 dB. Mikäli tuulivoimalan ääni on luonteeltaan erityisen häiritsevää, lisätään laskenta- tai mittaustulokseen 5 dB.

Muihin Euroopan maihin verrattuna Suomen maapinta-ala on huomattavan suuri asukaslukuun nähden, eikä Tarastin (2009) mukaan suomalaisille tuulivoiman rakentamiskeinon ole kansainvälisesti verrattuna useinkaan perusteita. Tarasti painottaakin poliittisen ohjauksen merkitystä tuulivoiman lisärakentamisen esteiden poistamiseksi ottaen kuitenkin huomioon melu ja muut haittavaikutukset.

Tuulivoimalan välkevaikutuksella tarkoitetaan voimalan lapojen pyörimisen aiheuttamaa varjon välkkymistä, kun aurinko paistaa voimalan takaa. Välkevaikutus voi olosuhteista riippuen ulottua jopa 1–3 km etäisyydelle voimalasta. (Ympäristöministeriö 2012: 61.)

## 2.7 Tuulivoiman yleinen hyväksyttävyyden

Ympäri maailmaa saatujen kokemusten perusteella yhteisöllisesti omistetut tuulivoimalat saavuttavat paikallisten asukkaiden hyväksynnän kaupallisia helpommin. Tuulivoimalan rakentaminen on alueen ihmisille aina näkyvä ja pysyvä muutos heidän elinympäristöönsä. Alueen asukkaiden mahdollisuus osallistua tuulivoimaprojektin kaikkiin vaiheisiin ja taloudellisen hyödyn saavuttaminen vaikuttavat merkittävästi tuulivoiman yleiseen hyväksyttävyyteen. Myös tieto siitä, että päätökset tehdään paikallisten toimesta ulkopuolisten yritysten sijaan, vaikuttaa voimakkaasti ihmisten mielipiteisiin. (Koskinen 2012, GWEA 2012). Lisäksi osuusomistus lisää alueen yhteisöllisyyttä, kun ihmiset pääsevät työskentelemään yhteisen päämäärän saavuttamiseksi. Sørensenin (2009) mukaan paikallisten ihmisten ottaminen mukaan tuulivoimaprojekteihin kannattaa, vaikka se vaatiikin runsaasti aikaa ja resursseja. Paikallisten ihmisten vastustus voi viivästyttää ja estää kokonaisia tuulivoimahankkeita, joten paikallisten osallistuminen niihin on kaikkien etujen mukaista.

Yhteisöllisesti omistettuja tuulivoimaloita on ollut Saksassa jo pitkään. Hyvä esimerkki Saksalaisesta tuulivoimaosuuskunnasta, ja sen hyödyistä on osuuskunnan omistama Lübke-Koogin kylän tuulipuisto. Ensimmäiset voimalat nousivat kylään jo 1992, kun 44 osakkaan toimesta rakennettiin 14 voimalaa. Vuonna 1999 voimaloiden määrä oli jo 32. Lübke-Koogissa asukkaat ovat olleet mukana projekteissa alusta asti, minkä ansiosta erimielisyydet on voitu hoitaa jo suunnittelun alkuvaiheessa. Vuoteen 2012 mennessä kaikki kylän voimalat oli vaihdettu uusiin ja 95 % kylän asukkaista oli sijoittanut varojaan niihin. Kyläyhteisökin on hyötynyt merkittävästi tuulivoimatuotannosta kunnille tai yhteisöille maksettavan myyntiveron ansiosta. Verovaroilla on rakennettu kylään muun muassa tievalaistusta. Tuulivoimaosuuskunta on myös erikseen avustanut rahallisesti paikallisia hankkeita, joilla tuetaan lapsia, nuoria ja kehitysvammaisia. (GWEA 2012.) Vastaavien esimerkkien avulla tuulivoiman yleistä hyväksyttävyyttä voidaan parantaa muuallakin ja samalla poistaa yksi suurimmista tuulivoiman lisärakentamisen esteistä.

Ruotsissa vuonna 2014 käytössä olevasta tuulivoimakapasiteetista 4 % oli osuuskuntien omistuksessa. Wizeliuksen (2014) mukaan tuulivoiman paikallinen omistus oli kuitenkin merkittävä. Voimaloiden omistajina on niin yksityishenkilöitä ja maanviljelijöitä

kuin yhteisöjen omistamia yrityksiäkin. Tällä tavoin paikallisen omistuksen osuus nousee jopa 40 %:iin ja tuulivoiman taloudellisista tuotoista hyödytään paikallisesti ilman osuuskuntiakin.

Tanskassa tuulivoimatuotanto lähti 80- ja 90-luvulla käyntiin juuri osuuskuntien ansiosista. Sittemmin niiden merkitys on kuitenkin vähentynyt. Vuonna 2009 Tanskassa asetettiin uusi laki, jonka avulla on tarkoitus lisätä paikallisten osallistumista tuulivoimaprojekteihin ja antaa paikallisille mahdollisuus päästä hyötymään voimaloiden tuotannosta taloudellisesti. Laki velvoittaa tuulivoimayhtiötä tarjoamaan 20 % osuutta tuulivoimalan omistuksesta 4,5 km säteellä asuville omakustannushintaan. Jos kaikki osuudet eivät mene kaupaksi asukkaille, tulee niitä vielä tarjota kunnalle. (Sørensen 2009, Danmarks Vindmølleforening 2009.)

Myös Suomessa tuulivoimatoimijat ovat viime vuosina alkaneet aktiivisesti panostaa paikalliseen hyväksyttävyyteen. Erityisesti asukkaiden huomioonottamiseen, läsnäoloon yhteisössä sekä tavoitettavuuteen on panostettu. Lisäksi yritykset ovat taloudellisesti osallistuneet lähialuetta edistäviin ja ympäristöarvoja säilyttäviin hankkeisiin. (Gurvits 2014.)

### 3 TUULIVOIMATEKNIikka

Tässä luvussa esitellään yleisimmät tuulivoimaloissa käytetyt generaattorityypit ja perehdytään hajautetun tuotannon, pääasiassa tuulivoiman, verkkoon liittämiseen ja suojaukseen. Luvun tavoitteena on antaa lukijalle käsitys eri generaattoreille tyypillisistä ominaisuuksista, sekä valaista, mitä tuulivoimalan verkkoon kytkentä vaatii ja minkälaisia säädöksiä liittynästä on voimassa Suomessa.

#### 3.1 Tuulivoimalatyypit

Käytännössä kaikki nykyisin rakennettavat teollisen kokoluokan tuulivoimalat ovat kolmilapaisia ja vaaka-akselisia. Voimala koostuu tornista, roottorista ja konehuoneesta eli nasellista. Konehuone sisältää tyypillisesti generaattorin lisäksi muut sähkö- ja ohjauslaitteet, sekä mahdollisen vaihteiston. Joissain voimalatyypeissä sähkölaitteita on sijoitettu myös tornin alapäähän, mikä mahdollistaa pienemmän nasellin käyttämisen.

Tuulivoimaloissa käytettävät generaattorit voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan: vakio- ja muuttuvanopeuksisiin. Vakionopeuksisella generaattorilla varustetut turbiinit pyörivät nimensä mukaisesti lähes vakionopeudella, joka riippuu vaihteiston välityssuhteesta, verkon taajuudesta sekä generaattorin napaluvusta. Vakionopeuksisella generaattorilla maksimi hyötysuhde saavutetaan vain tietyllä tuulennopeudella, tuulen nopeuden poike- tessa tästä suuntaan tai toiseen, generaattorin hyötysuhde heikkenee. Vakionopeuksisen turbiinin verkkoon syöttämä teho voi vaihdella nopeasti puuskaisessa tuulessa, mikä voi aiheuttaa häiriötä verkkoon. (Wu, Lang, Zargari & Kouro 2011).

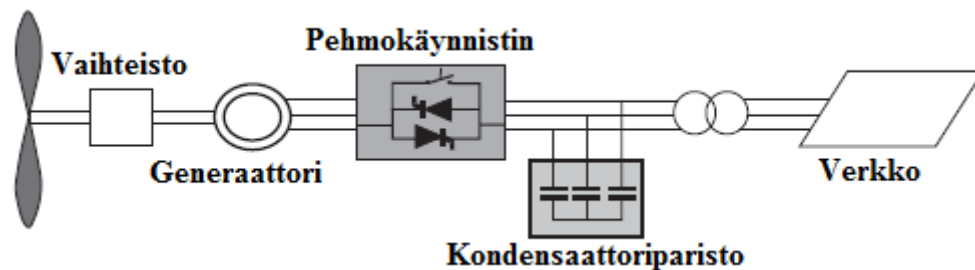
Muuttuvanopeuksisella turbiinilla maksimihyötysuhde on mahdollista saavuttaa laajalla tuulennopeusalueella. Kun turbiini pyörimisnopeutta ei tarvitse säätää pysymään tietyllä kierrosnopeudella, voidaan pyörimisnopeus optimoida aina vallitsevan tuulennopeuden mukaan siten, että saavutetaan paras hyötysuhde. Muuttuvanopeuksiset generaattorit kytketään verkkoon aina taajuusmuuttajan (tuulivoimaloiden yhteydessä käytetään joskus termiä tehomuokkain) välityksellä. Tämä lisää hankintakustannuksia ja tehohäviöitä, jotka kuitenkin kompensoituvat paremman energiantuoton myötä. Muuttuvanopeuk-

sisia turbiineja voidaan pitää myös pitkäikäisempinä, koska puuskainen tuuli aiheuttaa niissä vähemmän mekaanista rasitusta. (Ackermann 2005, Wu ym. 2011.)

Tuulivoimaloissa käytettyjä generaattoreita on useita eri tyyppisiä, jotka voidaan jakaa edellä esitettyihin kategorioihin. Seuraavaksi esitellään yleisimmät generaattorityypit tarkemmin.

### 3.1.1 Suoraan verkkoon kytketty epätahtigeneraattori

Perinteisin tuulivoimaloiden generaattorityyppi on vakionopeuksinen suoraan verkkoon kytketty epätahtigeneraattori. Siinä on tavallinen kolmivaiheinen staattorikäänitys, jonka induktiivinen magnetointivirta otetaan suoraan verkosta. Tästä syystä loistehoa täytyy kompensoida, joka tapahtuu yleensä kondensaattoripariston avulla. Roottorin magnetointi toteutetaan yleensä käämien sijaan oikosulkuhäkällä (SCIG: Squirrel Cage Induction Generator). Oikosulkuhäkällä varustettu roottori on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen ja kestävä, eikä se vaadi liukurenkaita eikä hiiliharjoja. (Ackermann 2005, Wu ym. 2011.) SCIG:n periaatekaavio on esitetty kuvassa 12.



**Kuva 12.** Suoraan verkkoon kytketyn tuulivoimalan periaatekaavio (Wu ym. 2011).

SCIG:n etuja muihin generaattorityyppeihin verrattuna ovat kestävyys, yksinkertaisuus sekä edullisuus. Etujen lisäksi generaattorilla on myös haittansa. Kyseinen generaattorityyppi toimii maksimihyötysuhteella vain nimellistuulennopeudella, mikä alentaa sen kokonaishyötysuhdetta. Lisäksi vaihteleva tuulennopeus näkyy suoraan generaattorin sähkötehon vaihteluna, mikä voi aiheuttaa häiriöitä verkkoon. (Wu ym. 2011.)

Turbiini on kytketty generaattoriin vaihteiston välityksellä, jonka avulla niiden pyörimisnopeudet voidaan sovittaa halutunlaisiksi. Suoraan verkkoon kytkentä tarkoittaa,

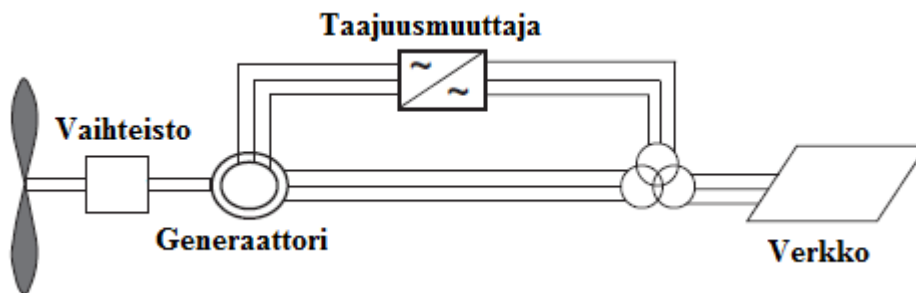


että generaattorin ja verkon välissä ei ole taajuusmuuttajaa, vaan pelkästään muuntaja. Tämä lisää osaltaan SCIG:n edullisuutta ja vähentää tehohäviöitä. (Ackermann 2005.)

Käynnistystilanteissa SCIG voi aiheuttaa nimellisvirtaan verrattuna 7–8-kertaisen virtapiikin, mikä heikossa verkossa aiheuttaa suuria jänniteheilahteluja. Tästä syystä SCIG:n yhteydessä tulee käyttää pehmokäynnistintä. (Wu ym. 2011.)

### 3.1.2 Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori

Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori (DFIG: Doubly Fed Induction Generator) lukeutuu muuttuvanopeuksiin generaattoreihin ja sen toimintaperiaate poikkeaa SCIG:stä roottorin magnetoinnin osalta. DFIG:n staattori on kytketty suoraan verkkojännitteeseen, mutta roottori on magnetoitu taajuusmuuttajan välityksellä. Tämä järjestelmä mahdollistaa toiminnan rajoitetulla, mutta SCIG:tä laajemmalla pyörimisnopeudella. Taajuusmuuttaja kompensoi eron mekaanisen ja verkon taajuuden välillä säätämällä roottorivirtaa. DFIG toimii siis SCIG:a paremmalla hyötysuhteella, eikä tuulenopeuden vaihtelut näy samalla tavoin häiriöinä verkon puolella. DFIG:ssä roottorin magnetointi vaatii liukurenkaiden käyttöä, mikä lisää huollon tarvetta ja kustannuksia. (Ackermann 2005: 68–69, Wu ym. 2011.) Kuvassa 13 on esitetty DFIG:n periaatekaavio.



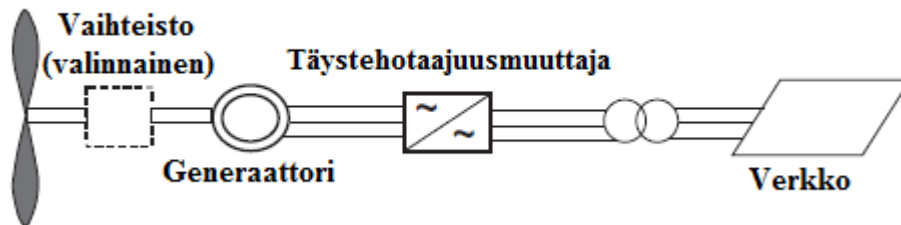
**Kuva 13.** Kaksoissyötetyn epätahtigeneraattorin periaatekaavio (Wu ym. 2011).

DFIG ei vaadi lainkaan loistehon kompensointiparistoa, koska generaattorin tehokerroin voidaan asettaa roottorin magnetointia säätämällä. Taajuusmuuttaja koostuu kahdesta, itsenäisesti ohjattavasta suuntaajasta. Generaattorin puoleinen suuntaaja säätelee pätö- ja loistehoa ohjaamalla roottorivirran komponentteja, kun taas verkon puoleinen suuntaaja

säätää välipiirin jännitettä ja huolehtii tehokertoimen pysymisestä halutuissa rajoissa. (Wu ym. 2011.)

### 3.1.3 Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tahtigeneraattori

Muuttuvanopeuksisella täystehotaajuusmuuttajalla varustetulla tahtigeneraattorilla saavutetaan tuulivoimakäytöissä useita etuja muihin generaattorityyppeihin verrattuna. Tahtigeneraattorin roottori magnetoidaan joko tasavirralla (WRSG: Wound Rotor Synchronous Generator) tai kestopagneeteilla (PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator), minkä johdosta generaattori ei ota loistehoa verkosta, eikä loistehoa täten tarvitse kompensoida. (Ackermann 2005.)



