

Miika Metso

Tuulivoimaa rivitaloon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

11.5.2015

Tekijä Otsikko	Miika Metso Tuulivoimaa rivitaloon
Sivumäärä Aika	45 sivua + 3 liitettä 11.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Sampsa Kupari
<p>Työn tavoitteena oli tutkia alle 50 kVA:n nimellistehollisia verkkoon kytkettäviä pientuulivoimaloita, joita olisi taloudellisesti kannattavaa asentaa erikokoisiin rivitaloihin. Tutkimuksessa käytettyjen rivitalojen oletettiin olevan osa kaukolämpöverkkoa.</p> <p>Kirjallinen tutkimus suoritettiin vertailemalla WinForce-tuulivoimalan energiantuotantoa suhteessa tuuliolosuhteisiin 24 metrin korkeudella. Erikoisten rivitalojen vuotuinen energiantarve arvioitiin ja sitä verrattiin tuulivoimalan vuotuisen energiantuotantoon. Mittaukset tehtiin olettaen, että voimalan maston korkeus on 24 metriä.</p> <p>Työn tuloksena saatiin WinForce-tuulivoimalan energiataselaskenta muutamilla tuulivoimalan sijoituspaikoilla. Laskelmat osoittivat, että rivitalon koko vaikuttaa kannattavuuteen. Energiataselaskennan avulla voitiin päätellä, että voimalan hankinta ei olisi kannattavaa Lappeenrannan ja Vantaan sijoituspaikoissa, joissa vuoden tuulennopeuden keskiarvo oli 2,3 m/s ja 4,3 m/s. Sähkön kokonaishinnaksi oletettiin 0,1204 €/kWh ja voimalan käyttöikäksi 15 vuotta. Laskelmat kuitenkin osoittivat, että jos käyttöiän oletettaisiin olevan yli 15 vuotta, niin WinForce-voimalan hankinta tulisi kannattavaksi isossa rivitalossa Oulun sijoituspaikassa, jossa vuoden tuulennopeuden keskiarvo oli 5,1 m/s.</p> <p>Työssä käytettyjä menetelmiä voisi soveltaa myös muiden pientuulivoimaloiden kannattavuuden karkeaan arviointiin tietyillä alueilla rivitaloissa ja muissa rakennuksissa. Jos laskentamenetelmää kehitettäisiin, sen avulla voitaisiin saada nopeasti karkea arvio sääasemien ja mittauspisteiden läheisyydessä sijaitsevien alueiden kannattavuudesta tuulivoiman hankintaan. Samalla saataisiin myös tietoa alueelle parhaiten sopivasta voimalatyypistä.</p>	
Avainsanat	Tuulivoima, rivitalo, energiatase

Author Title	Miika Metso Wind Turbine for a Row House
Number of Pages Date	45 pages + 3 appendices 11 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electric Power Engineering
Instructor	Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>The aim of this study was to find small grid connected wind turbines, rated less than 50 kVA, which would be economically profitable to apply in different sizes of row houses. Row houses used in this study are part of district heating network.</p> <p>The study was conducted with WinForce wind turbine by comparing the produced energy to the windspeed conditions at 24 meter height. The yearly electricity consumption in different sized row houses were approximated and compared with the yearly energy production of WinForce wind turbine. Calculations were made with default 24 meter wind turbine tower height.</p> <p>The end result is an energy balance calculation for WinForce turbine in certain locations in Finland. According to the calculations, the size of the row house affects the viability of the wind turbine. The energy balance calculation shows that purchasing of this wind turbine is not profitable in certain locations in Lappeenranta and Vantaa where yearly average wind speeds were 2.3 m/s and 4.3 m/s if the total price of electricity is 0.1204 €/kWh and the lifespan of the wind turbine is 15 years. However, calculations show that if the row house is large and lifespan of the wind turbine is over 15 years, it would be profitable to invest in WinForce turbine in certain location in Oulu where yearly average wind speed was 5.1 m/s.</p> <p>The methods used in this study could also be applied in rough viability estimations of different kind of wind turbines in row houses and other buildings in certain areas. If the calculation methods used in this study were developed it might be possible to get rough estimation of certain area viability for wind turbine investment. This method would be valid if the areas are located near to the weather measurement stations. At the same time the model could give information which kind of wind turbine would be most profitable to install in certain area.</p>	
Keywords	Wind power, row house, energy balance

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tuulivoima Suomessa	1
2.1	Tuulivoiman tilanne Suomessa nyt ja tulevaisuudessa	1
2.2	Tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta	1
2.3	Pientuulivoiman tuet	3
2.4	Tuulivoimalan tuottaman sähkön käyttö	3
3	Tuulivoima muualla maailmassa	3
4	Erilaisia tuulivoimaloita	4
4.1	Pysty- ja vaaka-akseliset tuulivoimalat	4
4.2	Tulevaisuuden tuulivoimalat	5
4.2.1	SheerWind	5
4.2.2	Altaeros Energies	6
5	Tuulivoimalan lisäys rivitaloon	7
5.1	Voimalan sijainti	7
5.2	Ääni- ja näköhaitat	8
5.4	Tuulivoimatuotannon liitäntä kantaverkkoon	9
5.5	Luvat rakennusvalvonnalta	9
6	Sähkönkulutus	10
6.1	Sähkönhinta	10
6.2	Sähkönkulutus rivitalossa	10
7	Tuulennopeudet eri korkeuksilla	11
7.1	Tuuliatlas	11
7.2	Ilmatieteen laitoksen avoimen datan palvelu	11
7.3	Tuulennopeus 24 metrin korkeudella	12
8	Tuulivoimaloiden hankintakustannukset	14

9	Energiatase	16
9.1	Rivitalon sähkönkulutuksen indeksit ja energiataseen laskenta	16
9.2	WinForcen tehokäyrä	19
9.3	WinForcen tehontuotanto 24 metrin korkeudessa	21
9.4	WinForcen energiatase viiden asunnon rivitalossa	23
9.5	Takaisinmaksuajat viiden asunnon rivitalossa	26
9.6	Tuulivoimalla tuotetun sähkön hinta	27
9.7	WinForcen energiatase 12 asunnon rivitalossa	28
9.8	Takaisinmaksuajat 12 asunnon rivitalossa	32
9.9	WinForcen energiatase erikokoisissa rivitaloissa	32
9.10	Rivitalon koon suhde takaisinmaksu-aikaan	36
10	Päätelmät	39
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Energiatase Lappeenrannassa	
	Liite 2. Energiatase Vantaalla	
	Liite 3. Energiatase Oulussa	

Lyhenteet

AROME	Sääennustusmalli, joka kuvaa säätä esimerkiksi 250 x 250 neliömetrin ja 2,5 x 2,5 neliökilometrin kokoisen alueen tarkkuudella.
IFS	<i>Integrated Forecasting System</i> . Globaali hydrostaattinen ilmakehämalli, jota käyttää Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskus.
HIRLAM	<i>High Resolution Limited Area Model</i> . Sääennustusmalli, jota Ilmatieteen laitos käyttää kahden vuorokauden ennusteiden tuottamiseen.
TSR	<i>Tip-speed ratio</i> . Tuulivoimalan lavankärjen nopeuden suhde tuulennopeuteen.
UTC	<i>Universal Time, Coordinated</i> . Koordinoitu yleisaika, joka seuraa kansainvälistä atomiaikaa. Suomessa kesäaikaan kolme tuntia jäljessä ja talvella kaksi tuntia jäljessä paikallista aikaa.
WAsP	Malli, jonka avulla voidaan kuvata alueen tuulienergiapotentiaali, tuulivoimaloiden tuottama energia, tuuli-ilmasto ja tuulisuusjakauma.