**Kuva 14.** Täystehotaajuusmuuttajalla varustetun tuulivoimalan periaatekaavio (Wu ym. 2011).

Yksi PMSG:n eduista on sen roottorin itsemagnetointi, mistä johtuen hyötysuhde paranee, kun roottoriin ei tarvitse syöttää magnetointivirtaa erikseen eikä liukurenkaita tarvitse käyttää. Kasvattamalla generaattorin napalukua päästään eroon tarpeesta käyttää vaihteistoa turbiinin ja generaattorin välillä, jolloin puhutaan suoravetoisesta generaattorista. Tällöin päästään parempaan hyötysuhteeseen ja huoltokulut pienenevät. Hankintakustannukset tosin kasvavat napaluvun kasvaessa, etenkin kestopagneettigeneraattoreissa. (Ackermann 2005, Wu ym. 2011.)

The Switchin toimitusjohtaja Jukka-Pekka Mäkinen uskoo vakaasti PMSG-tekniikan yleistymiseen. Hänen mukaansa vielä 85 % nykyään asennettavista tuulivoimaloista on muita kuin PMSG-voimaloita, vaikka kestopagneettigeneraattorit ovat nykyhinnoilla selvästi kannattavin vaihtoehto koko voimalan elinkaarta tarkasteltaessa. (Renewables International 2014.)

### 3.2 Tuulivoimala sähköverkossa

Sähköverkon näkökulmasta hajautetun tuotannon lisääntyminen järjestelmässä on haasteellista. Sähköverkkojen suojaus on perinteisesti suunniteltu toimimaan keskitetyllä tuotannolla eli yksisuuntaisella tehonsiirrolla. Hajautetun tuotannon syöttäessä tehoa verkkoon ja tehon suunnan muuttuessa syntyy suojauksen kannalta tilanteita, jotka asettavat relesuojaukselle uusia vaatimuksia. Voimalaitokset vaikuttavat jakeluverkon toimintaan kuormia merkittävämmiin, minkä johdosta verkkoyhtiöt asettavat sähköntuottajille kuluttajia tarkempia teknisiä vaatimuksia verkkoon liittymiselle. (Motiva 2012.)

Oman tuotannon aloittamista suunniteltaessa on tärkeää olla hyvissä ajoin yhteydessä paikalliseen verkkoyhtiöön, jo ennen voimalan hankintapäätöstä. Näin voidaan varmistua, että suunniteltu voimala voidaan kytkeä kyseisessä liityntäpisteessä sähköverkkoon, eikä se aiheuta häiriötä muille verkon laitteille. Voimalan verkkoliityntään vaikuttaa muun muassa verkon jäykkyys, joka heikkenee siirtoetäisyyksien pidentyessä.

#### 3.2.1 Hajautetun tuotannon verkkovaikutukset

Sähköverkon suojauksen kannalta hajautettu tuotanto asettaa uusia haasteita, koska järjestelmä monimutkaistuu ja vikojen havaitseminen käy vaikeammaksi (Voima 2009: 11). Toisaalta hajautetulla tuotannolla on positiivisia vaikutuksia verkon toimintaan. Tuotannon aiheuttama jännitteen kohoaminen johtohaaran loppupäässä on pääosin myönteinen asia, koska se vähentää johdon häviöitä tehonsiirron vähentyessä kantaverkon suunnasta. Johdon mitoitusta voidaan kuitenkin pienentää vain, jos laitos pystyy tuottamaan sähköä varmasti suuren kuormituksen aikana. Tämä ei siten ole mahdollista tuulivoimaloiden tapauksessa. (Lakervi & Partanen 2009: 212–213.)

Tuotantolaitoksen vaikutus jakeluverkon sähkön laatuun riippuu laitoksen nimellistehosta, laitoksessa käytetystä tekniikasta sekä jakeluverkon ominaisuuksista liittymispisteessä (Motiva 2012: 20). Heikkoon verkkoon liitetyt generaattorit voivat kytkeytymis- ja häiriötilanteissa heikentää sähkön laatua verkossa. Tässä sähkön laadulla tarkoitetaan tarkemmin jännitteen laatua. Verkkoyhtiö on vastuussa siitä, että kuluttajat saama sähkö täyttää vaatimukset, jotka on määritelty standardissa SFS-EN-50160. (Elovaara & Haarla 2011a: 435). Pien- ja keskijänniteverkon jännitetason vaihtelut eivät saa ylittää  $\pm 10\%$

nomellisjännitteestä. Lisäksi normaaleissa käyttöoloissa perustajuuden 10 s keskiarvo tulee pysyä 99,5 % vuodesta välillä 49,5–50,5 Hz ja 100 % ajasta välillä 47–52 Hz.

Yksi sähkönlaadun heikkenemisen näkyvistä vaikutuksista on välkyntä eli toistuvat jännitetasonvaihtelut. Kuten ilmiön nimikin viittaa, on välkyntä havaittavissa valaistuksen kirkkauden muutoksina, jotka koetaan usein häiritsevinä. Nopeat jännitetason vaihtelut ovat alle 10 % suuruista vaihtelua, joka aiheutuu nopeista tuotannon tai kulutuksen vaihteluista. Sitä suurempaa jännitteen laskua kutsutaan jännitekuopaksi. (Alanen & Hättönen 2006: 18, Elovaara ym. 2011: 438–440.) Tuulivoiman tapauksessa suoraan verkkoon kytketyt epätahtigeneraattorit aiheuttavat eniten muutoksia verkon jännitteeseen, koska tuulen nopeuden vaihtelu näkyy suoraan tehon vaihteluna.

Liittymispisteen sähköistä jäykkyyttä kuvaava oikosulkuteho asettaa teknisen reunaehdon liitettävän generaattorilaitteiston koolle. Oikosulkuteho on oltava vähintään 25-kertainen generaattorilaitteiston nimellistehoon verrattuna. (Energiateollisuus 2011b). Pitkän siirtojohdon päässä sijaitsevaan liityntäpisteeseen liitettävä tuotanto voi siten vaatia verkon vahvistamistoimenpiteitä. Kuten luvussa 2.4.2 kerrottiin, on sähköverkon haltija velvollinen liittämään vaatimukset täyttävä voimala verkkoonsa. Alle 2 MVA voimalaa liitettäessä verkkoon, ei voimalan omistajan tarvitse maksaa verkon vahvistamiskustannuksia, vaan pelkästään välittömät verkonrakennuskustannukset. Niihin lasketaan muiden muassa uusien johtojen ja muuntajien rakentaminen, sekä olemassa olevan linjan jännitetason nostamisen vaatimat investoinnit. (Salo 2014.) Lisäksi generaattorien kokoa voi säteittäisessä verkossa rajoittaa jännitteen kohoaminen, jos voimalaitosten teho on kuormituksia huomattavasti suurempi. Jännitteen kohoamista voidaan rajoittaa verkon vahvistustoimenpiteillä tai vaihtoehtoisesti rengaskäyttöyhteyden rakentamisella. (Lakervi ym. 2009: 213).

### 3.2.2 Suojausperiaatteet

Sähköverkon suojauksen tarkoituksena on havaita verkossa esiintyvät viat ja epänormaalit olosuhteet, jotta ne voidaan erottaa muusta verkosta ja korjata. Suojausjärjestelmällä tarkoitetaan suojauslaitteiden, mittamuuntajien, johdotuksen, laukaisupiirin, tehollähteiden sekä mahdollisen tiedonsiirron ja jälleenkytkentäautomatiikan muodostamaa

kokonaisuutta. Suojausjärjestelmän tavoitteena on selektiivisyys, nopeus, luotettavuus, herkkyys ja toiminta poikkeuksellisissakin käyttötilanteissa. Selektiivisyydellä tarkoitetaan, että suojaus kykenee poistamaan verkosta vain vikaantuneen osan ja syöttö muihin verkonosiin voi jatkua. Näin suojauksella voidaan toteuttaa sen ensisijainen tarkoitus, eli henkilöiden ja omaisuuden suojeleminen mahdollisimman lyhyillä keskeytyksillä. (Elovaara & Haarla 2011b: 335–344.)

Hajautetun tuotannon vaikutuksia keskijänniteverkon suojaukseen tarkasteltiin laajasti viitteessä Kumpulainen & Ristolainen (2006). Hajautetulla tuotannolla on vaikutuksia verkon vikavirtoihin, joihin oikosulkujen havaitseminen verkosta perustuu. Lisäksi hajautettu tuotanto mahdollistaa tahattomien saarekkeiden syntymisen, mikä tulee kyetä relesuojauksella estämään. Muuttuneet vikavirrat voivat aiheuttaa releen sokaistumisen, johtolähdön tarpeettoman laukaisun tai viereisen lähdön irtoamisen verkosta. Tuotannolla on siis merkittävä vaikutus relesuojauksen järjestämiseen, mikä korostaa suojausasetteluiden merkitystä voimalakohtaisesti.

Voimalaitosten perussuojauksen muodostavat jännite-, virta- ja taajuussuojat, jotka seuraavat verkon tilaa jatkuvasti. Niiden tehtävänä on irrottaa voimala verkosta sekä voimalassa että verkossa tapahtuvissa vikatilanteissa. Verkkoyhtiöt antavat omat suosituksensa liitettävän tuotannon suojaukselle. Suojareleiden asettelut voivat kuitenkin vaihdella tilanteen mukaan, koska esimerkiksi voimalan tyyppi ja verkon vahvuus vaikuttavat vikavirtojen suuruuteen. Suojauksen tulee toimia oikein kaikissa tilanteissa, kuten esimerkiksi viereisellä johtolähdöllä tapahtuvassa oikosulussa, joten releiden asetteluarvot ja toiminta-ajat tulee tarkistaa laskennallisesti. (Repo, Laaksonen, Mäki, Mäkinen & Järventausta 2005). Taulukossa 8 on esitetty verkkoyhtiöiden ohjeistuksia suojausasetteluista sekä Ikaalisissa sijaitsevan, Nordexin valmistaman 1,0 MW, tuulivoimalan suojauksessa käytettävät asettelut. Kyseinen voimala on liitetty Leppäkosken Sähkön verkkoon ja asetteluista nähdään, että alijännitesuojauksen ensimmäisen tason ja alitaajuuden toiminta-ajat ovat verkkoyhtiön suositukseen nähden lyhyempiä. Saarekekäytön suurinta sallittua kestoaikaa ei ilmoitettu verkkoyhtiön testauspöytäkirjassa, ja maasulun havaitseminen perustuu sähköasemalla sijaitsevan suunnatun nollavirtareleen toimintaan. Voimalan suojausasettelut saatiin Leppäkosken Sähkön toimittamasta käyttönottopöytäkirjasta.

**Taulukko 8.** Verkkoystiöiden ohjeistuksia suojausten asetteluarvoista, sekä Leppäkosken Sähkön verkkoon kytketyn voimalan asettelut. Toiminta-ajat on merkitty sulkeisiin (Helen Sähköverkko Oy 2009a, Leppäkosken Sähkö 2014).

<b>Parametri</b>	<b>Helen Sähköverkko Oy</b>	<b>Leppäkosken Sähkö Oy</b>	<b>Teiharju, Ikaalinen</b>
Ylijännitetaso 2	115 % (0,15 s)	115 % (0,15 s)	115 % (0,15 s)
Ylijännitetaso 1	110 % (1,5 s)	110 % (1,5 s)	110 % (1,5 s)
Alijännitetaso 2	50 % (0,15 s)	50 % (0,15 s)	80 % (0,15 s)
Alijännitetaso 1	85 % (5,0 s)	85 % (5,0 s)	85 % (2,0 s)
Ylitaajuus	51 Hz (0,2 s)	51 Hz (0,2 s)	51 Hz (0,2 s)
Alitaajuus	48 Hz (0,5 s)	48 Hz (0,5 s)	48 Hz (0,2 s)
Saarekekäyttö	0,15 s	0,15 s	-

Perussuojauksen ohella tärkeimpänä yksittäisenä tuotantolaitoksiin liittyvänä suojaus-toimintona voidaan pitää saarekekäytön estosuojausta (eng. Loss of mains protection, LOM), joka estää laitosta syöttämästä tehoa saarekkeena olevaan verkkoon. Tuotanto-yksikön jäädessä syöttämään kuormia tahattomasti jakeluverkon välityksellä, voi se aiheuttaa vaurioita kuormituksille, yksikölle itselleen sekä vaaratilanteen vikaa korjaaville henkilöille. (Repo ym. 2005). Lisäksi saarekettä syöttävä tuotantolaitos voi estää pika-jälleenkytkennän (PJK) toiminnan ylläpitämällä vikapaikassa valokaarta (Kumpulainen & Ristolainen 2006: 15).

Viitteen Kumpulainen & Ristolainen (2006) mukaan LOM-suojaus on edelleen osittain ratkaisematon ongelma. Haasteellisin tilanne suojausten kannalta on, kun saarekkeessa vallitsee tehotasapaino tuotannon ja kulutuksen välillä. Tällaisissa tapauksissa etenkin passiivisten, eli vain verkosta mitattavia suureita tarkkailevien, suojalaitteiden toimi-vuus voidaan kyseenalaistaa. Aktiiviset suojalaitteet tarkkailevat järjestelmän vastetta itse aiheuttamiinsa muutoksiin. Toimintavarmin LOM-suojaus perustuu tietoliikennettä hyödyntävään siirtolaukaisuun, joka vaatii kalliita tietoliikenneyhteyksiä verkon laitteiden välille. Siirtolaukaisussa sähköasemalla olevat releet ovat yhteydessä tuotantoyksi-kön releen kanssa (Voima 2009: 30).

Käytännössä tuulivoimaloiden LOM-suojauksen toteutus perustuu kuitenkin tyypillisesti vain jännite- ja taajuusreleiden toimintaan ja niiden oikeaan parametroiintiin. (Jantunen 2015, Huuhtanen 2015). Kaikissa tämän tutkimuksen puitteissa selvitettyissä tuulivoimaloiden suojausjärjestelyissä LOM-suojaus toteutetaan pelkästään passiivisilla menetelmillä.

Hajautetun tuotannon osalta maasulkutilanteetkin voivat osoittautua ongelmallisiksi. Voimalaitos voi ylläpitää verkon jännitettä johtolähdön suojan laukeamisen jälkeenkin, jos voimala ei havaitse vikaa. Tavallisesti maasulkusuojaus perustuu verkon nollajännitettä valvovaan vakioaikaylijännitereleeseen, jonka toiminta-aikaan ja herkkyteen vaikuttaa erityisesti verkon maadoitustapa. Maasta erotetussa verkossa suojaus on yksinkertaisempi toteuttaa, koska verkon maadoitustapa ei muutu johtolähdön suojan erottaessa johdon. Kompensoidussa verkossa taas johtolähdön suojauksen toimiessa menetetään samalla yhteys kompensointilaitteistoon ja verkon maadoitustapa muuttuu maasta erotetuksi. Tämä tulee ottaa huomioon suunniteltaessa suojareleistyksen toimintaa. (Haapalainen 2007: 31–35.)

Samoin kuin LOM-suojauksen tapauksessa, myös maasulkusuojauksen toteutus poikkeaa käytännön toteutukseltaan kirjallisuudessa esitetyistä periaatteista. Tuulivoimaloiden relesuojauksessa nollavirran tai -jännitteen mittausta ei tyypillisesti käytetä (Jantunen 2015). Nollajärjestelmän suureiden tarkkailu vaatisi mittaukset muuntajan keskijännitepuolelta, koska nollaverkon suureet eivät kulkeudu muuntajan pienjännitepuolelle (Haapalainen 2007: 31). Maasulkusuojauksessakin usein oletuksena siis on, että sähköasemalla tapahtuva releen laukaisu havaitaan voimalan mittauksilla ilman nollaverkon suureiden mittausta.

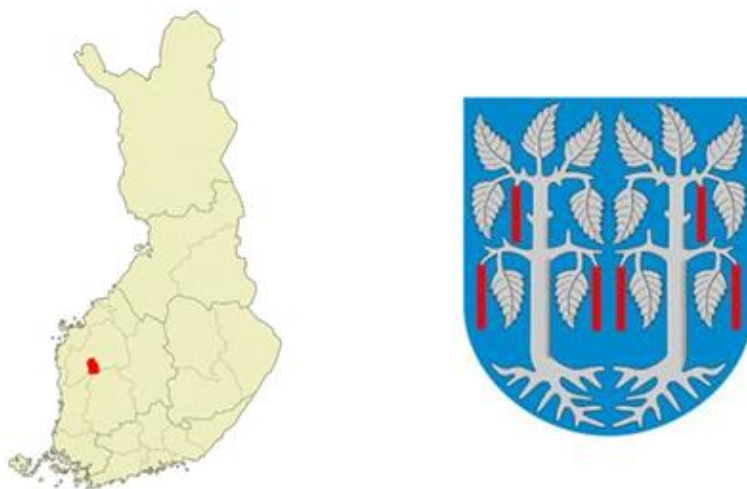
Lisääntyvä hajautettu tuotanto vaatii verkkoyhtiöiltä verkkonsa kehittämistoimenpiteitä ja suojauksen toimivuudesta huolehtimista. Elenia Oy:n Yritysassiakkaat-tiimin johtajan Johannes Salon mukaan Eleniassa tuulivoiman verkkoon liittämistä ei pidetä kuitenkaan rasitteena, vaikka yhtiö ei sillä merkittävää liiketoimintaa harjoitakaan. Salo näkee hajautetun tuotannon positiivisena asiana ja verkkoyhtiön roolin uusiutuvan energiantuotannon mahdollistajana tarjoamalla tuottajille mahdollisuuden liittyä verkkoon ja siirtää tuottamansa sähkö markkinoille. (Salo 2014.)

#### 4 TAPAUSTUTKIMUS: ILVESJOEN ENERGIAKYLÄ

Tässä luvussa tarkastellaan lähemmin yhtä Energiakylä-hankkeen kylistä, Ilvesjoen energiakylää. Luvun tarkoituksena on esitellä kylä yleisellä tasolla, sekä arvioida kylän energiankulutusta ja -tuotantomahdollisuuksia. Energiakylä-hankkeen keskeinen osa on kartoittaa kohdealueiden energiantuotantopotentiaali, joka esitellään tässä luvussa Ilvesjoen osalta kokonaiskuvan antamiseksi. Luvun painopiste on alueen sähköverkon mallinnuksessa simulointien avulla, sekä alueella käytössä olevien käytettyjen tuulivoimaloiden esittelyssä. Simulointien tavoitteena on selvittää tuulivoimaloiden verkkovaikutuksia sekä sitä, kuinka paljon tuotantoa verkkoon voisi teoriassa liittää. Lopuksi pohditaan kylän energiaomavaraisuuden lisäämismahdollisuuksia sekä mikrosähköverkon hyödyntämistä tulevaisuudessa.

##### 4.1 Kylän perustiedot

Ilvesjoen kylä Jalasjärvellä, Etelä-Pohjanmaalla, on yksi Energiakylä-hankkeen kohteiksi valikoituneista kylistä. Kylässä on noin 600 asukasta ja se on muodostunut alueen läpi virtaavan Ilvesjoen varrelle. Kylän tärkein elinkeino on maatalous lihan-, maidon- ja viljantuotannollaan. Maatiloja kylässä on 43 kappaletta. Lisäksi kylässä toimii kauppa, asiamiesposti ja taksi. Ilvesjoella on yhteensä lähes 50 yrittäjää ja ammatinharjoittajaa.



**Kuva 15.** Jalasjärven sijainti Suomen kartalla ja kunnan vaakuna (Kuvat: Wikipedia).



Suurimmat kylässä toimivat yritykset ovat alkoholijuomia valmistava Pramia Oy sekä Kauppilan Autohajottamo Oy, jotka molemmat omistavat käytettynä hankitun tuulivoimalan. Kauppilan Autohajottamo omistaa lisäksi 30 kW pienvesivoimalan. Voimala uudistettiin 90-luvun alkupuolella ja se tuottaa vuosittain yli 150 MWh sähköä. Putouskorkeutta vesivoimalan kohdalla on noin neljä metriä.

Energiakylä-hankkeessa on tutkittu kylissä käytetyn energian määriä ja paljonko siihen kuluu vuosittain rahaa. Ilvesjoella sähkönkulutus on vuosittain noin 3 350 MWh. Kotitalouksia alueella on 260, joista puulla lämmitetään yli 100, sähköllä noin 90, kevyellä polttoöljyllä noin 30 ja lämpöpumpuilla noin 40. Sähkönkulutuksen vuotuinen arvo Ilvesjoen asukkaille on noin 420 000 € Lämmitysöljyn arvoksi on arvioitu noin 87 000 € Selvästi merkittävin menoerä energian kannalta on liikenne, jonka polttoaineista kyläläiset maksavat vuosittain yhteensä jopa 1,75 miljoonaa euroa. Yksi Energiakylä-hankkeen tavoitteista onkin selvittää, miten näitä rahamääriä voitaisiin omien energianlähteiden avulla saada jäämään alueelle ja parantamaan sen elinvoimaa. Taulukossa 9 on esitetty Ilvesjoella vuosittain kulutetun energian kokonaismäärät.

**Taulukko 9.** Ilvesjoen vuotuinen energiankulutus.

<b>Energiankulutus</b>	<b>(MWh)</b>
Lämmitys	6 170
Sähkö	3 350
Liikennepolttoaineet	10 840
Yhteensä	20 360

#### 4.2 Energiantuotantopotentiaali

Maatalousvaltaisissa kylissä on lähtökohtaisesti erittäin hyvät mahdollisuudet paikallisten energianlähteiden hyödyntämiseen uusiutuvan energian tuotannossa. Näin on myös Ilvesjoella, jossa tällä hetkellä neljännes koko energiantarpeesta tyydytetään paikallisilla energianlähteillä.

Taulukossa 10 on esitetty Energiakylä-hankkeen tutkijoiden arvio Ilvesjoen kylän energiantuotantopotentiaalista sekä tällä hetkellä hyödynnettävä paikallinen tuotanto. Teoreet-

tuulivoimapotentialiaali perustuu olemassa oleviin ja alueelle suunniteltuihin voimaloihin. Lagerwey Development Oy on suunnitellut kahta erillistä tuulipuistoa, joiden voimaloista 24–39 kappaletta sijoittuisi Ilvesjoen kylän alueelle.

**Taulukko 10.** Ilvesjoen energiantuotantopotentialiaali.

<b>Energianlähde</b>	<b>Tuotantopotentialiaali (MWh)</b>	<b>Hyödynnetään (MWh)</b>
Biokaasu	6 323	0
Metsä	17 440	2 471
Olki	1 617	0
Tuuli	171 683	2 200
Vesivoima	346	173
Jäte (poltto)	558	558
<b>Yhteensä</b>	<b>197 967</b>	<b>5 402</b>

Kuten arvioista huomataan, on tuulivoimalla merkittävä vaikutus alueen energiantuotantopotentialiin. Jos vastaava laskelma tehdään ilman suunniteltuja tuulipuistoja, saadaan tuotantopotentialiksi yhteensä 28 484 MWh. Jos tätä lukua verrataan taulukon 8 energiankulutuslukemiin, huomataan, että noin 20 000 MWh vuosikulutus voitaisiin kattaa paikallisiin energianlähteisiin perustuvalla tuotannolla. Tuulipuistot mukaan lukien alueen kulutus katettaisiin moninkertaisesti. Aikaisemmin mainitut Ilvesjoen ulkopuolelta ostettavaan energiaan kuluvat rahat voitaisiin siis saada jäämään alueelle, millä olisi merkittävä vaikutus alueen talouteen ja elinvoimaan. Vaikka energiantuotantopotentialissa yhteen lasketut sähkö-, lämpö- ja liikennepolttoaineiden energiat eivät käytännössä ole summattavissa, antavat luvut kuitenkin hyvän kuvan potentialin ja kulutuksen suhteesta.

Taulukossa 11 on esitetty Suomen Tuuliatlaksen antamat tuotantoarviot eri korkeuksilla ja erikokoisilla voimaloilla Ilvesjoen kylän alueella. Arviot ovat kokoluokaltaan toteutuneet melko tarkasti, kun niitä verrataan seuraavassa kappaleessa esitettyihin todellisiin tuotantomääriin.

**Taulukko 11.** Suomen Tuuliatlaksen tuotantoarviot Ilvesjoen alueella.

<b>Korkeus (m)</b>	<b>1 MW tuulivoimalan tuotto (MWh)</b>	<b>3 MW tuulivoimalan tuotto (MWh)</b>	<b>5 MW tuulivoimalan tuotto (MWh)</b>
50	884	2 677	3 564
75	1 302	3 901	5 475
100	1 785	5 311	7 743
125	2 134	6 328	9 421
150	2 522	7 466	11 307
200	3 229	9 549	14 793

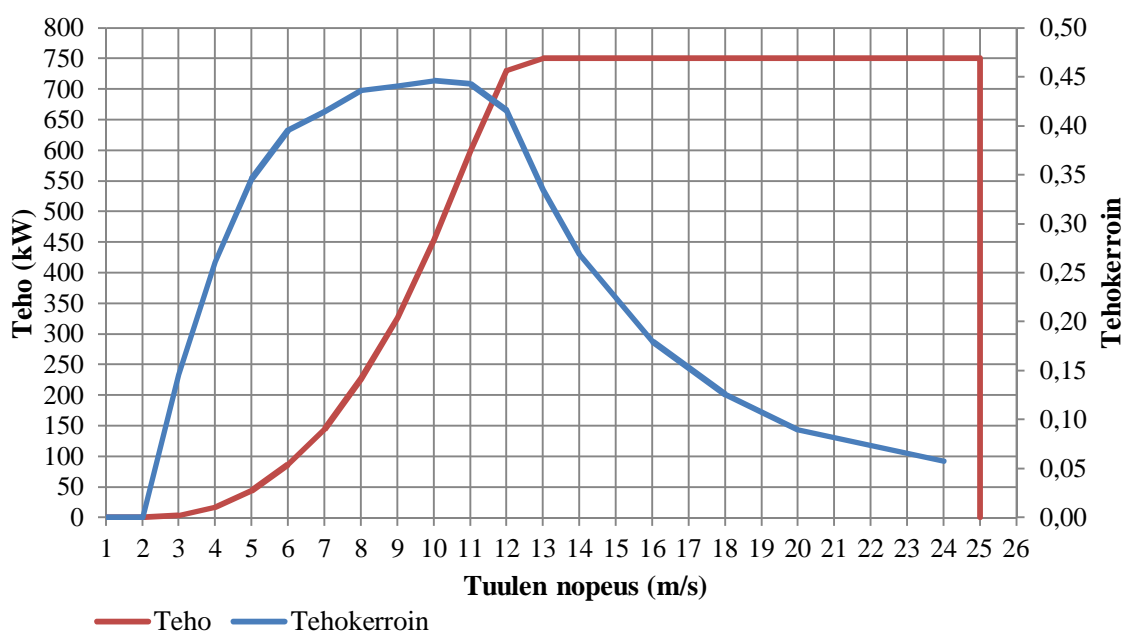
Tuuliolojen kannalta Ilvesjoen kylä ei ole paras mahdollinen alue tuulivoimatuotannolle. Kun Ilvesjoella 3 MW voimalan tuotantoarvio 100 metrin korkeudessa on 5 311 MWh vuodessa, on se Tuuliatlaksen datan mukaan rannikolla lähes kaksinkertainen.

#### 4.3 Ilvesjoen tuulivoimalat

Vuonna 2011 Suomeen tuotiin Saksasta kolme Südwind S46-750 kW tuulivoimalaa, joista kaksi päätyi samaan kylään – Ilvesjoelle. Voimaloiden napakorkeus on 76 metriä ja roottorin halkaisija 46 metriä. Voimalat otettiin alkuperäisellä paikallaan käyttöön vuonna 1998.

Voimaloissa käytetään hydraulista lapakulmasäätöä, jonka avulla roottorin akselilta saatavaa tehoa voidaan säätää tuulennopeuden mukaan. Voimalat ovat tyypiltään muuttuvanopeuksisia ja ne on varustettu kaksoissyötetyillä epätahtigeneraattoreilla (DFIG). 90-luvun lopulla tehtiin vielä paljon suoraan verkkoon kytkettäviä epätahtigeneraattoreilla varustettuja tuulivoimaloita, mutta Südwindin voimalat edustivat tuolloin uutta tekniikkaa. DFIG-voimalat sopivat suoraan verkkoon kytkettäviä paremmin pitkien keskijänniteverkkojen päässä oleviin kohteisiin, kuten Ilvesjoen kylään. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että generaattorin verkkoon syöttämää tehoa voidaan käynnistystilanteessa nostaa tasaisesti, eikä verkkoon näin aiheudu käynnistyksen aikana häiriöitä nopeista tehonvaihteluista.

Kuvassa 16 on esitetty kyseisen voimalatyypin tehokäyrät. Punaisesta kuvaajasta voidaan lukea generaattorin tuottama sähköteho eri tuulenopeuksilla. Voimala tuottaa nimellistehonsa 13–25 m/s tuulenoalueella ja nopeuden ylittäessä 25 m/s pysäyttää voimala laiterikkojen välttämiseksi. Sininen käyrä esittää voimalan tehokerrointa, joka käytännössä kuvaa kuinka suuri osa tuulen sisältämästä tehosta saadaan hyödynnettyä. Tuulivoimaloiden yhteydessä käytetty termi tehokerroin on siis eri suure, kuin sähkötekniikassa yleisesti käytetty  $\cos\phi$ . Kuvaajan maksimikohta on 10 m/s tuulenopeudella, jolloin siipien lapakulma on nimellisarvossaan eli optimaalisessa kulmassa tehon tuoton kannalta. Tätä suuremmilla tuulenopeuksilla lapakulmaa pienennetään, jotta roottorin akselilta saatava mekaaninen teho saadaan pysymään generaattorille sallituissa arvoissa.



**Kuva 16.** Südwind S46-750 kW -voimalan teho ja tehokerroin eri tuulenopeuksilla.

Voimaloiden toimituksesta, kokoonpanosta ja käynnistyksestä vastasi Maatuuli Oy. Käynnistykseen tarvittavat ohjelmat ja tiedot Maatuuli hankki saksalaiselta voimalavalmistajan valtuuttamalta huoltoyritykseltä ja samalla luotiin kontaktit varaosien toimittamista varten. Käynnistyksen jälkeen vastuu voimaloiden ylläpidosta ja huollosta siirtyi kuitenkin omistajille heidän toiveestaan. (Ahtee 2014.)

Iästään huolimatta toinen Ilvesjoelle tuoduista voimaloista on toiminut odotusten mukaisesti ja suuremmilta vioilta on vältytty. Vuosituotannoltaan kyseinen voimala on ollut 600 MWh vuodessa eli huipunkäyttöaikana ilmaistuna noin 800 tuntia. Omistajan mukaan hyvätuulisena vuotena ja ilman huoltokatkoja tuotanto voisi olla 1000 MWh.

Toisen voimalan kanssa ongelmia on ilmennyt enemmän. Pian käyttöönoton jälkeen voimalaan tuli suurempi vika, kun piirilevyille pudonnut pultti aiheutti kojeistossa oikosulun ja rikkoi sähkölaitteita. Lisäksi kyseisen voimalan ohjausjärjestelmä ilmoitti voimalan ollessa toiminnassa verkosta päin tulevasta viasta. Voimalaa ei ole vielä saatu toimintakuntoon varaosien vaikean saatavuuden vuoksi, mutta töitä sen eteen on tehty jatkuvasti ja voimala on tarkoitus saada vielä toimintaan.

#### 4.4 Verkon tutkiminen simulointien avulla

Tuulivoimaloiden aiheuttamat vaikutukset sähköverkkoon toimivat lähtökohtana Ilvesjoen sähköverkon simulointitutkimukselle, jonka tavoitteena oli selvittää:

- Verkon jäykkyyden salliman tuotannon määrän selvittäminen
- Jännitteenalenema voimaloiden pudotessa verkosta täyden tuotannon aikana
- Jännitteen kohoaminen pienen kulutuksen aikana.