1 Johdanto

Insinööriyössä tutkitaan alle 50 kVA:n verkkoon liitettävää pientuulivoimalaa erikokoisissa rivitaloissa, jotka kuuluvat kaukolämpöverkkoon. Muutamien voimalatyyppejen (Ilmari 7,5 kW, WindSpot 10 kW ja WinForce 10 kW) investointi- ja asennuskustannukset selvitetään. Tavoitteena on laskea WinForce-tuulivoimalan energiatase kolmella sijaintipaikalla sääasemilta ja Tuuliatlas-palvelusta saatujen tuulennopeustietojen avulla. Rivitalon optimaalista kokoa, voimalalla tuotetun energian määrää, voimalan takaisinmaksuaikaa ja tuotetun sähkönhintaa tutkitaan energiataseen avulla.

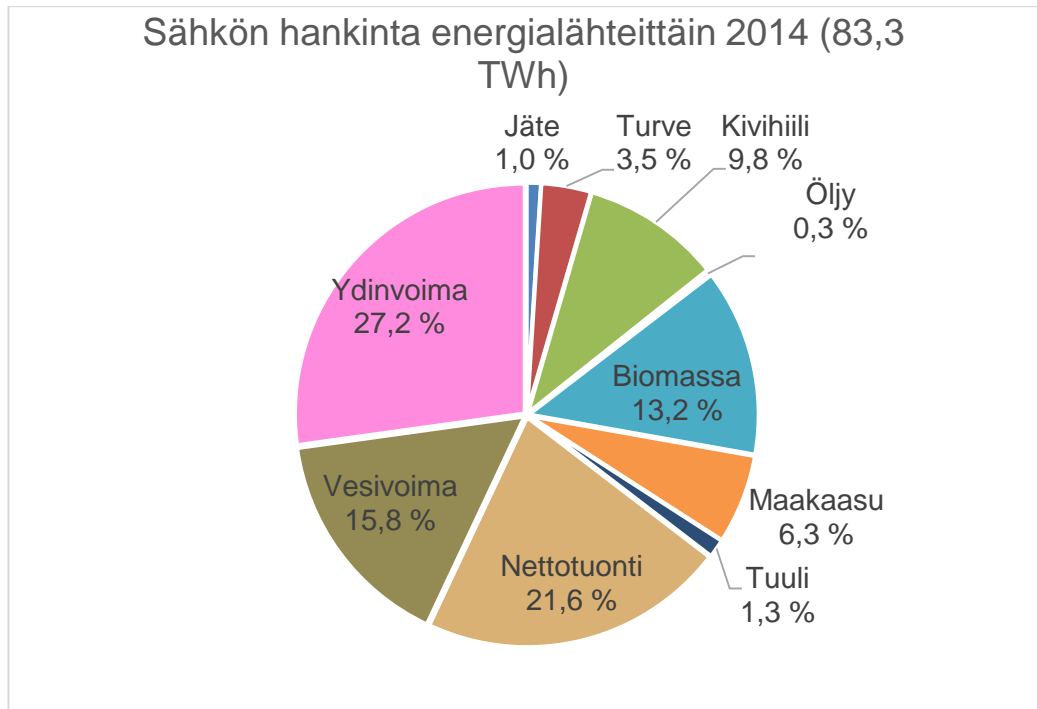
2 Tuulivoima Suomessa

2.1 Tuulivoiman tilanne Suomessa nyt ja tulevaisuudessa

Vuoden 2014 lopussa Suomen tuulikapasiteetin yhteenlaskettu teho oli 627 megawattia ja Suomessa oli 260 tuulivoimalaa [1, s. 4; 2]. Suomen tuulivoimasähkön tuotannon nostaminen yhdeksään terawattituntiin vuoteen 2025 mennessä on asetettu tavoitteeksi Suomen energia- ja ilmastostrategiassa (2013). Tämä tarkoittaa tuulivoiman tuotantokapasiteetin nostamista noin 3 000 MW:iin [3]. Suomessa tuulivoima työllisti vuonna 2008 suoraan noin 3 000 henkilöä. On mahdollista, että tuulivoimateollisuus työllistää jopa 30 000 henkilöä vuoteen 2020 mennessä [4].

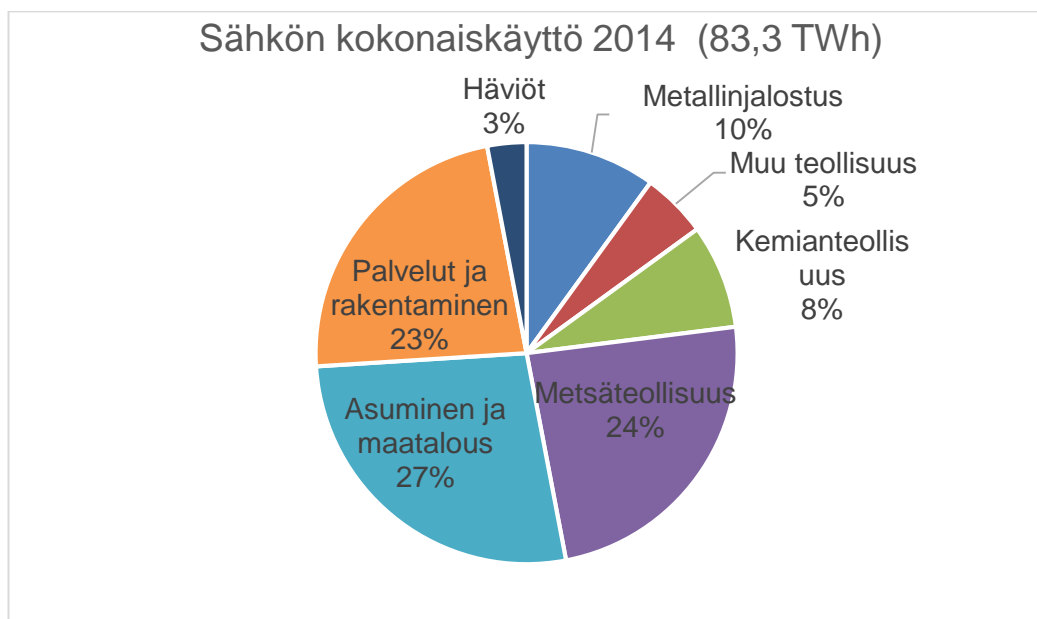
2.2 Tuulivoiman osuus Suomen sähköntuotannosta

Suomen kaikesta sähkönkulutuksesta katettiin tuulivoimalla vuoden 2014 aikana 1,3 prosenttia. Sähkön hankinta energialähteittäin näkyy kuvasta 1. Yhteensä energiaa kului 83,3 TWh. Tuulivoimalla tuotettiin vuonna 2014 yli miljardi kWh sähköä. [5, s. 9; 2.]



Kuva 1. Sähkön hankinta Suomessa energialähteittäin vuonna 2014 [5, s. 9]

Tilastokeskuksen mukaan pelkästään asumiseen eli asuinrakennusten lämmitykseen ja kotitalouslaitteisiin kului 21,5 TWh sähköenergiaa vuonna 2013 [6, s. 1]. Sähkönkäyttö vuonna 2014 nähdään kuvasta 2. Vuonna 2014 asumiseen ja maatalouteen kului sähköä yhteensä 22,5 TWh. [5, s. 5.]



Kuva 2. Sähkön kokonaiskäyttö Suomessa 2014 [5, s. 5]

2.3 Pientuulivoiman tuet

Pientuulivoimaksi määritellään sellaiset tuulivoimalat, joiden potkurin pinta-ala on alle 200 m². Käytännössä pientuulivoimaloita ovat alle 50 kVA nimellistehon omaavat tuulivoimalat [7]. Alle 50 kVA:n tuulivoimalat on vapautettu sähköverosta. Yritykset, kunnat ja muut yhteisöt voivat saada energiatukea pientuulivoimalan investointiin. Asukasyhtiö ei kuitenkaan voi saada energiatukea. Jos pientuulivoimala rakennetaan jo olemassa olevaan omakotitaloon tai kesämökkiin, tontilla tehdyn voimalan rakentamiskustannuksen työn osuudesta voi Verohallinnon Kotitalousvähennys-ohjeen mukaan saada kotitalousvähennystä. On tärkeää huomioida, että vähennykseen ei kuitenkaan ole oikeutta uudisrakentamisessa ja muut tuet voivat estää vähennyksen saamisen [8, s. 5].