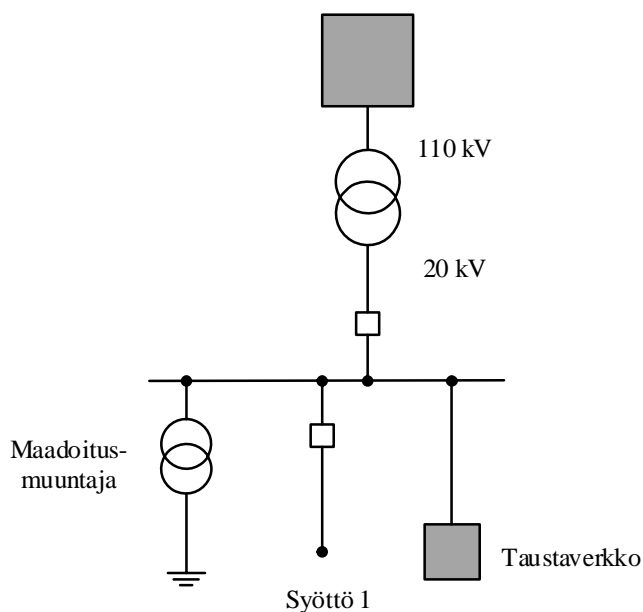
Tämän tutkimuksen simuloinneissa ei keskitytty relesuojauksen toimintaan, koska sitä on tutkittu laajasti aikaisemmin muun muassa viitteissä Kumpulainen & Ristolainen (2006), Kauhaniemi ym. (2008) sekä Voima (2009).

Ilvesjoen kylä on säteittäisen johtolähdön varrella ja etäisyyttä sähköasemalle tulee lähimmästä pisteestä noin 10 kilometriä. Toinen tuulivoimaloista on 13,2 km päässä sähköasemalta ja toinen 20,1 km päässä. Johtolähdön keskijänniteosuus koostuu 5,8 km pituisesta Pigeon 99 avojohdosta sekä 20,8 km Raven 63 avojohto-osuudesta. Johtolähtöä syöttävä 110/20 kV päämuuntaja sijaitsee Yli-Vallin sähköasemalla ja on teholtaan 16 MVA. Johdon loppupäässä on verkkoyhtiön mukaan havaittu ongelmia jännitteen laadussa, mikä on ilmennyt välkyntänä. Verkkoyhtiön mukaan ongelma johtui tuulivoimaloiden tekniikasta, mutta ongelma saatiin korjattua tuulivoimalatoimittajan avus-

tuksella. (Leino 2014). Tämä yksityiskohta on mielenkiintoinen lähtökohta simuloititutkimukselle.

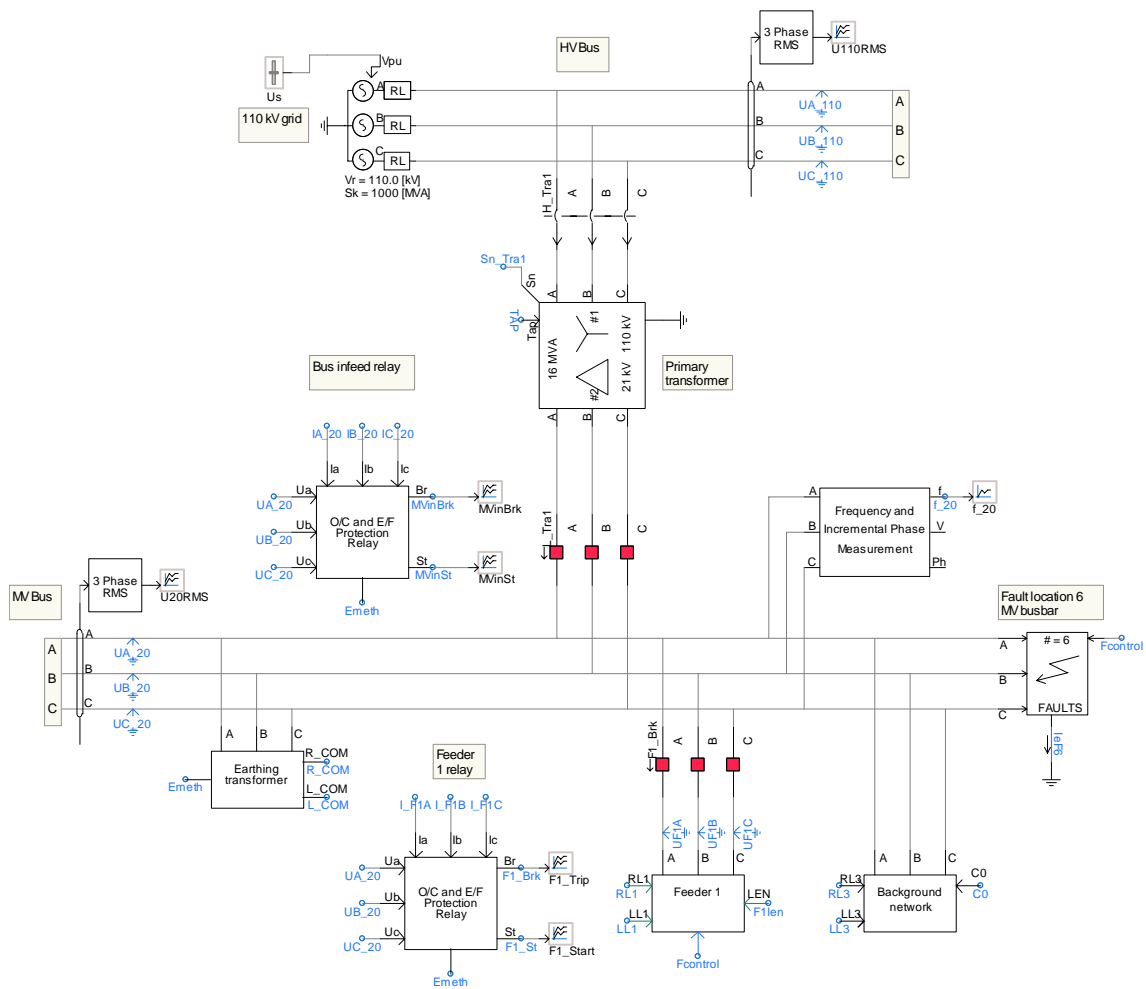
Ilvesjoen sähköverkko mallinnettiin PSCAD-simulointiohjelmistolla. PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) on sähköverkon simulointiin kehitetty ohjelma, jonka käyttö perustuu EMTDC-simulointialustaa hyödyntävään graafiseen käyttöliittymään. PSCAD:n avulla käyttäjä voi rakentaa tutkittavan sähköverkon mallin valmiista komponenteista, tehdä simulointiajoja ja tutkia niiden tuloksia.

Ilvesjoen verkon simulointimallin pohjana käytettiin VTT:n ja Vaasan yliopiston kehittämää tyypillisen suomalaisen keskijänniteverkon mallia, jonka parametointiin tarvittavat tiedot saatiin paikallisen jakeluverkon omistavalta Caruna Oy:ltä. Kuvassa 17 on esitetty simuloidun verkon pääkaavio.



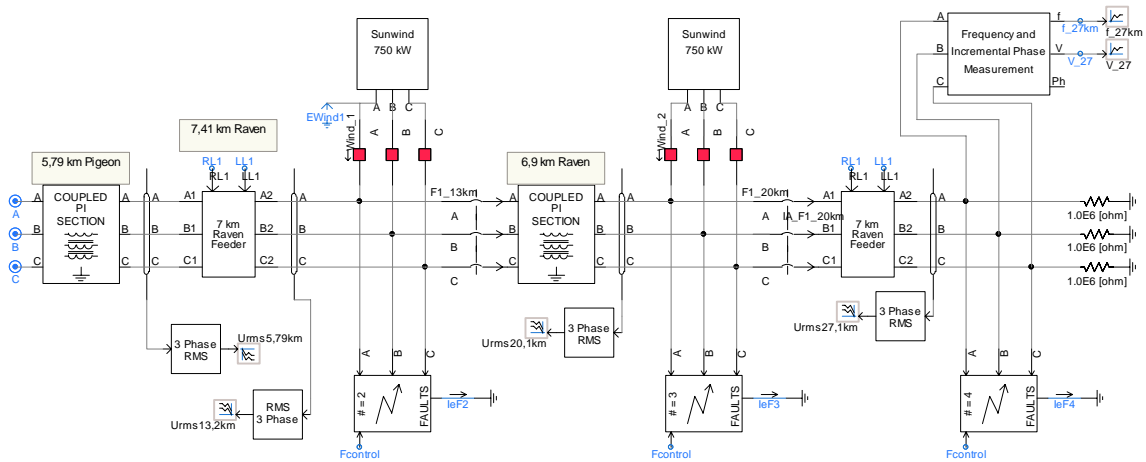
**Kuva 17.** Simulointimallin pääkaavio.

Pääkaaviossa on esitetty simulointimallin tärkeimmät komponentit. Syöttö 1 kuvaa Ilvesjoen johtolähtöä ja taustaverkko muita sähköaseman lähtöjä. Maadoitusmuuntajan avulla voidaan verkon maadoitustavaksi valita erotettu, sammutettu tai resistanssin kautta maadoitettu. Kuvassa 18 on esitetty simulointimallin pääsivu.



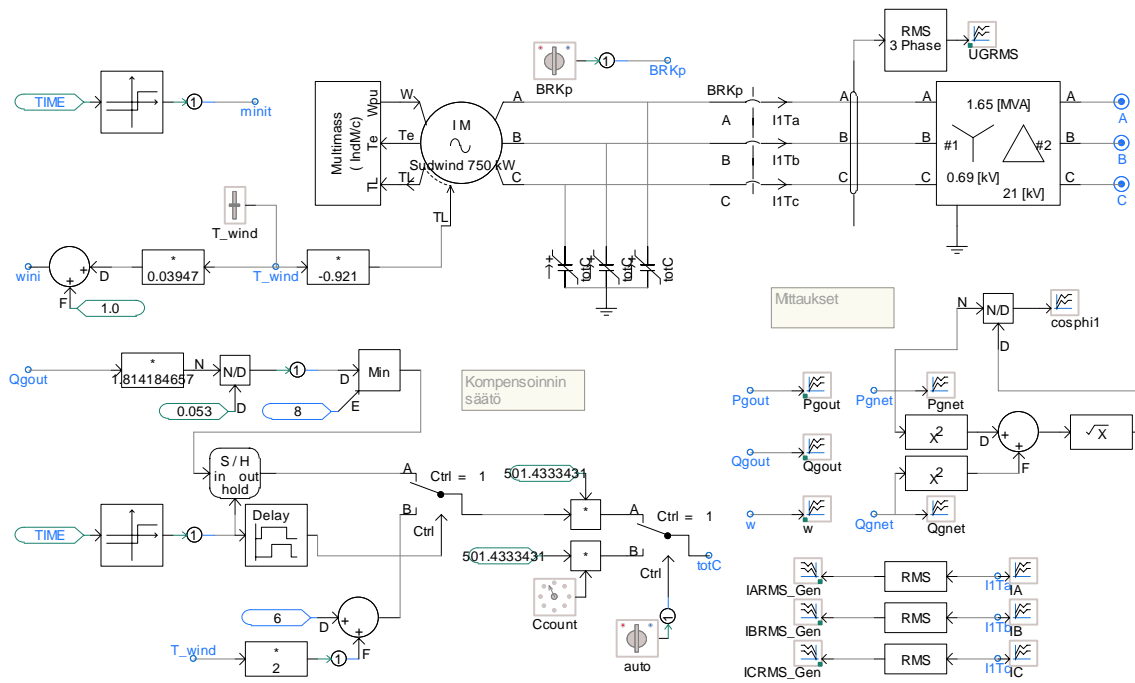
**Kuva 18.** Keskijänniteverkon simulointimallin pääsivu.

Kuvassa 19 esitetty Ilvesjoen johtolähtö koostuu kahdesta siirtojohtokomponentista (Coupled pi section), kahdesta tuulivoimalamallista (Sudwind 750 kW) sekä kuormitukset sisältävistä lohkoista (7 km Raven Feeder). Kummatkin kuormituslohkot sisältävät seitsemän jakelumuuntajaa, joihin on kytketty mallin pääsivulta säädettävissä oleva kuorma. Jakelumuuntajien välissä on kilometrin pituiset Al/Fe 54/9 Raven -johtoja kuvaavat komponentit. Lisäksi mallissa on kolme vikapaikan mallia, joihin voidaan simuloinnin aikana aiheuttaa maa- tai oikosulku.



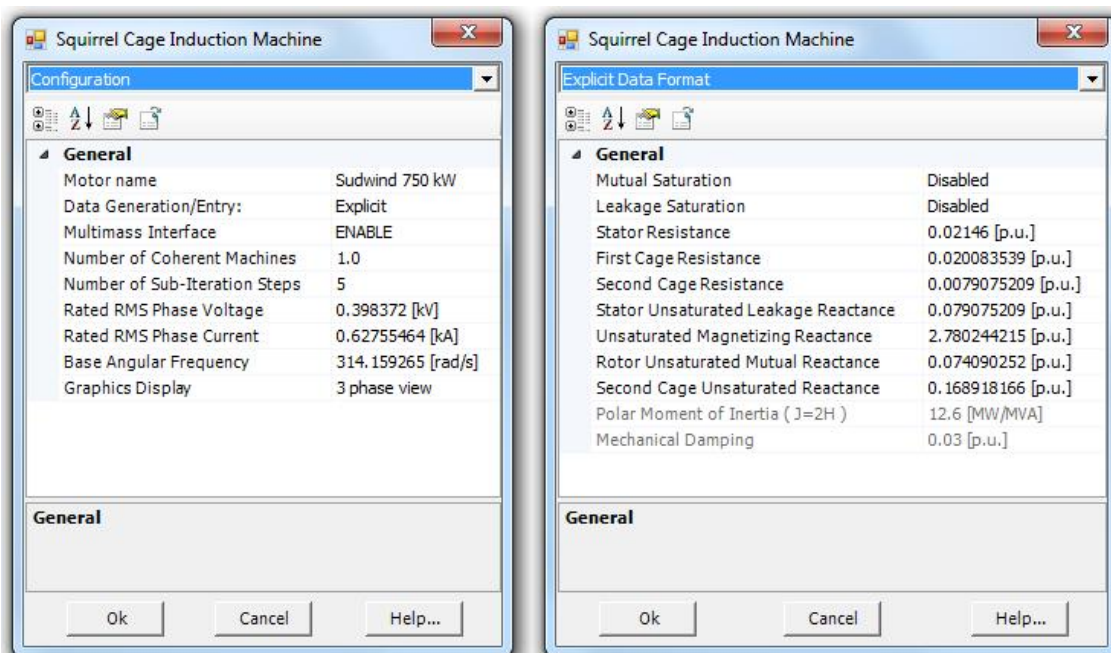
**Kuva 19.** Ilvesjoen johtolähdön simulointilohko.

Alkuperäinen tuulivoimalan malli oli parametreiltään mitoitettu kuvaamaan nimellistehoaltaan 1,65 MW voimalaa. 750 kW voimalaa vastaavat parametrit määritettiin Vaasan yliopistossa kehitetyllä induktiokoneen sijaiskytkennän parametrit laskevilla Excel-pohjaisella työkalulla. Tuulivoimalan simulointimalli on esitetty kuvassa 20 ja generaattorin parametrit kuvassa 21.



**Kuva 20.** Tuulivoimalamallin simulointilohko.





**Kuva 21.** Tuulivoimalamallin generaattorin parametrit.

Simulointimallin tuulivoimala oli tyypiltään suoraan verkkoon kytketty epätahti-generaattori. Kaksoissyötettyä generaattoria ei simuloinnissa käytetty, koska suoraan verkkoon kytketty generaattori on rakenteeltaan ja parametroinniltaan yksinkertaisempi, ja riittää kuvaamaan tarkasteltuja tilanteita.