2.4 Tuulivoimalan tuottaman sähkön käyttö

Tuulivoimalan tuottama sähkö voidaan varastoida akkuihin tai liittää suoraan osaksi talon lämmitysjärjestelmää. Lämmitysenergian tuotossa voimala liitetään yleensä rakennuksen lämmitysjärjestelmän vesi- tai massavaraajaan ja lämpimän käyttöveden varaajaan. Veden lämmittämisessä vesivaraajan koon tulisi olla riittävän iso eli yli 500 litraa. Silloin tuuliset ajankohdat saadaan hyödynnettyä parhaiten [8, s. 6]. Tuulivoimalan sähkö voidaan myös muuttaa normaaliksi sähköksi eli yksivaiheiseksi 230 V:n verkkojännitteeksi ja liittää talon sähköverkkoon ja valtakunnalliseen sähköverkkoon. Tämä tapahtuu verkkoinvertteriksi eli kantaverkkokytkimeksi kutsutulla laitteella.

3 Tuulivoima muualla maailmassa

Eniten asennettua tuulivoimakapasiteettia oli vuoden 2014 lopussa Kiinassa (114,6 GW), USA:ssa (65,9 GW), Saksassa (39,2 GW), Espanjassa (23 GW) ja Intiassa (22,5 GW). Ruotsissa oli asennettuna 5 425 MW tuulivoimakapasiteettia eli yli 8,6 kertaa niin paljon kuin Suomessa. Tanskassa kapasiteettia on myös paljon, 4 883 MW. [9, s. 7.]

4 Erilaisia tuulivoimaloita

4.1 Pysty- ja vaaka-akseliset tuulivoimalat

Yleinen tuulivoimaloiden luokittelutapa on jakaa ne pysty- ja vaaka-akselisiin voimaloihin. Pystyakselisissa tuulivoimaloissa (VAWT, Vertical-axis Wind Turbine) tuuli virtaa voimalan akselia vastaan kohtisuorasti. Vaaka-akselisissa voimaloissa (HAWT, Horizontal-axis Wind Turbine) ilma virtaa voimalan akselin suuntaisesti. Kuvassa 3 voidaan nähdä pysty- ja vaaka-akselinen tuulivoimala. [10.]



Kuva 3. Vasemmalla pysty-akselinen ja oikealla vaaka-akselinen voimala [11, s. 4; 12, s. 16]

4.1.1 Pystyakseliset tuulivoimalat

Pystyakselisten tuulivoimaloiden pyörimisnopeudet ovat usein alhaisempia kuin vaaka-akselisten voimaloiden. Pystyakselisten tuulivoimaloiden etuna on, että ne eivät tarvitse myrskysuojausta ja ne sopivat hyvin katoille ja pihaille, joissa tuuli on turbulენტista. Pystyakselisiä voimaloita ovat mm. Savonius-, Lenz- ja Darrieus-tyyppiset voimalat. Suomalainen Windside-yritys on kehittänyt oman pystyakselisen tuulivoimalan. Suurin Windside'n tuulivoimala WS-12 on pyyhkäisy-pinta-alaltaan 12 m² [13]. [14, s. 7; 15, s. 12.]

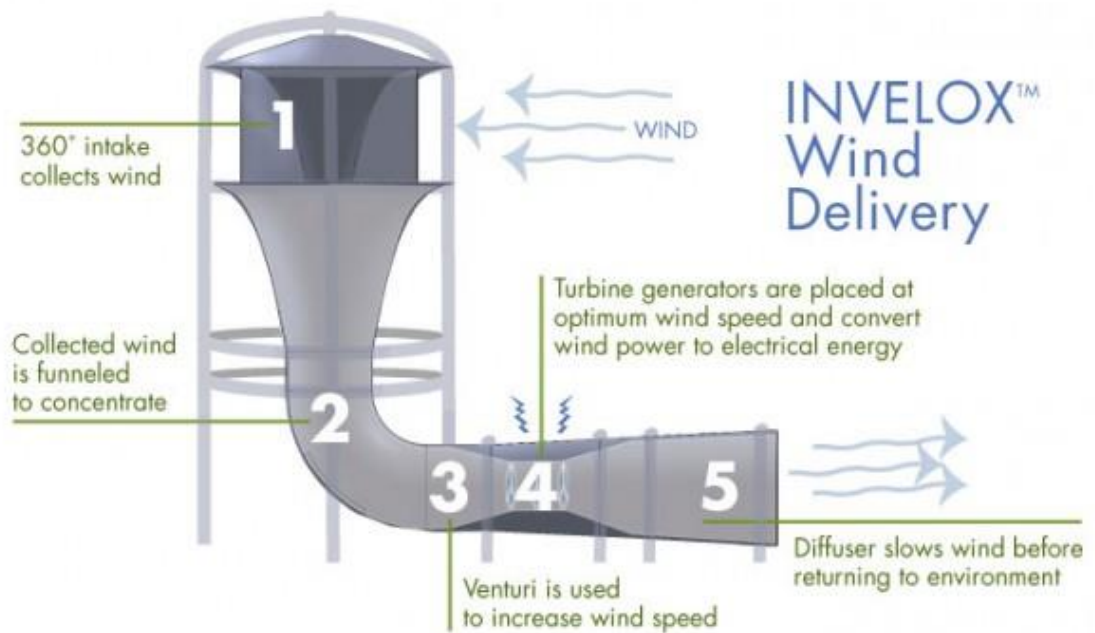
4.1.2 Vaaka-akseliset tuulivoimalat

Vaaka-akselisissa tuulivoimaloissa yleisin käytetty tyyppi on 3-lapainen voimala, koska sillä on hyvä rakenteellinen tasapainotus, joka takaa lapojen vakaan, tasaisen pyörimisen. Lisäksi 3-lapaisen voimalan käyntiinlähtö on kohtuullinen heikoissakin tuulissa. TSR-arvoa (tip-speed ratio) käytetään vaaka-akselisen turbiinin hyötysuhteen yhtenä määrittely-osana. TSR tarkoittaa lavankärjen nopeutta suhteessa tuulen nopeuteen. Mitä suurempi TSR-arvo on, sitä helpompi tuulivoimalan on saavuttaa korkea hyötysuhde. Toisaalta suurella TSR-arvolla saavutetaan myös suurempi melu-haitta ja lapojen rakennetta pitää vahvistaa keskipakoisvoimien takia. TSR-arvo on yleensä korkeampi vaaka-akselisilla voimaloilla kuin pystyakselisilla. Yksilapaisilla vaaka-akselisilla voimaloilla saavutetaan suurin pyörimisnopeus, mutta voimala käynnistyy heikoilla tuulilla melko huonosti ja lisäksi yksilapainen rakenne aiheuttaa voimalalle tasapainotusongelmia. 2-lapaisen voimalan tasapainotusongelmat eivät ole niin pahoja, mutta niillä on huonompi käyntiinlähtö kuin kolmilapaisilla. Tuulisilla alueilla 2-lapaisilla voimaloilla saavutetaan kuitenkin parempi hyötysuhde kuin kolmilapaisilla. [15, s. 11.]

4.2 Tulevaisuuden tuulivoimalat

4.2.1 SheerWind

Amerikkalainen SheerWind-yhtiö on kehittänyt INVELOX-tuulivoimalan, jonka periaatteena on siepata korkealla kovaa puhaltava tuuli maantasolle sijoitettuun turbiiniin suppilomaisen rakenteen avulla (ks. kuva 4). Suppilorakenteeseen voidaan sijoittaa useita turbiineita, jolloin hyöty saadaan maksimoitua. Esimerkiksi 57 m korkea kolmiturbiininen Leo-04-1M tuottaisi teoriassa 12 m/s tuulennopeudella 4,4 MW tehoa. Vertaillaan voimalan tuottamaa tehoa vaikka tuulipuistoissa usein käytettyyn Enercon-yhtiön vaaka-akseliseen E-82-tuulivoimalaan. E-82-voimala tuottaisi 12 m/s tuulennopeudella 2,3 MW tehon, mutta voimalan kokonaiskorkeus olisi noin 119 m. INVELOX-voimalat ovat kuitenkin vielä kehitysvaiheessa. [16; 12, s. 11.]



Kuva 4. SheerWind-yhtiön INVELOX-tuulivoimala [17]

SheerWindin tehokkain malli eli kolmoisturbiinilla toteutettu 219 m korkea Leo-16-25M tuottaisi teoriassa 5 m/s tuulennopeudella noin 5 MW tehoa ja 12 m/s tuulennopeudella jopa 70 MW. Enerconin tehokkain ja uusin malli, E-126, tuottaisi 5 m/s tuulennopeudella 410 kW tehoa ja 12 m/s tuulennopeudella 5,75 MW. E-126 maksimiteho olisi 7,58 MW ja turbiini tulisi sijoittaa 127 metrin korkeudelle, jolloin yhteyskorkeudeksi siipien kanssa tulisi 199 m [12, s. 16]. Kolmoisturbiinilla varustetun Leo 16-25M-mallin arvioidaan teoriassa pystyvän kattamaan 5 m/s tuulennopeudella yli 12 000 talon sähköntarve Saksassa, jossa yhden talouden vuotuinen sähköntarve on keskimääräinen 3 515 kWh. Yli 12 m/s tuulennopeudella pystyttäisiin tuolla mallilla Saksassa kattamaan yli 173 000 talon sähköntarve. [18.]

INVELOX-voimalan käytännön pilotti projekti on käynnistetty 200 kW:n voimalalla Floridassa, USA:ssa tammikuussa 2015.

4.2.2 Altaeros Energies

Altaeros Energies-yhtiön BAT-tuulivoimalan idea on saada tuuliturbiini mahdollisimman korkealle taivaalle, jopa 600 metriin, jotta siellä puhaltavia voimakkaita ylätuulia voitaisiin

hyödyntää. BAT-tuulivoimalan on arvioutu tuottavan jopa kaksi kertaa niin paljon energiaa, kuin saman tehoisen perinteisen mastoon asennettavan tuulivoimalan. BAT-tuulivoimalan turbiini on asennettu heliumilla täytetyn kuoren keskelle, joka nostetaan ilmaan ja pidetään sopivalla korkeudella liekojen avulla. Liekoja pitkin kulkee turbiinin ja maaseaman välinen sähköjohto. Maa-asemassa on automaattinen kontrollointijärjestelmä, joka seuraa turbiinin korkeutta ja vakautta. Turbiinin tuottama sähkö käsitellään maasemassa ennen sen syöttämistä verkkoon tai asiakkaan laitteistoon. BAT-tuulivoimala näkyy kuvassa 5. [19.]



Kuva 5. Altaeros Energies-yhtiön BAT-tuulivoimala [19]

5 Tuulivoimalan lisäys rivitaloon

5.1 Voimalan sijainti

Voimalan sijainnista kannattaa keskustella voimalan myyjän kanssa, jotta voimalan turvallinen asennuspaikka varmistuu. Esimerkiksi tuulisuus, lähiasutus ja voimalan maston korkeus vaikuttavat voimalan sijoituspaikan valintaan. Tärkein tekijä sijoituspaikan kannalta on alueen tuulisuus. Metsän läheisyydessä tuulisuus on usein heikkoa ja parhaimmat paikat löytyvät rannikolta ja sisämaassa aukeilta paikoilta ja mäkien lailta. Huonoa sijoituspaikkaa voi kuitenkin kompensoida tuulivoimalan maston korkeudella. Tuulivoimalan maston tulisi olla yli 9 m korkeammalla, kuin lähimmät esteet 150 metrin säteellä.

Koska masto pitää pystyä nostamaan pystyyn, tulee voimalan sijoituspaikassa varata vaakasuunnassa voimalan maston pituuden verran tilaa. On myös hyvä selvittää, onko sijoituspaikassa kaivettu aikaisemmin esim. salaojia tai maakaapeleita, koska tämä voi vaikuttaa voimalan maakaapelin asennukseen. Turvallisuuden puolesta voimala ei saisi sijaita paikalla, jossa oleskellaan säännöllisesti, koska talvisin voimalasta voi pudota jäätä. Jos voimalan generaattorijännite on riittävän suuri, voimalan sijoittaminen jopa usean sadan metrin etäisyydelle on mahdollista ilman merkittäviä siirtohäviöitä. Jotkin mastot kiinnitetään haruksilla, ja tämän takia on varattava sijoituspaikan ympäriltä tilaa myös siihen. [8, s. 6.]

5.2 Ääni- ja näköhaitat

Ääni- ja näköhaitat tulee ottaa huomioon naapureita ajatellen. Tuulivoimalan ääni ei saa häiritä alueen asukkaita. Kovalla tuulella tuulen oma ääni kuitenkin useasti peittää voimalan äänen alleen. Voimalan tuottamasta äänestä voi olla saatavilla dB-arvio valmistajan sivuilla. Tuulivoimalaa ei saa asentaa siten, että ikkunoihin lankeaa voimalan varjo aurinkoisella säällä. Tällä estetään mahdollinen epämiellyttävä välkkyminen. Suositellaan, että voimala sijoitettaisiin 30 metrin päähän rakennuksista tai pihapiiristä, jotta äänihäiriöitä ei syntyisi. [8, s. 7.]

5.3 Tuulienergian teoria

Pientuulivoimalan tehon teoreettisen maksimin laskeminen on mahdollista lapojen halkaisijan avulla [20, s. 9].

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 c_p \quad (1)$$

ρ on ilmantiheys (kg/m^3)

r on roottorin säde (m)

v on tuulennopeus (m/s)

c_p on roottorin tehokerroin

Yhtälössä πr^2 tarkoittaa voimalan pyyhkäisyypinta-alaa, jota kutsutaan myös potkurin pinta-alaksi. Tehokertoimeksi voidaan valita 0,4558. Yleisesti ilmantiheydelle käytetään likiarvoa $1,3 \text{ kg/m}^3$ [21]. Lasketaan esimerkiksi tuulivoimalan, jonka roottorin säde on 4,9 m, tehon arvo tuulennopeudella 5 m/s.

$$P = \frac{1}{2} \times 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \pi \times (4,9\text{m})^2 \times (5 \text{ m/s})^3 \times 0,4558 = 2\,793 \text{ W}$$

Laskettaessa kuukausikohtaisia tehoarvioita on hyvä käyttää ilmantiheyden oikeaa arvoa, koska $1,3 \text{ kg/m}^3$ ilmantiheyden arvo käy vain kuivalle ilmalle. Ilmantiheyden tarkka arvo saataisiin esimerkiksi käyttämällä hyväksi paikallisen sääaseman antamaa ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa, jolloin Avogadron lain ja Daltonin osapainelain avulla voitaisiin määrittää ilmantiheys. On kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että käytettäessä sääasemien mittaustietoja ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila on yleensä mitattu kahden metrin korkeudella, kun taas tuulennopeus 10 metrin korkeudella [22].

5.4 Tuulivoimatuotannon liitäntä kantaverkkoon

Tuulivoimala liitetään rivitalon omaan sähköverkkoon ja valtakunnan verkkoon verkkoinvertterin eli kantaverkkokytkimen avulla. Verkkoinvertteri toimii siten, että se tunnistaa sähköyhtiöltä tulevan sähkön taajuuden ja jännitteen ja syöttää sen rinnalle tuulivoimalasta tulevan sähkön. Jos tuulivoimalan tuottama sähkö ei riitä kokonaan omaan kuluutukseen, niin tarvittava osuus otetaan sähköverkosta. Jos tuulivoimala tuottaa enemmän sähköä, kuin kiinteistössä kulutetaan, ylijäämä siirtyy verkon puolelle yleiseen käyttöön. Sähköverkkoyhtiöön on oltava ajoissa yhteydessä ja tehtävä 2-suuntainen sähkönsiirtosopimus. Samalla on tarkastettava, että suunniteltu laitteisto soveltuu käytettäväksi sähköverkossa ja että se on sähköverkon haltijan vaatimusten mukainen. [23; 15, s. 15.]