Lähtötietoina Ilvesjoen johtolähdöstä saatiin verkkoyhtiöltä johtolajien ja -pituuksien lisäksi liittymispisteissä kulutetut vuosienenergiat. Tämän tiedon avulla voidaan johtolähdön maksimiteho niin sanotulla Velanderin kaavalla:

$$P_{\max} = k_1 \cdot W + k_2 \cdot \sqrt{W}, \quad (1)$$

missä  $W$  on vuosienenergia ja kertoimet  $k_1$  ja  $k_2$  ovat tilastollisia taulukkoarvoja, jotka on määritetty käytännön kokemusten ja mittausten perusteella. Kertoimien arvot on valittu siten, että oikea tulos saadaan käyttämällä energian yksikkönä MWh:a ja tehon yksikkönä kW:a. Verkkoyhtiöltä saatujen tietojen mukaan Ilvesjoen kulutuspisteiden kokonaisvuosikulutus oli 1 247 MWh ja kertoimien arvoina laskennassa käytettiin  $k_1 = 0,29$  ja  $k_2 = 2$ :

$$P_{\max} = 0,29 \cdot 1247 + 2 \cdot \sqrt{1247} = 432 \text{ kW}. \quad (2)$$

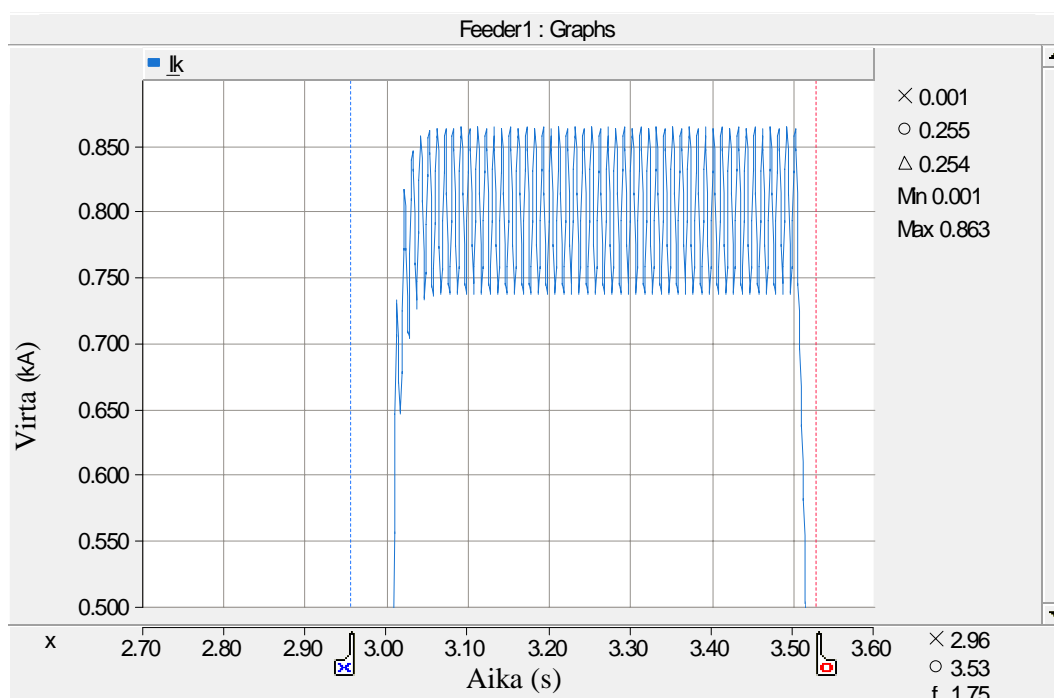
#### 4.4.1 Verkon oikosulkuteho

Ilvesjoen sähköverkkoon liitettävien generaattoreiden suurinta sallittua tehoa tutkittiin määrittämällä verkon oikosulkutehon päämuuntajasta katsoen kauemman tuulivoimalan liityntäpisteessä. Kuten kappaleessa 3.2.1 todettiin, tulee oikosulkutehon liittymispisteessä olla 25-kertainen generaattoreiden nimellistehoon verrattuna. Oikosulkuteho määritettiin verkon kuormituksen ollessa 10 % maksimitehosta  $P_{\max}$ .

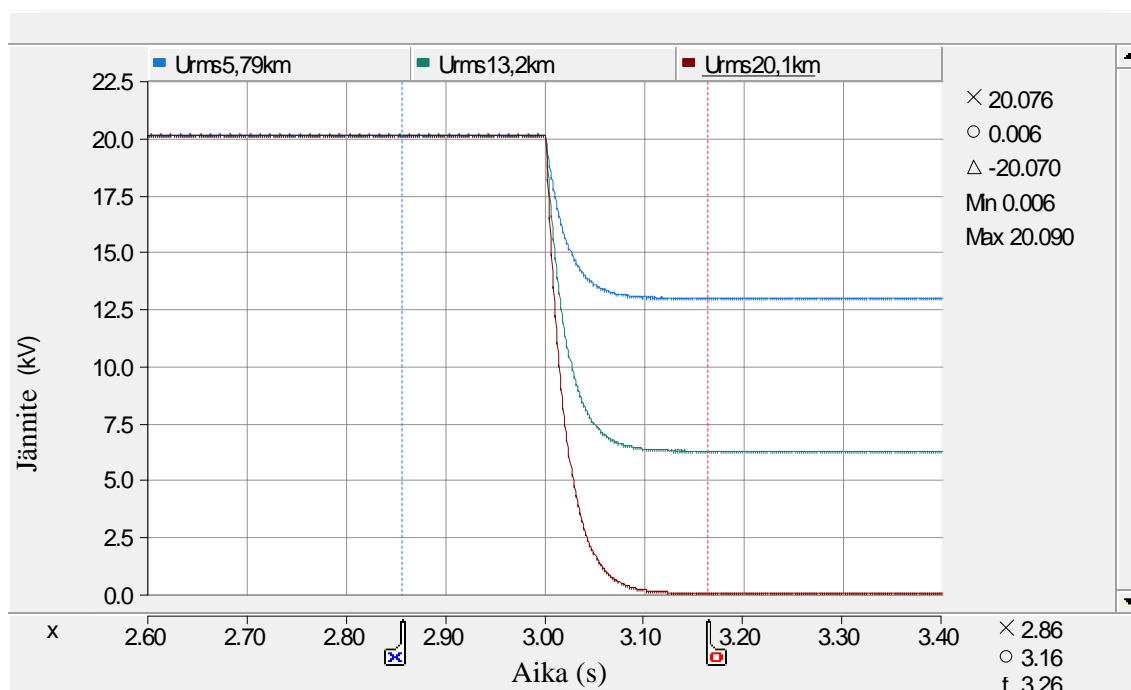
Oikosulkuteholla tarkoitetaan oikosulun aikana kuluvaa näennäistehoa ja se lasketaan ennen vikaa olevan pääjännitteen ( $U$ ) ja oikosulkuvirran ( $I_k$ ) tulona:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot I_k \cdot U. \quad (3)$$

Tuulivoimalan liityntäpisteeseen oikosulkuvirta määritettiin aiheuttamalla kolmivaiheinen oikosulku kyseiseen kohtaan simulointimallissa. Kuvassa 22 on esitetty yhden vaiheen virtamittaus oikosulun aikana ja kuvassa 23 jännitemittaus, josta voidaan lukea verkon jännite ennen vikaa.



**Kuva 22.** Oikosulkuvirran mittaus vian aikana.



**Kuva 23.** Jännitteen mittaaminen ennen oikosulkua.

Sijoittamalla kuvan 22 mittauksen keskimääräinen oikosulunaikainen virta ja kuvan 23 x-osoittimen jännitteen arvo yhtälöön 3, oikosulkutehoksi saadaan:

$$S_k = \sqrt{3} \cdot I_k \cdot U = \sqrt{3} \cdot 800 \text{ A} \cdot 20,076 \text{ kV} = 27\,818,122 \text{ kVA}. \quad (4)$$

Kun laskettu oikosulkutehon arvo jaetaan 25:llä, saadaan liitettävien generaattoreiden maksimitehoksi:

$$S_{\text{gen}} = \frac{27\,818,122 \text{ kVA}}{25} = 1112,725 \text{ kVA} \approx 1100 \text{ kVA}. \quad (5)$$

Simulointituloksen perusteella on siten mahdollista, että Ilvesjoella olevat kaksi 750 kVA:n voimalaa aiheuttavat häiriötä verkkoon ja heikentävät jännitteen laatua. Seuraavassa simuloinnissa tutkitaan tarkemmin voimaloiden vaikutusta verkon jännitteeseen.

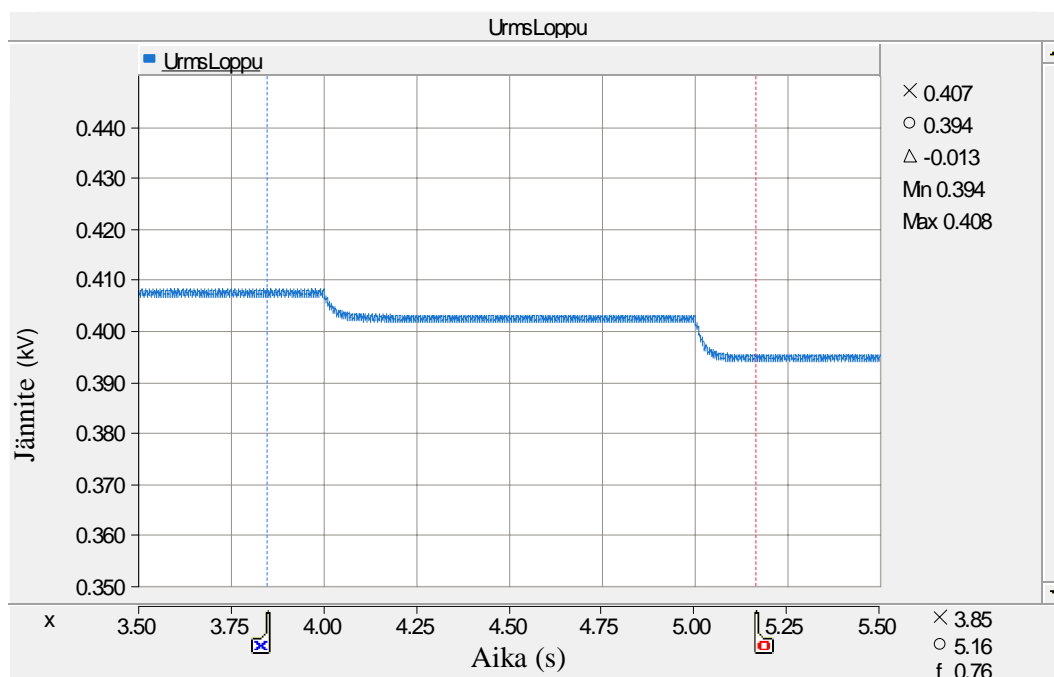
#### 4.4.2 Voimaloiden irtoaminen verkosta

Toisen simuloinnin tavoitteena oli tutkia johtolähdön jännitteenalenemää tilanteessa, jossa molemmat voimalat irtoavat verkosta niiden toimiessa nimellistehollaan. Tämä

tilanne voisi todellisuudessa tapahtua esimerkiksi kovan tuulen aikana, jolloin molempien voimaloiden kohdalla tuulen nopeus ylittää voimaloiden suurimman sallitun tuulenopeuden arvon (cut-out), eli 25 m/s.

Helen Sähköverkko Oy:n (2009b) generaattoreiden liittämisehdoissa mainitaan, että samaan liityntäpisteeseen liitettyjen voimalaitosten samanaikainen irtikytketyminen saa aiheuttaa enintään 5 % jännitemuutoksen missä tahansa verkon osassa. Vaikka Ilvesjoen voimalat onkin kytketty eri liityntäpisteeseen, tutkitaan simuloinnissa pahinta mahdollista tilannetta, eli molempien voimaloiden irtikytketymistä ja jännitteenalenemaa johtolähdön lopussa.

Simuloidussa tilanteessa johtolähdön kuormat toimivat 50 % teholla yllä lasketusta maksimitehosta  $P_{\max}$ . Tuulivoimalat asetettiin irtoamaan verkosta sekunnin välein, toinen 4 sekunnin ja 5 sekunnin kohdalla. Kuvassa 24 on esitetty mittaustulokset jännitteenalenemasta johdon lopussa olevan jakelumuuntajan pienjännitepuolelta.



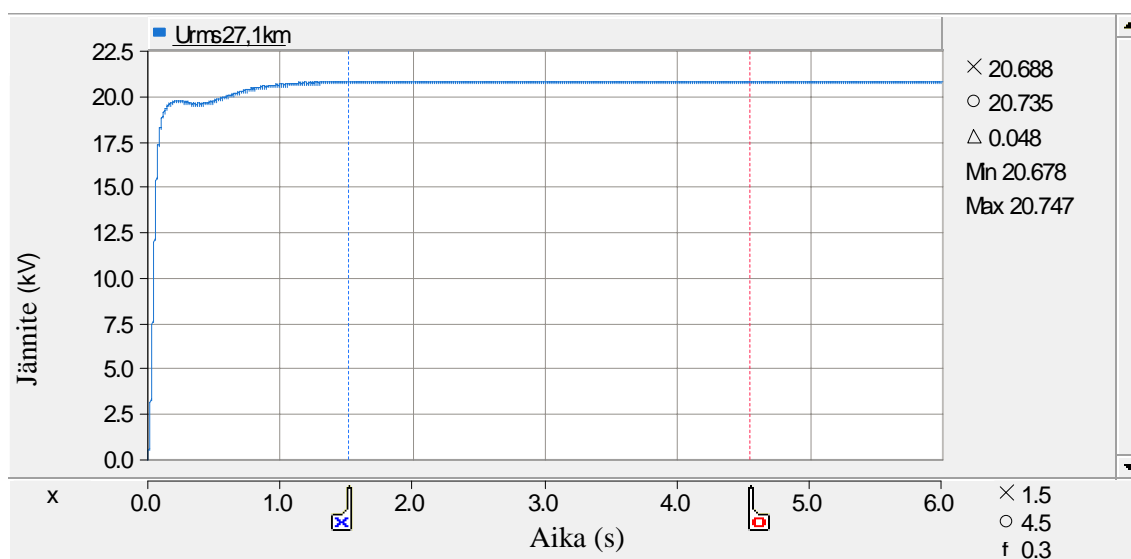
**Kuva 24.** Jännitteenalenema johdon lopussa olevan jakelumuuntajan pienjännitepuolella voimaloiden irrotessa verkosta.

Kuvasta 24 voidaan lukea x- ja o-osoittimien arvoista jännitteen laskevan 408 V:sta 394 V:iin. Jännitteenalenema on siten 14 V eli 3,55 %, joka sinänsä pysyy vielä sivulla 51 esitetyn SFS-EN-50160 -standardin määäämissä rajoissa. Toistuvana ilmiönä kyseisen suuruinen jännitteen vaihtelu saattaa kuitenkin aiheuttaa valaistuksessa havaittavaa välkyntää.

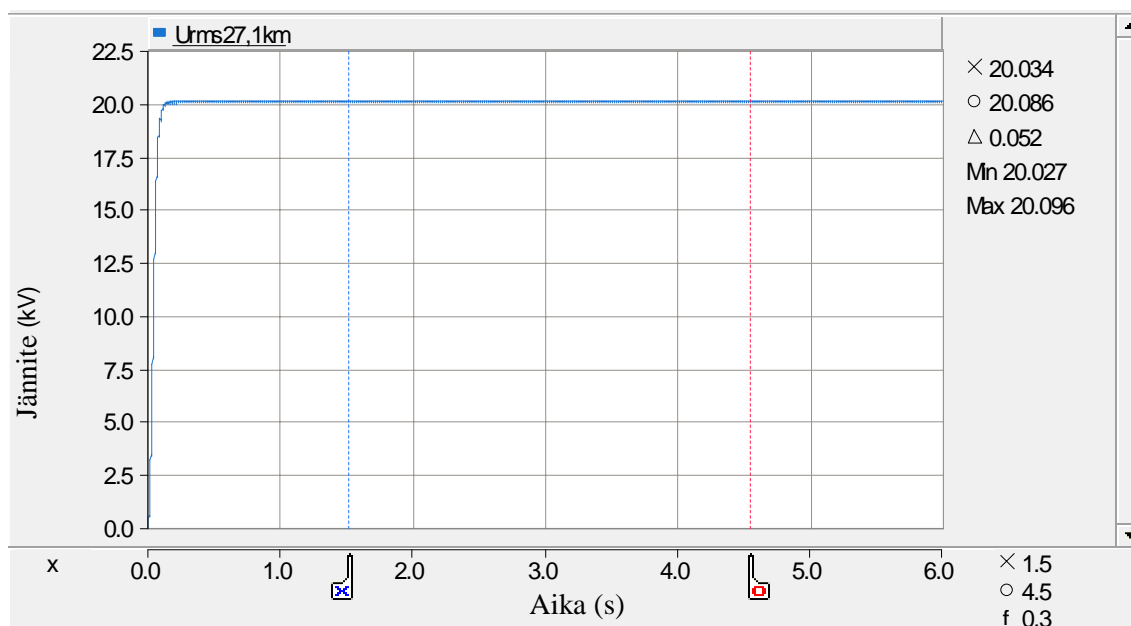
Viitteessä Kauhaniemi (2003: 68–70) on esitetty IEC 61000-3-7 standardissa määritellyt rajat erisuuruisten jännitemuutosten sallitulle esiintymiselle. Standardin mukaan keski-jänniteverkossa tapahtuva 4 % muutos jännitteessä saa tapahtua enintään kerran tunnissa, kun taas 3 % muutos taas saa tapahtua korkeintaan kymmenen kertaa tunnin aikana. Simuloinneissa tutkittu pahin mahdollinen tilanne on kuitenkin harvinainen, ja jännitevaihtelut pysyvät todennäköisesti aina yllä mainittujen rajojen sisällä, mutta voivat olla havaittavissa valaistuksen kirkkauden muutoksina.

#### 4.4.3 Jännitteen kohoaminen

Kuten kappaleessa 3.2.1 todettiin, voi jännitteen kohoamisesta muodostua ongelma hajautetun tuotannon lisääntyessä säteittäisessä verkossa ja siksi se voi olla myös rajoittava tekijä tuotannon lisäämiselle. Ilvesjoen verkossa tapahtuvaa jännitteen kohoamista tutkittaessa tuulivoimalat asetettiin toimimaan nimellistehollaan ja verkon kuormitus 10 % maksimitehosta  $P_{\max}$ . Vertailukohtaksi simuloitiin tilanne, jossa tuulivoimalat olivat irti verkosta ja kuormitus edelleen 10 % maksimitehosta. Kuvassa 25 on esitetty jännitemittaus päämuuntajalta katsottuna kauempana olevan tuulivoimalan liityntäpisteestä voimaloiden toimiessa nimellistehollaan ja kuvassa 26 voimaloiden ollessa irti verkosta.



**Kuva 25.** Jännitteenmittaus tuulivoimalan liityntäpisteessä molempien voimaloiden toimiessa nimellistehollaan.



**Kuva 26.** Jännitteenmittaus tuulivoimalan liityntäpisteessä voimaloiden ollessa irti verkosta.

Tuulivoimaloiden vaikutus jännitteen kohoamaan voidaan lukea vertaamalla kuvien 25 ja 26 simulointituloksia. Maksimiarvoja verratessa jännitteen kohoama oli 651 V eli 3,24 %. Johdon lopusta, jakelumuuntajan pienjännitepuolelta, mitattuna jännitteen kohoama oli vastaavasti 3,25 %.

Energiateollisuuden ohjeessa annetaan suunnittelukriteereinä käytetyt raja-arvot suurimmasta sallittavasta jännitteen kohoamasta. Ohjeen mukaan keskijänniteverkossa, jossa on liittyneenä myös muita asiakkaita, on suurin sallittu jännitteenmuutos 2,5 %. Pienjänniteverkossa sallittu muutos on vastaavasti 4 %. (Lehto 2011b: 3.) Tähän ohjeistukseen verrattuna Ilvesjoen tuulivoimaloiden aiheuttama jännitteen kohoaminen on sallittujen arvojen ylärajalla, kuten kappaleen 4.4.1 simuloinnissakin todettiin voimaloiden tehon osalta.

Yhteenvedona simulointitutkimuksen tuloksista voidaan todeta, että Ilvesjoen sähköverkon vahvuus riittää juuri ja juuri nykyisen tuotannon tarpeisiin. Sähköverkon kannalta haasteellisimmissa tilanteissa jännitteen laatu kuitenkin heikentyy hieman, mikä voi olla havaittavissa valaistuksen kirkkauden muutoksina.

#### 4.5 Energiaomavaraisuuden kehittämismahdollisuudet

Energiakylä-hankkeen kyliin tehdyissä energiaomavaraisuussuunnitelmissa arvioitiin mitkä tekniikat ja toimenpiteet ovat käyttökelpoisia kylän potentiaalin ja asukkaiden kiinnostuksen kannalta, sekä millä aikavälillä niiden käyttöönotto olisi kannattavaa. Kaikkien kylien kohdalla heti toteutettaviksi toimenpiteeksi luettiin energiatehokkuuden parantaminen ja rakennusten energiasaneeraukset. Saman tien voidaan lisäksi ottaa käyttöön maa- ja ilmalämpöpumppuja sekä aurinkolämpökeräimiä.

Lähivuosien toimenpiteiksi Ilvesjoen suunnitelmassa löytyi useita mahdollisuuksia käyttöönotettavista tekniikoista. Yksi varteenotettavimmista oli biokaasun tuotanto, jonka potentiaaliksi laskettiin noin 5 000 MWh vuodessa. Tämä potentiaali koostuu tuotantoeläinten lietteestä ja peltonurmesta. Biokaasua voidaan käyttää lämmitykseen ja sähkön tuotantoon, mutta korkein jalostusarvo saataisiin liikennepolttoaineen valmistuksella. Jos kylän biokaasupotentiaalia verrataan liikenteen kuluttamaan energiaan, joka on rahallisesti selvästi merkittävin osa kylän energiankulutuksesta, huomataan, että teoriassa potentiaalilla voitaisiin kattaa puolet liikenteen energiantarpeesta. Lisäksi kylän sijainti mahdollistaisi kaasun myymisen vilkkaasti liikennöidyn valtatie 3:n varrella. Biokaasulaitoksen kannattavuutta ei laskettu tämän hankkeen puitteissa, mutta yleisesti

ottaen biokaasulaitosten kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi mahdollisesti saatavat porttimaksut eli materiaalin vastaanottamisesta perittävät korvaukset.

Toinen lähivuosina hyödynnettävä mahdollisuus on toisen pienvesivoimalan rakentaminen. Ilvesjoen uomassa olisi hyvä sijoituspaikka toisellekin voimalalle, ja nykyisen voimalan omistaja pitää uuden voimalan rakentamista mahdollisena. Pienvesivoimalan rakentaminen vaatisi ympäristöluvan hakemista.

Ilvesjoen alueelle sijoittuvan tuulipuiston rakentaminen riippuu Lagerwey Development Oy:n suunnitelmista ja lupaprosessien etenemisestä. Kuten kappaleessa 4.2 todettiin, olisi tuulipuistojen rakentaminen merkittävä lisäys alueen energiantuotantoon. Merkittävien hankkeen esteistä on kuitenkin pitkän siirtolinjan rakentamisen tarve, millä on suuri vaikutus hankkeen kannattavuuteen.

Energiakylä-hankkeen tavoitteisiin kuului myös tutkia mikrosähköverkon hyödyntämismahdollisuuksia kohteena olevissa kylissä. Mikrosähköverkolla tarkoitetaan sähköverkon osaa, joka voi toimia itsenäisenä saarekkeena, vaikka syöttö jakeluverkosta katkeaa. Näin voidaan parantaa sähköverkkojen paikallista käyttövarmuutta. Mikrosähköverkko toimii normaalissa tilanteessa jakeluverkon kanssa rinnakkain. Saarekkeena sen tulee kyetä tuottamaan tarvitsemansa sähköenergia hajautetun tuotannon ja energiavarojen avulla. Optimaalisesti toimiessaan saarekkeeseen siirtyminen tapahtuu ilman katkoa sähkön syötössä kuluttajille. Tämä on kuitenkin teknisesti vielä erittäin haastavaa ja vaatii nopeaa tuotannon ja kulutuksen yhteensovittamista, mikä käytännössä vaatii energiavarojen, kuten akustojen, käyttöä. Mikrosähköverkko-konseptia vastaavia järjestelmiä käytetään lähinnä sähkön syötön kannalta kriittisissä kohteissa kuten sairaaloissa, joissa sähköä tuotetaan tyypillisesti diesel-generaattoreilla. (Laaksonen 2011, Kumpulainen & Ristolainen 2006: 79.) Niiden lisäksi mikrosähköverkkoja on toteutettu vasta pilottihankkeissa, eikä kaupallisesti valmiita konsepteja ole vielä käytössä. Lisäksi konsepteissa on vielä kehitettävää, koska ne eivät vielä täytä kaikkia mikrosähköverkoille asetettuja vaatimuksia. (Ihamäki 2012.)

Ilvesjoen osalta mikrosähköverkon toteuttaminen lähivuosina ei ole realistista. Liittymispistekohtainen tai rajoitetulla alueella toimiva mikrosähköverkko voitaisiin toteut-



taa, jos tuotanto saataisiin sovitettua kulutuksen kanssa esimerkiksi biokaasua hyödyntävän generaattorin avulla. Tällöin kyseessä olisi kuitenkin käytännössä varavoimageraattori, jota käytettäisiin vain sähkökatkojen aikana. Tämän tyyppistä generaattoria ei olisi kannattavaa käyttää jatkuvasti, eikä siirtyminen saarekkeeseen ilman sähkön syötössä tapahtuvaa katkoa olisi siten mahdollista. Toinen mahdollisuus olisi hyödyntää olemassa olevaa vesivoimalaa pienen saarekkeen energianlähteenä. Se vaatisi tosin kehittyneen ohjausjärjestelmän rakentamista vanhaan voimalaitokseen, jota ei ole suunniteltu jatkuvaan tehon säätämiseen.

Energiakylä-hankeen tavoitteiden kannalta tärkeässä roolissa oli nimenomaan pitkälle tähtäävien uusiutuvaan energiaan perustuvien ratkaisujen löytäminen. Pelkästään tällä hetkellä taloudellisesti kannattavien vaihtoehtojen listaamisen sijaan hankkeessa on pyritty ottamaan huomioon paikallisen energiantuotannon muutkin positiiviset vaikutukset. Niihin voidaan lukea muun muassa maaseudun elinvoimaisuuden lisääminen työllisyyden avulla, energiaomavaraisuuden parantaminen sekä puhtaamman energiantuotannon ympäristövaikutukset.

## 5 KOKEMUKSIA YKSITTÄISISTÄ TUULIVOIMALOISTA

Tuulivoima on Suomessa vielä varsin uusi energiantuotantomuoto, eivätkä siihen liittyvät käytännöt ole monilta osin vielä vakiintuneita. Lisäksi tiedon saanti voi olla hankalaa. Tästä syystä kokemukset tuulivoimahankkeista ovat arvokkaita oman voimalan hankintaa suunnitteleville. Ensimmäisten, varsinkin käytettyjen, voimaloiden hankkijat toimivat alan pioneereina ja heidän kohtaamansa ongelmat voivat jatkossa olla vältettävissä, kun heidän kokemuksistaan voidaan ottaa opiksi.

### 5.1 Tapaus Väkiparta, Eurajoki

Eurajoella sijaitsevalla Väkiparran tilalla otettiin vuonna 2013 käyttöön Saksasta käytettynä tuotu Enerconin valmistama 500 kW tuulivoimala. Voimala on napakorkeudeltaan 63 metriä ja siinä on suoravetoinen kestomagneettigeneraattori. Maatuuli Oy toimitti voimalan avaimet käteen -periaattella ja kokonaisinvestoinnin arvoksi tuli noin 300 000 € 500 MWh:n vuosituotannolla Väkiparta laskee investoinnin takaisinmaksuajaksi noin 15 vuotta. Naapurit ovat suhtautuneet positiivisesti voimalaan hankkeen alusta asti. (Väkiparta 2014.)



**Kuva 27.** Väkiparran tilan kupeessa sijaitseva 500 kW Enercon-voimala.

Tilalla kasvatetaan broilereita ja kalkkunoita, ja vuotuinen sähkön kulutusa on noin 200 MWh. Suuri osa tuotetusta sähköstä käytetään oman tilan tarpeisiin, mikä lyhentää takaisinmaksuaikaa. (Väkiparta 2014.)

Aikaisemmin tilalla olleeseen pienempään voimalaan saatiin 25 % investointituki, mutta nyt käytössä olevaan laitteen hankintaan ei tukea ole saatu lainkaan. Verkkoliityntä suoraan keskijänniteverkkoon onnistui helposti, koska tilalle oli jo aikaisemmin vedetty oma 20 kV sähkölinja ja asennettu puistomuuntamo. (Väkiparta 2014.)

Voimala ostettiin niin sanotusti *pystystä päin* ja tuotiin Suomeen kokonaisuutena, eli kaikki osat tulivat samasta voimalasta. Laitetta ei siis purkamisen jälkeen ole säilytetty varastossa, mikä on tärkeä asia käytettyä voimalaa ostaessa. Voimalan käyttöönotossa ilmeni kuitenkin ongelma, kun komponentit pääsivät ilmeisesti jäätymään ja generaattorikäimissä tuli oikosulku. Voimalan huollosta vastaavan Ålands Vindin huoltomiehet saivat kuitenkin korjattua vian paikanpäällä. Kaksi kertaa vuodessa tehtävät vuosihuollot teetetään myös samalla yrityksellä ja ne maksavat noin 5000 € vuodessa. Ålands Vindillä on etäyhteys voimalaan, minkä avulla sen tilaa voidaan seurata yrityksen valvomosta käsin. (Väkiparta 2014.)

## 5.2 Tapaus Riiho, Tuuri

Liikkeenharjoittaja ja maanviljelijä Terho Riiho on tuonut Suomeen yhteensä kahdeksan tuulivoimalaa, joista yksi on hänen omistuksessaan ja asennettu hänen pihapiiriinsä. Kyseinen voimala on teholtaan 600 kW ja se on saksalaisen NEG Miconin valmistama. Kyseinen valmistaja on nykyisin tanskalaisen Vestaksen omistuksessa, joten voimalan varaosia on saatavilla myös tanskasta. Voimalan kokonaisinvestointi oli arvoltaan noin 500 000 €. Huomattava osuus voimalan hinnasta muodostui kuljetuksesta, vaikka Riiho järjestikin sen itse. Nykyisillä hinnoilla vastaavan voimalan hankinta ja pystytys maksaisi Riihon mukaan vain noin 250 000 € (Riiho 2014.)



**Kuva 28.** Riihon 600 kW NEG Micon tuulivoimala (Kuva: Riiho yhtiöt.)

Voimala tuottaa vuosittain noin 400 MWh sähköä, josta omaan käyttöön kuluu 350 MWh. Riiho kehuuakin käytetyn voimalan kannattavuutta. Verkkoon myytävästä sähköenergian osuudesta maksetaan hieman pörssihintaa parempaa korvausta, koska sähköyhtiö pystyy myymään sen tuulisähkönä asiakkailleen. (Riiho 2014.)

Tuulivoimalan hankintaa suunniteltaessa Riiho painottaa ensinnäkin hyvän, ympäristöään korkeammalla olevan, paikan merkitystä. Voimalan valinnassa tulee myös olla tarkkana, jotta hankittava laite on suunniteltu sisämaassa käytettäväksi ja että sillä on aukoton huoltohistoria. Lisäksi 20 kV sähkölinja tulisi olla suhteellisen lähellä, vaikka 1,5 kilometrin etäisyys ei Riihon mukaan ole liian pitkä oman kaapelin asentamiseen kohtuullisin kustannuksin. Lupa-asiat on myös tärkeä hoitaa ajoissa ennen voimalan hankintaa. (Riiho 2014.)

### 5.3 Tapaus Hautala, Ilmajoki

Ilmajoella asuva koneyrittäjä Jarkko Hautala hankki Maatuuli Oy:n toimittamana suoravetoisen 300 kW:n Enercon E30:n, jonka investoinnin arvo oli 200 000 €. Voimala on otettu käyttöön vuonna 2012, ja se on toiminut siitä asti moitteettomasti. Voimalan teho on jouduttu sähköverkon heikkouden vuoksi rajaamaan 200 kW:iin. Vuonna 1996 valmistetun voimalan konehuoneen komponentit uusittiin vuonna 2001, kun salaman isku rikkoi laitteita. Voimalan vuosituotanto oli vuonna 2013 183 MWh ja vuonna 2014 174 MWh. Osa tuotetusta sähköstä käytetään oman kiinteistön tarpeisiin, mutta suurin osa myydään Forssan Energialle. (Hautala 2014.)