5.5 Luvat rakennusvalvonnalta

Ennen tuulivoimalapaketin hankkimista, on otettava yhteyttä kunnan rakennustarkastajaan. Luvitus riippuu kuitenkin paljon kunnasta ja joissain kunnissa riittää vain toimenpide-ilmoitus, kun taas jotkin vaativat rakennus- ja toimenpideluvan. Yleensä kaava-alueella vaaditaan rakennus- tai toimenpidelupa. Asemapiirustus tai karttaote, johon on

merkitty voimalan sijoituspaikka, on liitettävä rakennus- tai toimenpidelupahakemukseen. Lisäksi liitteeksi tarvitaan voimalan julkisivupiirros. [20, s. 31.]

6 Sähkönkulutus

6.1 Sähköhintaa

Energiaviraston sivuilta saadaan Suomen sähkönsiirtohintojen ja sähköenergianhintojen keskiarvo tyyppikäyttäjälle K2, jonka vuotuinen kokonaissähkön tarve on 5 000 kWh. Sähkön siirron keskihinnaksi Suomessa saadaan 0,08444 €/kWh ja halvimmaksi sähköenergian hinnaksi 0,049 €/kWh huhtikuussa vuonna 2015. Tämän insinööriyön laskelmissa käytetään kuitenkin skenaariota, jossa kuluttaja ostaa sähköenergian parhaimman tarjouksen mukaan, joksi asetetaan nyt 0,036 €/kWh. Siirtohintana käytetään Suomen keskiarvo hintaa. Tällöin sähkön kokonaiskustannukseksi muodostuu 0,1204 €/kWh. Sähkön myynnistä saaduksi hinnaksi valitaan 0,0299 €/kWh (Nord Pool Spot). [24; 25.]

6.2 Sähkönkulutus rivitalossa

Normaalin kolmen hengen rivitaloasunnon sähkönkulutuskohteet näkyvät taulukossa 1. Varustelutason on oletettu olevan tavallinen ja yhdessä asunnossa on ajateltu asuvan kolme henkilöä.

Taulukko 1. Rivitaloasunnon sähkönkulutus [26]

	kWh/vuosi
Kylmälaitteet	600
Ruoanlaitto	600
Kodin elektroniikka	600
Valaistus	750
Kiuas	700
Pyykinpesu	180
Muu kulutus	570
Yhteensä	4000

7 Tuulennopeudet eri korkeuksilla

7.1 Tuuliatlas

Tuulennopeustiedot 50 metrin ja 100 metrin korkeudella on saatu Suomen Tuuliatlas-palvelusta. Tuuliatlaksen tuulennopeustiedot on laskettu kolmella sääennustusmallilla (IFS, HIRLAM ja AROME) ja yhdellä tuulimallilla (WAsP). Tuuliatlaksessa huomioidaan alueen tuuli-ilmast, tuulisuusjakauma, tuulienergiapotentialiaali ja tuulivoimaloiden tuottama energia. Tässä työssä käytetyt tuulennopeuden kuukausiennusteet on otettu maalta, joka on kooltaan 250 x 250 neliometriä. [27.]

7.2 Ilmatieteen laitoksen avoimen datan palvelu

Tuulennopeustiedot 10 metrin korkeudella on saatu sääasemien Ilmatieteen laitoksen avoimen datan palvelusta [28]. Sääasemien datan alkuperäislähde on Ilmatieteen laitos ja aineisto on haettu 22.4.2015. Haettua aineistoa on muokattu siinä määrin, että vain tuulennopeuden arvot on otettu aineistosta ja mittausarvon ollessa "NaN" (eli arvoa ei ole annettu) on kyseinen tuulennopeuden arvo merkattu nolllaksi. Mittaustiedot on katsottu sellaisilta sääasemilta, joissa "NaN"-arvoja on ollut vain vähän, jolloin niiden aiheuttama virhe laskelmissa jää pieneksi. Avoimen datan lisenssi löytyy nettisivulta "<http://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data-lisenssi>". Mittaustietopalvelun käyttöön tarvitaan käyttäjätunnus, jonka saa rekisteröitymällä. Rekisteröinnin jälkeen sähköpostiin saadaan palvelun käyttöön tarvittava tunnistevain (fmi-apikey). Laitoksen kotisivuilta löytyy linkki palvelun käyttöohjeeseen, josta saa tarvittavat url-osoitteet datan hakemiseen [29]. Data-katalogista saadaan helposti haettua eri sääasemien tiedot, joita voidaan käyttää url-hauissa. Sääasemien tunnukset (FMISID) saa myös Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta [30]. Sieltä nähdään myös kätevästi sääaseman maantieteelliset koordinaatit, jotka voidaan syöttää esim. Google Mapsin palveluun muodossa (63.09, 24.26), missä ensimmäinen arvo on leveysaste (latitude) ja toinen arvo on pituusaste (longitude). Tuuliatlaksesta vastaavan paikan joutuu tosin hakemaan manuaalisesti. Sääaseman nimen etuosa on samalla aseman sijainnin paikkakunnan nimi (esim. Hanko Tulliniemi). Taulukossa 2 on esimerkki mittaustietojen hakukäskystä, joka liitetään verkkoselaimen osoitehakukenttään. Haun tuloksena on xml-tiedosto, jossa mittaustiedot löytyvät aikajärjestyksessä kohdasta "<gml:doubleOrNilReasonTupleList>". Siitä tiedot on helppo kopioida

taulukkolaskentaohjelmaan, kunhan vain muistaa tarvittaessa muuttaa pisteet pilkuiksi esimerkiksi etsi ja korvaa -toiminnolla.

Taulukko 2. Avoimen datan palvelun käyttö [28, 29]

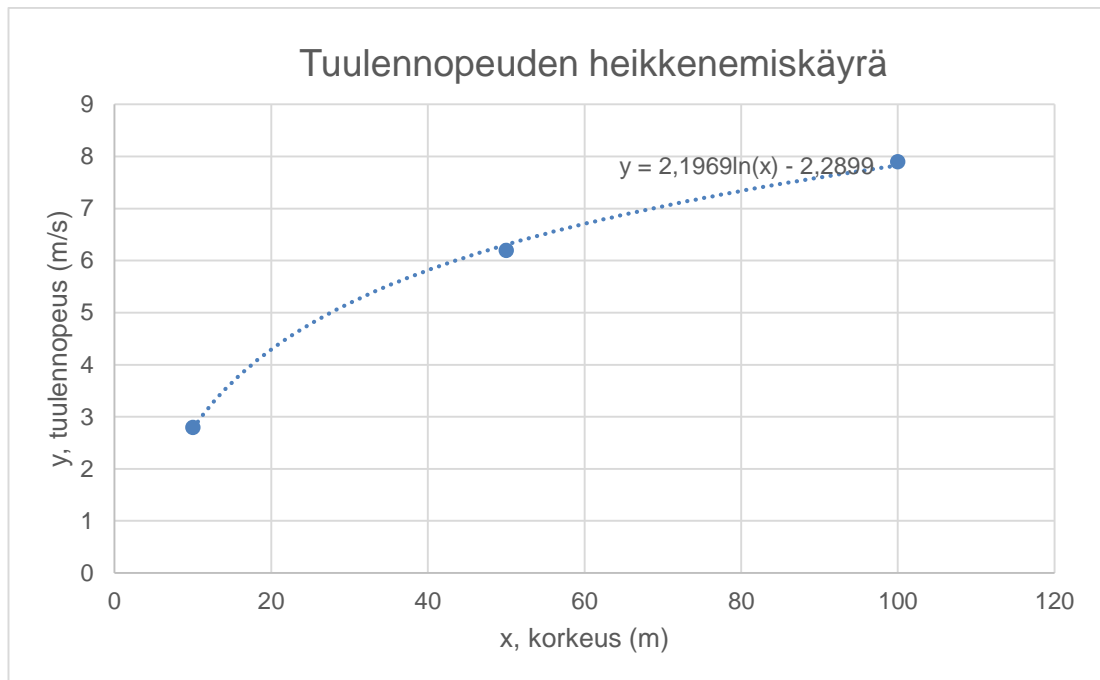
Kirjoita nämä kaikki yhteen:	Selitys
http://data.fmi.fi/fmi-apikey/APIKEY/	Laita oma apikey "APIKEY" -kohdan tilalle
wfs?request=getFeature&storedquery_id=fmi::observations::weather	Määrittää mitä ollaan hakemassa
::multipointcoverage&crs=EPSG::3067	määrittää datan esitysmuodon
¶meters=windspeedms	windspeedms on tuulenopeustiedot
×tep=30	aikaväli, jolla haet mittauksia (nyt 30min)
&starttime=2014-01-01T00:00:00Z	Tähän mittausdatan aloituskohta
&endtime=2014-01-07T23:50:00Z	Tähän mittausdatan lopetuskohta
&fmid=101586	Laita tähän sääaseman tunnus (FMISID)