**Kuva 29.** Hautalan Enercon E30 -voimala.

Aikaisemmin Hautalalla oli käytössä Nordtankin valmistama 130 kW tuulivoimala. Sen tuotto osoittautui kuitenkin heikoksi, koska kyseinen malli oli suunniteltu rannikolla vallitsevien tuuliolosuhteiden mukaan (ProAgria 2013). Oikeantyyppisen voimalan valinta on siis erittäin tärkeää, ja Hautala itse suosittelee suoravetoisia tuulivoimaloita Suomen olosuhteisiin. Hänen mukaansa vaihdelaatikollisten voimaloiden kanssa tulee

pakkasilla ongelmia, kun vaihteiston öljy jäähtyy liikaa eikä voitele enää kunnolla. Tällöin sitä joudutaan lämmittämään, mikä kuluttaa sähköä varsinkin tuulettoman pakkaspäivän jälkeen voimalaa käynnistettäessä. Lisäksi hänen havaintojensa mukaan suorave-toinen voimala tuottaa hyvin pienilläkin tuulennopeuksilla ja on perinteistä tuulivoimalaa hiljaisempi. (Hautala 2014.)

Huoltopalvelun Hautala on hankkinut Ålands Vindiltä, joka tekee vuosittain perushuol-lon. Voimalan valinnassa Hautala pitää lisäksi tärkeänä, että valitaan tunnetun valmista-jan laite, jonka huollosta löytyy osaamista Suomesta ja varaosien hankinta on helpom-paa. (Hautala 2014.)

#### 5.4 Tapaus Pettumäen Mylly Oy, Teuva

Teuvalla asuvat naapurukset maanviljelijä Jaakko Niemi ja maanviljelijä sekä muusikko Kari Komsu perustivat Pettumäen Mylly Oy:n ja hankkivat uutena Lagerweyn valmis-taman 2,5 MW:n tuulivoimalan. Tuotettu sähköenergia myydään Turku Energialle pörs-sihinnalla, ja koska kyseessä on uusi voimala, on se oikeutettu myös valtion maksamaan tuotantotukeen. Voimala aloitti tuotantonsa vuonna 2014. (Niemi 2014, Lähienergialiit-to ry 2014)

Voimalan rakentamiseen liittyvä lupaprosessi kesti noin puolitoista vuotta, koska hanke oli ensimmäinen laatuaan alueella. Investointi oli kokonaisuudessaan noin 3 miljoonaa euroa. Voimalan vuosituotannoksi on arvioitu 6300 MWh, joka toteutuessaan olisi hui-punkäyttäjältaan hieman suomalaisen keskiarvon yläpuolella. Lagerwey hoitaa voima-lan huollot, mikä omistajien mukaan maksaa muutaman kymmen tuhatta euroa vuodes-sa. (Niemi 2014.)





**Kuva 30.** Pettumäen Mylly Oy:n tuulivoimala Teuvan kunnassa (Kuva: Jukka Kajan). Paikallisen omistuksen vaikutus tuulivoiman hyväksyntään käy ilmi hyvin Suomen Lähienergialiiton (2015) blogikirjoituksessa Pettumäen Mylly Oy:stä. Paikallisella huolto- asemalla haastatellut ihmiset suhtautuivat erittäin positiivisesti Niemen ja Komsin voimalaan. Haastatteluista käy hyvin ilmi julkisuudessakin tunnetun Komsin maine kunnassa, omistajien avoimuus hankkeen osalta sekä paikallisten asukkaiden luottamus voimalan omistajiin ylipäänsä.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityön empiirisen osuuden tavoitteena oli selvittää simulointien avulla tuulivoimaloiden verkkovaikutuksia todellisen verkon mukaan mallinnetusta verkossa. Simuloinneista käy ilmi tyypilliset säteittäiseen keskijänniteverkkoon liittyvän tuotannon ongelmatilanteet, mikä kuvastaa hyvin laskentaan perustuvan suunnittelun tärkeyttä voimaloiden verkkoon liittämiseksi. Vaikka tämän työn simuloinneissa ei keskityttykään suojauksen toimintaan, on sen suunnittelussa laskenta yhtäläillä tärkeässä roolissa eri verkon osien ja laitteiden vuorovaikutusten selvittämiseksi. Ilvesjoen sähköverkkoa mallintavan simuloinnin tuloksina havaittiin, että pahimmassa tapauksessa tuulivoimalat voivat aiheuttaa häiriötä alueen sähköverkkoon. Tulokset sopivat hyvin todellisiin havaintoihin, koska kyseisen verkon alueella on aikaisemmin havaittu satunnaista valaistuksen välkettä.

Tuulivoimaloiden kannattavuutta tarkasteltaessa havaittiin, että uusien voimaloiden osalta sähkön hinnan muutoksiin liittyvän riskin eliminoiva tuotantotuki toimii suunnitellusti, eli se tekee voimalainvestoinneista taloudellisesti houkuttelevia. Sen avulla Suomen kansallinen tavoite tuulivoimatuotannon lisäämisessä onkin mahdollista saavuttaa tietyin ehdoin. Koska tuulivoimalle sopivia alueita löytyy Suomesta tarpeeksi, riippuu tavoitteiden saavuttaminen pitkälti kaavoituksen ja lupien myöntämisen sujuvuudesta. Tässä merkittävänä tekijänä tulee olemaan etenkin yleisen hyväksynnän saavuttaminen paikallisten ihmisten keskuudessa. Laajamittaisella tuulivoimatuotannolla on lisäksi havaittu olevan monia positiivisia vaikutuksia työllisyyteen ja aluetalouteen. Rakennusvaiheessa monet työtehtävistä toteutetaan kotimaisin ja paikallisoin voimin, vaikka voimalat hankitaankin ulkomaisilta valmistajilta.

Käytettyjen voimaloiden kannattavuuden havaittiin perustuvan vahvasti oman kulutuksen kattamiseen voimalan energiantuotannolla. Tämä kävi ilmi selvästi myös tässä työssä esitettyssä laskelmassa käytetyn voimalan takaisinmaksuajasta, joissa käytetyt lähtöarvot perustuivat kotimaisiin käytännön kokemuksiin. Tulevaisuudessa käytettyjen voimaloiden hankkiminen voi muuttua aiempaa kannattavammaksi, jos sähkön hinta lähtee nousuun. Lisäksi kannattavuuteen voivat jatkossa merkittävästi vaikuttaa verokohtelun muuttuminen tai esimerkiksi nettomittauksen yleistyminen. Käytettyjen voimaloiden käyttövarmuus on kuitenkin mahdollisesti uusia heikompi, mikä osaltaan vähentää niiden houkuttelevuutta investointikohteena varsinkin, koska syöttötariffia maksetaan vain uusille voimaloille.



Energiakylä-hankkeen yleisiä tuloksia voidaan pitää merkittävänä avauksena maaseudun energiantuotannon potentiaalin hyödyntämiseksi entistä tehokkaammin tulevaisuudessa. Ihmisten ympäristöarvojen ja tuontienergiaan liittyvän epävarmuuden lisääntyessä kotimaisen energian arvostus tulee varmasti kasvamaan niin yksityisten ihmisten kuin päättäjienkin päätöksenteossa. Tämä helpottaa erityisesti pientuotannon yleistymistä selvästi, kun kuluttajien hankintapäätöksiin vaikuttavat muutkin arvot, kuin pelkän taloudellisen hyödyn saaminen. Energiaomavaraisuuden parantumisen lisäksi jo pelkästään aluetalouden vaikutukset kannustavat hajautetun energiantuotannon lisäämiseen.

Energiakylä-hanke tarjosi useita mahdollisuuksia ja tarpeita jatkoselvityksille. Tärkeimpänä jatkotoimenpiteenä olisi Energiakylä-konseptin levittäminen muualle Suomeen jatkamalla energiantuotantopotentiaalien kartoituksia sekä varsinkin tietoa levittämällä hajautetun energiantuotannon mahdollisuuksista. Hankkeen kohdekyllissä seuraava askel olisi tehdä kannattavuuslaskelmia erilaisista tuotantolaitoksista tehtyjen selvitysten perusteella ja siirtyä sen jälkeen toteuttamaan parhaat vaihtoehdot. Pientuotantoon investoiminen on kotitalouksien oman harkinnan varassa, minkä tueksi Energiakylä-hankkeessa on pyritty jakamaan hyödyllistä tietoa eri energiantuotantomuodoista.

Muita jatkoselvitysten aiheita ovat myös uusien liiketoimintamallien kehittäminen paikallisen energiantuotannon lisäämiseksi. Esimerkiksi lämpö- ja sähköenergian myynti palveluna vaikkapa maataloille voisi luoda uusia työpaikkoja. Samoin tuotantolaitosten osuusomistuksella voisi olla monia positiivisia vaikutuksia haja-asutusalueen yhteisöissä uusiutuvan energiantuotannon hyötyjen lisäksi. Energiantuotantolaitoksen perustamiselle korkea alkainvestointi on usein yksityisten henkilöiden suunnittelemien hankkeiden esteenä. Tähän yksi ratkaisu voisi olla joukkorahoitus, jonka avulla nykyään kerätään varoja varsin monenlaisille hankkeille.

## 7 YHTEENVETO

Tämä diplomityö tehtiin osana Levón-instituutin Energiakylä-hanketta, jonka tavoitteena oli laatia kohteena oleville kylille energiaomavaraisuuteen tähtäävä suunnitelma sekä levittää tietoa uusiutuvan energian tuotannon mahdollisuuksista. Näiden avulla tavoitellaan aluetalouden kehittymistä, työllisyyden lisäämistä ja päästöjen vähentämistä maaseudulla. Diplomityössä tutkittiin PSCAD-simulointien avulla yhden Energiakylä-hankkeen kylistä, Jalasjärvellä sijaitsevan Ilvesjoen, sähköverkon toimintaa, sekä annettiin kattava kuva tuulivoiman hankintaan ja käyttöön liittyvistä seikoista ja määräyksistä. Työn tavoitteena oli perehtyä etenkin yksittäisten keskijänniteverkkoon kytkettävien tuulivoimaloiden vaikutuksiin niin teknisestä kuin taloudellisestakin näkökulmasta. Teknisessä tarkastelussa painopiste oli voimaloiden verkkovaikutuksissa ja suojausessa. Taloudellinen osuus painottui käytettyinä hankittujen tuulivoimaloiden hankintaan ja kannattavuuteen liittyviin seikkoihin, joiden tutkimiseen käytettiin paljon alan toimijoiden ja voimaloiden omistajien haastatteluita.

Työn toisessa luvussa tarkasteltiin yleisellä tasolla tuulivoiman nykytilannetta, kannattavuuteen ja paikallisiin vaikutuksiin liittyviä tekijöitä sekä Suomessa vallitsevia määryksiä. Luvun tarkoitus oli olla tukemassa Energiakylä-hankkeen tiedon levitystä. Tämän luvun sisältämät perustiedot ovat tärkeitä niin tuulivoimalan hankinnasta kiinnostuneille kuin muillekin energia-alalla toimiville henkilöille. Varsinkin mediassa liikkuu tuulivoimasta hyvin monenlaista tietoa, josta osa ei perustu faktoihin tai on vanhentunut alan nopeasta kehittymisestä johtuen. Tästä syystä tietojen tuominen ajan tasalle on tärkeää, jotta aiheesta voidaan käydä rakentavaa keskustelua.

Kolmas luku käsitteli tuulivoimaan liittyvää tekniikkaa, ja siinä esiteltiin eri generaattorityyppejä ominaisuuksineen, sekä hajautetun tuotannon, etupäässä tuulivoiman, vaikutuksia sähköverkkoihin. Luvun tarkoituksena oli syventää ensimmäisen luvun teoriaosuutta ja antaa perusteet simuloinneissa tutkittuihin tilanteisiin. Suojauksen periaatteita esiteltäessä painopiste oli hajautetun tuotannon mukanaan tuomissa ongelmatilanteista. Tuulivoimaloissa käytettyjä suojausperiaatteita esiteltiin sekä verkkoyhtiöiden ohjeistuksien että todellisten voimaloiden suojausten toteutusten avulla. Konkreettiset

esimerkit suojauksesta antavat hyvän kuvan siitä, miten kirjallisuudessa esitetyt ongelmatilanteet otetaan käytännössä huomioon.

Yksi Energiakylä-hankkeen kohdekylistä, Jalasjärven Ilvesjoki, toimi tapaustutkimuskohteena tuulivoimaloiden verkkovaikutusten selvittämisessä. Samalla esiteltiin hankkeen puitteissa tehdyt selvitykset energiankulutuksesta ja tuotantopotentialista. Luvussa keskityttiin tutkimaan kylän sähköverkkoon liitettyjen, käytettyinä hankittujen, tuulivoimaloiden vaikutusta alueen verkkoon simulointien avulla. Kylässä oli aikaisemmin huomattu valaistuksessa välkyntää, joka yleensä johtuu nopeista kulutuksen tai tuotannon vaihteluista verkossa. Simuloinneissa havaittiin, että pahimmissa tilanteissa voimalat voivat aiheuttaa verkkoon näkyvää välkyntää, mutta nämä tilanteet ovat kuitenkin melko harvinaisia. Lisäksi havaittiin, että verkon vahvuus riittää juuri ja juuri nykyiselle tuotannolle, mutta uusien voimaloiden rakentaminen vaatisi verkon vahvistamistoimenpiteitä. Luvun lopussa käytiin vielä läpi hankkeessa selvitetty mahdollisuudet uusiutuvan energiantuotannon lisäämiseen paikallisten energianlähteiden avulla ja pohdittiin mahdollisuutta mikrosähköverkon rakentamiseksi, mikä todettiin kuitenkin useamman kulutuspisteen kattavassa mittakaavassa epärealistiseksi hankkeeksi.

Viidennessä luvussa tehtiin katsaus neljään yksittäiseen tuulivoimalaan, joista kolme on hankittu käytettynä. Luvun tarkoituksena oli kertoa yksityishenkilöiden kokemuksista tuulivoimainvestoinneissa. Ensimmäisten voimaloiden hankkineilla vastaavia kokemuksia ei ollut saatavilla, ja he ottivatkin suuria riskejä investointiensa toteuttamisessa. Käytettyjen voimaloiden omistajien ja maahantuojien kokemukset toimivat siten hyvänä esimerkkinä tuleville hankkeille. Samalla he ovat osoittaneet, että pienempitehoiset, alle yhden megawatin, voimalatkin voivat olla kannattavia.

Yhteenvetona tutkimuksesta voidaan todeta, että tuulivoimatuotannolla on hyvät mahdollisuudet lisätä haja-asutusalueiden elinvoimaa muun uusiutuvan energian tavoin. Tuulivoimasta saatujen kokemusten ja yleisen tietouden lisääntyessä myös hankkeiden sujuvuus tulee jatkossa parantumaan lupaprosessien ja paikallisten kanssa tehtävän yhteistyön kehittyessä. Hajautetun energiantuotannon mukanaan tuomat haasteet sähköverkoille voivat myös osaltaan lisätä työllisyyttä ja osaamista Suomessa, kun vientiin tähtäävillä yrityksillä on toimivat kotimarkkinat tuotteidensa testaamiseen.

## LÄHDELUETTELO

- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. 647 s. ISBN 0-470-85508-8.
- Ahtee, K. (2014), toimitusjohtaja, Maatuuli Oy. Sähköpostikeskustelu 10.11.2014.
- Alanen, R. & H. Hätönen (2006). *Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta*. State of art -selvitys. VTT. Espoo. 84 s.
- Alm, M. (2015). *Uusiutuvan energian toimialaraportti*. Toimialapäällikkö, Varsinais-Suomen ELY-keskus. Koneviesti 15.1.2015.
- Danmarks Vindmølleforening (2009). *Cooperatives – a local and democratic ownership to wind turbines*. Tanskan tuulivoimayhdistys. 3 s. Saatavissa: <http://www.spok.dk/consult/reports/cooperatives.pdf>.
- Elforsk (2008). *Effects of Large Scale Wind Capacities in Sweden*. Elforsk rapport 09:102. Econ Pöyry AS. 21 s.
- Elovaara, J. & L. Haarla (2011a). *Sähköverkot I*. 518 s. ISBN 978-951-672-360-3.
- Elovaara, J. & L. Haarla (2011b). *Sähköverkot II*. 550 s. ISBN 978-951-672-363-4.
- Energiavirasto (2014). Hintatilastot. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.9.2014]. Saatavissa: <http://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs>.
- Euroopan Komissio (2007). *Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius - The Way Ahead for 2020 and Beyond*. Brysseli. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0002&from=EN>.
- EWEA (2014). *Wind in power: 2013 European statistics*. The European Wind Energy Association. Helmikuu 2014. Saatavissa: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/>

publications/statistics/EWEA\_Annual\_Statistics\_2013.pdf.