On hyvä muistaa, että päivämäärä pitää antaa muodossa VVVV-PP-KK (vuosi-päivä-kuukausi) ja aika UTC-muodossa. Päivän ensimmäinen mittaus tieto löytyy klo 00:00. Mittaus tietoja löytyy aina tasatunnista alkaen 10 minuutin välein. On hyvä huomioida, että järjestelmä kykenee antamaan mittausarvoja maksimissaan 168 tunnin ajalta. Tämä tekee arvojen hakemisesta hieman työlästä haettaessa niitä koko vuoden ajalle, mutta se on mahdollista. Tässä työssä tuulenopeudet on haettu yhden tunnin välein vuodelta 2014.

7.3 Tuulenopeus 24 metrin korkeudella

Tuulenopeuden muutos on suunnilleen logaritmista esteiden yläpuolelta 100 metrin korkeuteen asti [31]. Käytännössä logaritminen muutos alkaa kun päästään reilusti esteiden yläpuolelle. Tämän tiedon avulla voidaan muodostaa karkea arvio tuulenopeudesta eri mastokorkeuksilla. Kuitenkin on hyvä tietään, että maastoon muodot ja alustatyyppi vaikuttavat huomattavasti yläpuolisiin tuulenopeuksiin. Tuuliatlaksessa 250 x 250 m² hilaruuduilla ei ole huomioutu yksittäisiä maastonmuotoja, vaan huomioon on otettu 25 hehtaarin rosoisuusalueet. Lasketaan esimerkki tuulenopeudesta 24 metrin korkeudella esim. Lappeenrannan Lepolan sääasemalla tammikuussa. Tuuliatlaksesta saadaan tuulenopeuden arvot 50 metrissä ja 100 metrissä ja sääasemalta arvot 10 metrissä. Taulukkolaskentaohjelman avulla sijoitetaan saadut arvot taulukkoon ja muodostetaan kuvaaja. Trendiviivan lisäys-toiminnolla sovitaan aineistoon logaritminen

funktio. Funktion avulla lasketaan tuulennopeudet halutuilla mastokorkeuksilla. Kuvassa 6 näkyy tuulennopeuden mittaustietoihin (pisteet) Excelillä sovitettu kuvaaja (katkoviiva).



Kuva 6. Tuulennopeuden keskiarvoinen logaritminen heikkenemiskäyrä Tampereella Lepolassa tammikuussa 2014.

Kuva 6 on muodostettu taulukossa 3 näkyvien tietojen avulla

Taulukko 3. Tuulennopeudet arvioituna Lappeenrannassa tammikuussa 2014.

Tammikuu			
x	y	y_{24m}	$v_{lisäys}$
(m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
10	2,80	4,7	1,89
50	6,20		
100	7,90		
k	(kerroin)	c	(vakio)
2,1983		-2,2959	

Taulukon 3 sarakkeessa x on korkeudet metreinä ja sarakkeessa y tuulennopeudet (m/s). Taulukon 3 kerroin k ja vakio c on saatu kuvassa 6 näkyvästä kuvaajasta. Kuva-

jan sovitukselta on siis otettu yhtälö ja sen kertoimet on merkitty muistiin. Tässä tapauksessa k saisi arvon 2,1983 ja c arvon -2,2959. Näiden arvojen ja kuvaajan funktion avulla on laskettu taulukossa 3 oleva arvo y_{24m} . Kun tuulennopeuden arvosta y_{24m} vähennetään tuulennopeuden arvo y_{10m} , saadaan arvo $v_{lisäys}$. Taulukosta voidaan nähdä, että tammikuussa täytyy jokaisen tunnin 10 metrin tuulennopeusarvoon lisätä 1,9 m/s ($v_{lisäys}$), jotta saadaan tuulennopeuden arvo 24 metrissä.

Lasketaan esimerkiksi tuulennopeus Lappeenrannan Lepolassa 24 metrin korkeudella.

$$y(24) = y_{24m} = 2,1983 * \ln(24) + (-2,2959) \approx 4,7 \frac{m}{s} \quad (2)$$

Teoriassa jokaisen tunnin 10 metrin tuulennopeuden arvolle tulisi laskea oma logaritminen tuulennopeuden heikkenemiskäyrä, mutta tässä työssä laskentaa yksinkertaistetaan käyttämällä koko kuukauden tuulennopeuden keskiarvoa. Parhaimman tuloksen saisi käyttämällä tuntikohtaisia tuulennopeusarvoja 50 metrille ja 100 metrille, mutta Tuuliatlaksesta saa vain kuukauden keskiarvonopeudet. Tulos on karkea, mutta silti suuntaa antava. Tässä työssä käytetty 10 metrin korkeuden tuulennopeusarvot on haettu 60 minuutin välein koko vuodelta 2014. Koko tammikuun jokaisen tunnin 10 metrin korkeuden tuulennopeuden arvoista on laskettu tammikuun keskiarvo $y(10 m)$, joka esim. taulukossa 3 oli 2,80 m/s.

8 Tuulivoimaloiden hankintakustannukset

Erilaiset tuulivoimalat ja niiden kustannukset

Sähköveroa joudutaan maksamaan yli 50 kVA:n voimaloista, niin tarkastellaan tässä työssä tätä pienempiä tuulivoimaloita. Taulukossa 4 on esitetty erilaisia voimaloita ja niiden ominaisuuksia.

Taulukko 4. Erilaisia tuulivoimaloita [32]

Voimala	P (kW)	v(P)	E (5m/s)	v_{start}	$d_{roottori}$
Windspot	7,5	12 m/s	11600 kWh	3 m/s	6,3m
Ilmari	10	9,5 m/s	12500 kWh	2,5m/s	9,7m
WinForce	10	9 m/s	22500 kWh	3,5 m/s	9,8m

$v(P)$ tarkoittaa sitä tuulennopeutta, millä nimellistehon P tuotto saavutetaan. E (5m/s) tarkoittaa valmistajan ilmoittamaa vuotuista energian tuottoa, jos vuoden keskituulennopeus on 5 m/s, v_{start} tarkoittaa alhaisinta tuulennopeutta (ns. Cut-In Windspeed), jolla tuulivoimala alkaa tuottaa sähköä ja $d_{roottori}$ tarkoittaa roottorin lapojen halkaisijaa.

Voimalan hinta muodostuu voimalan hankintahinnasta, voimalan asennuksen ja sähkötyöiden hinnasta ja pankin lainan korosta. Huolto- ja ylläpitokustannukset eivät ole niin suuret, koska voimalan vuosittaisen huollon voi tehdä itse opaskirjan avulla. Huoltotarkastus tapahtuu yleensä viiden vuoden välein. Taulukossa 5 on esitetty eri tuulivoimapakettien kokonaiskustannukset euroissa.

Taulukko 5. Tuulivoimaloiden hankintakustannukset euroissa

Voimala	P (kW)	Hinta	Masto	Asennus	Huolto	Yht.
Windspot	7,5	24 800	7 440	3 500	2 500	38 240
Ilmari	10	29 760	7 440	3 500	2 500	43 200
WinForce	10	37 200	7 440	3 500	2 500	50 640

Voimalan ja maston hinnassa on mukana alv [33]. Maston hinta on arvioitu 24 metriä korkealle mastolle. Huolto kustannukset on arvioitu karkeasti 15 vuodelle. Asennuskustannukset on arvioitu karkeasti sisältäen maston perustusten teon, sähköasennukset ja muut toimenpiteet avaimet käteen -periaatteella. Asennuksen hintaan vaikuttavat kohteen sijainti ja luokse päästävyys. Esimerkiksi pellolle asennus on edullisinta.

Tuulivoimalan hankinnan kokonaiskustannuksessa on otettava huomioon, että rivitalon asunto-osakeyhtiö ottaa hankintaa varten lainaa. Lainan korkoprosentiksi on arvioitu 3,2 % ja takaisinmaksun oletetaan tapahtuvan 700 €:n kuukausierissä [34]. Tämän lyhennyksen päälle tulee maksettavaksi vielä kuukausikohtainen korko. Koron keskimääräinen suuruus K tietyllä kuukaudella voidaan laskea yhtälöllä

$$K = \frac{k \times p}{12}, \quad (3)$$

jossa k on jäljellä oleva pääoma tietyllä kuukaudella ja p on vuotuinen korkoprosentti. Tarkemman arvon koron suuruudelle saisi laskemalla arvot päivän tarkkuudella, mutta tässä työssä kuukauden tarkkuudella laskettu arvio on riittävä. Korko on oletettu laskettavaksi ennen kuin kyseisen kuukauden lyhennys tehdään. Esimerkiksi 3,5 vuoden

päästä 30 000 euron lainan otosta, korkoprosentin ollessa 3,2 % ja kuukausierän 550 €, kyseisen kuukauden korko voidaan laskea yhtälön 3 mukaan seuraavasti

$$K = \frac{k_{42} \times p}{12} = \frac{7\,450 \text{ €} \times 0,032}{12} = 19,87 \text{ €},$$

jossa k_{42} tarkoittaa jäljellä olevan lainan määrää kun lainan otosta on kulunut 3,5 vuotta eli 42 kuukautta (nyt k_{42} on 7 450 €). Taulukossa 6 on laskettu korot euroissa kolmelle eri voimalalle. Lainan takaisinmaksut kestävät noin 5–7 vuotta. €_{kok} on tuulivoimalan kokonaiskustannus, jossa on huomioitu kaikki kulut.

Taulukko 6. Tuulivoimaloiden korot.

Voimala	Lainan suuruus (€)	Korot (€)	€ _{kok}
Windspot	38 240	2 837	41 077
Ilmari	43 200	3 613	46 813
WinForce	50 640	4 939	55 579

9 Energiatase

9.1 Rivitalon sähkönkulutuksen indeksit ja energiataseen laskenta

Rivitalon sähkönkulutuksen mallintamiseen voidaan käyttää Suomessa kuormituksen indeksisarjamallia. Kaksiviikkoindeksiä ja tunti-indeksiä käytetään lähtötietoina. Tunti-indeksit on määriteltä arki-, aatto- ja pyhäpäivien tunneille. Indeksien avulla saadaan määriteltä tietyn kuluttajan tarvitsema tehotarve tietylle tunnille käyttäen yhtälöä

$$P_{ri} = \frac{E_r}{8760} \times \frac{Q_{ri}}{100} \times \frac{q_{ri}}{100} \quad (4)$$

jossa P_{ri} on käyttäjäryhmän r ajankohdan i tuntikeskiteho, E_r on käyttäjäryhmän r vuosenergia, Q_{ri} on käyttäryhmän r ajankohtaa i vastaava 2-viikkoindeksi, q_{ri} on käyttäjäryhmä r ajankohtaa i vastaava tunti-indeksi. [35, s. 20.]

Taulukko 7. 2-viikkoindeksit rivitalolle, jonka vuosienenergian kulutus on 5 000 kWh [35, s. 20]

Viikko	indeksi	Viikko	indeksi
1	123	14	73
2	123	15	73
3	118	16	78
4	116	17	79
5	109	18	89
6	107	19	94
7	101	20	100
8	100	21	104
9	97	22	107
10	88	23	112
11	84	24	115
12	77	25	127
13	77	26	129

Taulukosta 7 nähdään esim. 2-viikkoindeksin arvon viikolle 3 olevan 118. Tämä tarkoittaa, että helmikuun alussa olevan 2-viikkojakson keskiteho on 18 % vuotuista keskitehoa suurempi. Huomioitava on, että indeksi-arvot on määritelty rivitalolle, jonka vuosittainen energiatarve on 5 000 kWh, eikä 4 000 kWh kuten saadaan luvussa 6.2. Tämä on kuitenkin riittävän lähellä, jotta tuloksista saadaan suuntaa antavia.

Rivitalon energiataseen jäädessä positiiviseksi tarkoittaa se sitä, että voimala tuottaa enemmän energiaa kuin rivitalo sillä hetkellä tarvitsee. Ylimääräinen energia joudutaan myymään sähköyhtiölle. Taseen avulla voidaan laskea, kuinka paljon energiaa jouduttiin myymään tietyllä tunnilla sähköyhtiölle ja kuinka paljon sitä joudutaan ostamaan. Näin on siis mahdollista laskea ostetun ja myydyn energian määrä jokaiselle tunnille, päivälle, viikolle, kuukaudelle ja lopulta koko vuodelle. Lopputuloksena saadaan realistisen oloinen laskelma koko vuoden voimalan tuotetusta energiasta ja siitä, kuinka paljon sitä pystyttiin hyödyntämään. Tässä työssä hyödynnetty osuus lasketaan säästökseen sähkölas-kussa suoraan sähkön kokonaishinnan mukaisesti. Myytyä osuutta ei huomioida siitä saadun pienen hinnan vuoksi ja koska kaikkialla Suomessa myydystä sähköstä ei välttämättä saa korvausta. Energiataseen avulla saadaan voimalan takaisinmaksuaika ja sen tuottama taloudellinen voitto (hyöty). [20, s. 27.]

Taulukossa 8 on määritelty tunti-indeksit rivitalon sähkönkäytölle arjelle (maanantaista perjantaihin), aatolle (lauantai) ja pyhälle (sunnuntai) SLY:n (Sähköenergialiitto Sener) sähkön käytön kuormitustutkimuksen mukaisesti. Kesäkuukausiksi on luettu kesäkuu,

heinäkuu ja elokuu. Omat tunti-indeksit on saatavilla myös syksyille ja keväälle, mutta tässä työssä yksinkertaistetaan laskentaa ja käytetään vain indeksejä talvelle ja kesälle. Esimerkiksi talvella aattona klo 19–20 q_{ri} on 215, eli tämän tunnin keskiteho on 115 % suurempi, kuin kyseisen kuukauden ensimmäisen tai toisen 2-viikkojakson keskiteho. Lasketaan esimerkiksi tammikuun 28. päivän (tiistai, vuonna 2014) tehontarve klo 8–9 kaukolämpöverkkoon kuuluvassa kolmen hengen rivitalohuoneistossa, jonka vuosienergia on 4000 kWh, voidaan laskea yhtälön 4 avulla.

$$P_{ri} = \frac{E_r}{8760} \times \frac{Q_{ri}}{100} \times \frac{q_{ri}}{100}$$

$$P_{ri} = \frac{4000 \text{ kWh}}{8760 \text{ h}} \times \frac{123}{100} \times \frac{85}{100} = 0,4774 \text{ kW}$$