Fingrid (2013). *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2013*. 87 s. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/2013/Voimalaitosten%20j%C3%A4rjestelm%C3%A4tekniset%20vaatimukset%20VJV2013.pdf>.

Gurvits, F. (2014). Tuuli tuo työtä. *Tuulivoima*. Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n sisäryhmälehti. 3/2014. 24–26.

GWEA (2012). *Community Wind Power*. German Wind Energy Association. 23 s. Saatavissa: [http://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/community-wind-power/bwe\\_broschuere\\_buergerwindparks\\_engl\\_10-2012.pdf](http://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/community-wind-power/bwe_broschuere_buergerwindparks_engl_10-2012.pdf).

Haapalainen, T. (2007). *Tuulivoimaloiden vaikutukset sähkönjakeluverkon suojaukseen ja käyttöön*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 91 s.

Hautala, J. (2014). Yrittäjä. Haastattelu. Ilmajoki. 30.5.2014.

Helen Sähköverkko Oy (2009a). *Tahdistusehdot ja suojaruleiden asetteluohje*. Saatavissa: [https://www.helen.fi/globalassets/suunnittelijat-ja-urakoitsijat/hsv/hsv-yleista-tahdistusehdot-su40309\\_12pdf](https://www.helen.fi/globalassets/suunnittelijat-ja-urakoitsijat/hsv/hsv-yleista-tahdistusehdot-su40309_12pdf).

Helen Sähköverkko Oy (2009b). *Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon*. 14 s. Saatavissa: <https://www.helen.fi/Documents/Suunnittelijat%20ja%20urakoitsijat/HSV/HSV-yleist%C3%A4-laitteiston-liitt%C3%A4minen-SU40309.pdf>.

Holtinen, H. & S. Tuhkanen (2004). *The effect of wind power on CO<sub>2</sub> abatement in the Nordic Countries*. VTT Processes, Energy Systems. VTT Espoo. 13 s. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Diss/2004/isbn9513864278/article7.pdf>.

Huhtanen, R. (2015). Käyttö- ja huoltovastaava, Leppäkosken Sähkö Oy. Puhelin-

haastattelu 28.1.2015.

Ihamäki, J. (2012). *Integration of microgrids into electricity distribution networks*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 105 s.

Ilmatieteen laitos (2011). *Suomen tuuliatlas - tuulitiedot Suomen kartalla*. Reijo Hyvönen. Esitys. 33 s. Saatavissa: <http://www.isy.fi/pdf/Tuuliatlas.pdf>.

Jantunen, M. (2015). Tuote- ja teknologiajohtaja, Ampner Oy. Sähköpostikeskustelu 22.1.2015.

Kahra, J. (2011). *SODAR-tuulimittauksen liiketoimintamahdollisuudet Suomessa*. Medvind-hanke. Liiketalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu. 73 s.

Kauhaniemi, K., T. Haapalainen, J. Nyberg, S. Voima & S. Hänninen (2008). *Tuuli-verkko loppuraportti*. Vaasan yliopisto ja VTT. Vaasa. 92 s.

Koskinen, O. (2012). *Tuulivoimatuotannon yhtiömuodot ja yhteisöllisesti omistettu tuulivoima*. Medvind-hankeraportti. Vaasan ammattikorkeakoulu. Liiketalous. 55 s. Saatavissa: [http://www.vindkraftforeningen.fi/~medvind/public/index.php?cmd=file&id=38\\_lse](http://www.vindkraftforeningen.fi/~medvind/public/index.php?cmd=file&id=38_lse).

Kumpulainen, L. & Ristolainen, I. (2006). *Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen*. VTT. 134 s.

Laaksonen, H. (2011). *Technical Solutions for Low-Voltage Microgrid Concept*. Acta Wasaensia no 241. Väitöskirja. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 271 s.

Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 1396/2010. Työ- ja elinkeinoministeriö. Helsinki.

Lang S. & McKeogh E. (2011). *LIDAR and SODAR Measurements of Wind Speed and*

- Direction in Upland Terrain for Wind Energy Purposes*. University of Cork. Irlanti. 31 s. Saatavissa: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/9/1871/pdf>.
- Lehto, I. (2011a). *Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon*. Energiateollisuus ry. 3 s. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/ohje\\_tuotannon\\_liittamisesta\\_asiakasviestintaan.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/ohje_tuotannon_liittamisesta_asiakasviestintaan.pdf).
- Lehto, I. (2011b). *Ohje verkon suunnittelijoille tuotannon liittämisestä*. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/ohje\\_verkon\\_suunnittelun\\_tueksi.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/ohje_verkon_suunnittelun_tueksi.pdf).
- Leino, J. (2014), Asset Manager, Caruna Oy. Sähköpostikeskustelu. 3.6.2014.
- Leppäkosken Sähkö Oy (2014). *Verkonhaltijan tekninen ohje voimalaitoksen liittämiseksi sähköverkkoon*. 4 s. Saatavissa: <http://www.leppakoski.fi/yrityksille/palvelumme/sahkoverkkopalvelut/getfile.php?file=228>.
- Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Ympäristöministeriö. Helsinki.
- Motiva (2012). *Opas sähkön pientuottajalle*. 40 s. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/5724/Opas\\_sahkon\\_pientuottajalle\\_2012.pdf](http://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf).
- Niemi, S. (2012). *Tuulesta tuloja metsätaloutta enemmän*. Maaseudun Tulevaisuus 2.7.2012.
- Niemi, J. (2014). Toimitusjohtaja. Pettumäen Mylly Oy. Puhelinhaastattelu. 10.9.2014.
- Nylund, A. (2013). *Tuulivoimarakentamisen kaavoitus ja vaikutusten arviointi*. Seminaariesitys. Ympäristöministeriö. Saatavissa: [www.nba.fi/fi/File/1924/agneta-nylund.pdf](http://www.nba.fi/fi/File/1924/agneta-nylund.pdf).
- Parkkari, M. & T. Perkkiö (2011). *Opas oman pientuulivoimalan hankintaan*. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 16 s. Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/files/Opas%20oman%20pientuulivoimalan%20hankintaan%20-%20Parkkari,%20Perkki%>

C3%B6.pdf.

Pellervo (2014). Osuustoiminta-lehti 3.7.2014 [online]. [Lainattu 28.7.2014]. Saatavissa: <http://otlehti.pellervo.fi/2014/03/07/esa-harmala-monipuolinen-energiantuotanto-suomen-vahvuus/>.

Pöyry (2011). *Tuulivoima ja linnusto – kokemukset ja käytännöt Suomesta ja lähialueilta*. Raportti. Heinäkuu 2011. 37 s. Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/et\\_tuulivoima\\_linnusto\\_final.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/et_tuulivoima_linnusto_final.pdf).

Renewables International (2014). [online]. [Lainattu 24.11.2014]. Saatavissa: <http://www.renewablesinternational.net/permanent-magnet-versus-double-fed/150/435/78896/>.

Repo, S., Laaksonen, H., Mäki, K., Mäkinen, K. & Järventausta, P. (2005). *Hajautetun sähköntuotannon vaikutukset keskijänniteverkossa*. Tutkimusraportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkövoimatekniikan laitos. 197 s.

Riiho, T. (2014). Yrittäjä. Puhelinhaastattelu 28.8.2014.

Saari, P. (2015). Ylitarkastaja, Ympäristö- ja luonnonvarat, Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Sähköpostikeskustelu 10.2.2015.

Salo, J. (2014). Johtaja. Yritysassiakkaat-tiimi. Elenia Oy. Puhelinhaastattelu 21.8.2014.

Sørensen, H. (2013). *Danish experience in connecting local communities and wind power*. Tanskan tuulivoimayhdistys. Saatavissa: <http://www.bioneer.ee/static/files/003/hans-chr-soerensen-compatibility-model.pdf>.

Suomen Lähienergialiitto ry (2015). Internet sivut [online] [siteerattu 22.1.2015] *Tuulivoima – hyvä renki, jos on hyvä isäntä*. Jukka Kajan. Blogikirjoitus. Saatavissa: <http://www.lahienergia.org/tuulivoima-hyva-renki-jos-hyva-isanta/>.



Suomen Lähienergialiitto ry (2014). [online]. [Lainattu 28.7.2014]. Saatavissa: <http://www.lahienergia.org/>.

Suoninen, T. (2014). Tulliylitarkastaja. Tulli. Sähköpostikeskustelu 15.10.2014.

STY (2014). Internet sivut [online] [siteerattu 7.7.2014] Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Tuulivoimatieto. Saatavissa: <http://www.tuulivoimatieto.fi/>.

Suoniemi, K. (2014). *Pientuulivoiman suunnittelu ja tuotannon ennustus kuluttajan näkökulmasta*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Tampereen teknillinen yliopisto. 110 s.

Tarasti, L. (2012). *Tuulivoimaa edistämään*. Selvitys Työ- ja elinkeinoministeriölle. 43 s. Saatavissa: [https://www.tem.fi/files/32699/Tuulivoimaa\\_edistamaan\\_A4\\_lop.pdf](https://www.tem.fi/files/32699/Tuulivoimaa_edistamaan_A4_lop.pdf).

Teknologiateollisuus ry (2009). *Tuulivoiman tiekartta 2009*.

TEM (2009). *Ehdotus tuulivoiman syöttötariffiksi*. Syöttötariffiryhmän väliraportti 2.4.2009. Helsinki. 45 s. Saatavissa: [http://www.tem.fi/files/22300/TEM\\_Syottotariffiryhman\\_valiraportti\\_02409.pdf](http://www.tem.fi/files/22300/TEM_Syottotariffiryhman_valiraportti_02409.pdf).

TEM (2013). *Kansallinen energia- ja ilmastostrategia*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 8/2013. 53 s.

Tulli (2014). *Energiaverotusohje 2014*. 32 s. Saatavissa: <http://www.tulli.fi/fi/yrityksille/verotus/valmisteverotettavat/energia/lisatietoa/energiaverotusohje.pdf>.

Tuuliatlas (2014). Suomen tuuliatlas [online]. [Viitattu 10.7.2014]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/>.

Tuulisampo Oy (2014). AQ500 Wind Finder Ominaisuudet [online]. [Viitattu 10.7.2014]. Saatavissa: <http://www.tuulisampo.fi/tuotteet/aq500-wind-finder/ominaisuudet.html>.

- Tuulivoimaopas (2014) [online]. [Viitattu 18.7.2014]. Saatavissa: <http://www.tuulivoimaopas.fi/>.
- Turkia, V. & H. Holttinen (2013). *Tuulivoiman tuotantotilastot*. Vuosiraportti 2011. VTT. 55 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T74.pdf>.
- Valtioneuvoston asetus energiatuen myöntämisen yleisistä ehdoista 1313/2007. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Helsinki.
- Verohallinto (2014) Tuulivoimalaitosten ja niiden rakennuspaikkojen käsittely verotuksessa [online]. [Viitattu 16.10.2014]. Saatavissa: [http://www.vero.fi/fi-FI/Syventavat\\_veroohjeet/Kiinteistoverotus/Tuulivoimalaitosten\\_ja\\_niiden\\_rakennuspaikka\(34441\)#2\\_Tuulivoimalaitoksen\\_rakennuspaikka\\_](http://www.vero.fi/fi-FI/Syventavat_veroohjeet/Kiinteistoverotus/Tuulivoimalaitosten_ja_niiden_rakennuspaikka(34441)#2_Tuulivoimalaitoksen_rakennuspaikka_).
- Vierros, T. (2009) Investointilaskelmat [online]. Aalto yliopisto. [Viitattu 2.9.2014]. Saatavissa: <https://wiki.aalto.fi/display/TU22/8.+Investointilaskelmat>.
- Voima, S. (2009). *Hajautetun tuotannon suojareleistyksen toiminnalliset vaatimukset*. Diplomityö. Sähkötekniikka. Vaasan yliopisto. 87 s.
- VTT (2014). *Wind energy statistics in Finland 2013*. 11.6.2014 Espoo. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/files/projects/windenergystatistics/VTT\\_Wind\\_energy\\_statistics\\_Year\\_report\\_2013\\_public.pdf](http://www.vtt.fi/files/projects/windenergystatistics/VTT_Wind_energy_statistics_Year_report_2013_public.pdf).
- Wizelius, T. (2014). *Windpower Ownership in Sweden: Business Models and Motives*. University of Lund. Ruotsi. 178 s.
- Wizelius, T. (2010). *Vindkraft tillsammans*. Vindform förlag. 127 s. Saatavissa: <https://www.natverketforvindbruk.se/Global/Aktiviteter/Projekt/Vindkraft%20tillsammans.pdf>.
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N. & Kouro S. (2011). Power Conversion and Control of

Wind Energy Systems. IEEE Press Series. 453 s. ISBN 978-0-470-59365-3.

WWEA (2013). *Small Wind World Report Update*. World Wind Energy Association.

Saatavissa: [http://www.wwindea.org/webimages/SWWR\\_summary.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/SWWR_summary.pdf).

WWEA (2014). *Key Statistics of World Wind Energy Report 2013*. World Wind Energy Association.

7.4.2014 Shanghai. Saatavissa: [http://www.wwindea.org/webimages/WWEA\\_WorldWindReportKeyFigures\\_2013.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_WorldWindReportKeyFigures_2013.pdf).

WWF (2007). *WWF Suomen kanta tuulivoimasta Suomessa*. 20 s. Saatavissa:

[http://www2.wwf.fi/wwf/www/uploads/pdf/tuulivoimakannanotto\\_wwfsuomi\\_05032007.pdf](http://www2.wwf.fi/wwf/www/uploads/pdf/tuulivoimakannanotto_wwfsuomi_05032007.pdf).

Väkiparta, A. (2014). *Maanviljelijä*. Eurajoki. Haastattelu. 15.5.2014.

YLE (2013) Uutinen 9.1.2013 [online]. [Viitattu 4.8.2014]. Saatavissa: [http://yle.fi/uutiset/lupaprosessi\\_hidastaa\\_tuulivoimalan\\_perustamista/6442615](http://yle.fi/uutiset/lupaprosessi_hidastaa_tuulivoimalan_perustamista/6442615).

Ympäristöministeriö (2012). *Tuulivoimarakentamisen suunnittelu*. Ympäristöhallinnon

ohjeita 4/2012. 92 s. Saatavissa: [http://www.tuulivoimaopas.fi/files/38/Tuulivoimarakentamisen\\_suunnittelu.pdf](http://www.tuulivoimaopas.fi/files/38/Tuulivoimarakentamisen_suunnittelu.pdf).

Ympäristöministeriö (2014). *Tuulivoimaloiden melun mallintaminen*. Ympäristöhallinnon

ohjeita 2/2014. 56 s. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42937/OH\\_2\\_2014.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42937/OH_2_2014.pdf?sequence=1).

Ympäristönsuojelulaki 86/2000. Ympäristöministeriö. Helsinki.



## LIITE 2. Kiinteistöverolaskelma.

## Kiinteistövero - Esimerkilaskelma 3 MW voimalalle

		Vuosi		Vuosi	
			Vero		Vero
Hankintahinta	1 000 000 €	1	7 500 €	13	5 535 €
Verotettava	750 000 €	2	7 313 €	14	5 397 €
Kiinteistövero	1,00 %	3	7 130 €	15	5 262 €
Ikäalennus	2,50 %	4	6 951 €	16	5 130 €
Vähimmäisarvo	40,00 %	5	6 778 €	17	5 002 €
=	3 000 €	6	6 608 €	18	4 877 €
		7	6 443 €	19	4 755 €
		8	6 282 €	20	4 636 €
		9	6 125 €		<u>119 194 €</u>
		10	5 972 €		
		11	5 822 €		
		12	5 677 €		
			<u>78 600 €</u>		