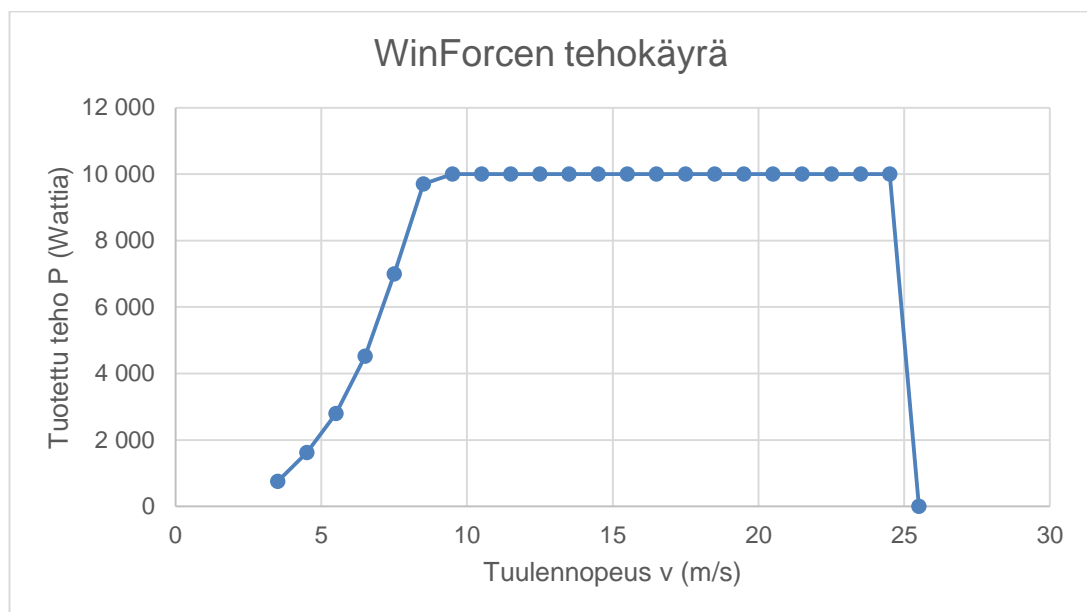
Taulukko 8. Tunti-indeksit rivitalolle, jonka vuosienergian kulutus on 5000 kWh [35, s. 21]

Klo	Arki		Aatto		Pyhä	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
7:00	80	90	80	70	90	80
8:00	90	85	80	90	110	95
9:00	95	85	100	110	110	110
10:00	100	80	120	115	115	120
11:00	95	80	125	115	115	125
12:00	100	75	125	120	110	115
13:00	100	80	120	125	105	120
14:00	105	90	130	145	105	115
15:00	115	100	150	175	110	105
16:00	125	125	160	210	125	120
17:00	130	150	170	240	155	145
18:00	155	170	175	245	180	175
19:00	180	185	180	215	170	185
20:00	180	175	175	190	145	160
21:00	155	145	130	145	110	125
22:00	115	105	85	100	85	95
23:00	90	85	70	75	65	65
0:00	75	65	60	55	60	50
1:00	60	50	55	50	55	50
2:00	55	50	55	50	55	50
3:00	50	50	55	50	55	45
4:00	50	50	55	50	55	50
5:00	60	65	65	55	55	60
6:00	70	80	75	65	70	85

9.2 WinForcen tehokäyrä

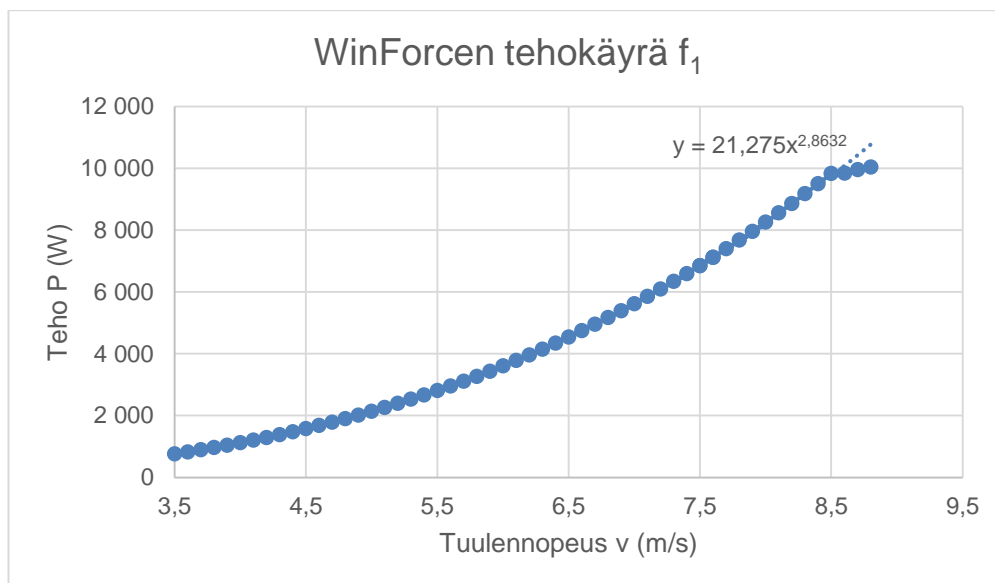
Lasketaan energiatase käyttäen WinForce-voimalaa. Energiatasetta varten tarvitaan myös sähkön tuotto, joka saadaan päivän tuntikohtaisten tuulennopeuksien ja tuulivoimalan tehokäyrän avulla. WinForce-voimalan tehokäyrä on esitetty kuvassa 7. Valmistajat antavat yleensä melko epätarkkoja tehokäyriä, mutta taulukkolaskentaohjelmaa voi käyttää apuna tehontuoton arvioinnissa ja tehokäyrän analysoinnissa. Yksi tapa on käyttää yhtälöä 1 tehon määrittelyyn, jos roottorin tehokerroin, sijaintipaikan ilmanpaine ja roottorin säde tiedetään. Tässä tutkimuksessa tehokäyränä käytetään kuitenkin valmistajan antamaa käyrää.

Taulukkolaskentaohjelma Excelillä uudelleen piirretty tehokäyrä näkyy kuvassa 7. Käyrä on muodostettu valmistajan tehokäyrän avulla. Valmistajan mukaan 10 kW savutetaan 9 m/s tuulennopeudella.



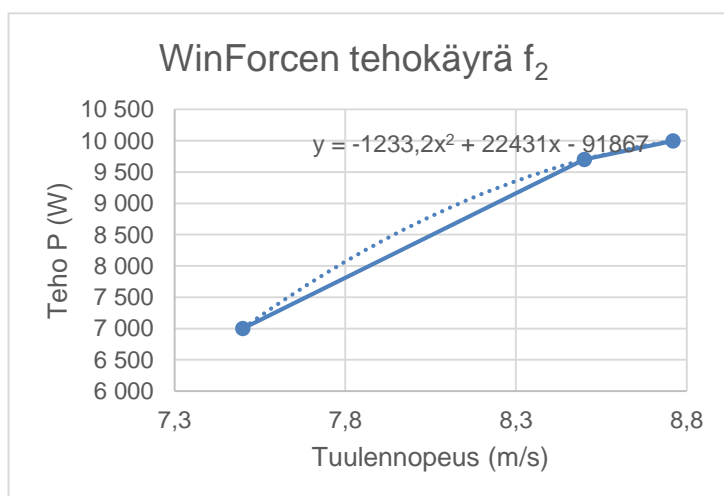
Kuva 7. WinForce-voimalan tehokäyrä [36]

Excelillä approksimoitu tehokäyrä näkyy kuvassa 8. Käyrä on voimassa tuulennopeuden arvoilla 3,5–8,5 m/s.



Kuva 8. WinForce-voimalan tehokäyrän tuulennopeuksille 3,5–8,5 m/s.

Excelillä approksimoitu toinen tehokäyrä näkyy kuvassa 9. Käyrä on voimassa tuulennopeuden arvoilla 8,5–8,8 m/s.



Kuva 9. WinForce-voimalan tehokäyrä tuulennopeuksille 8,5–8,8 m/s.

Käyrien yhtälöt ovat

$$f_1(x) = 21,2775x^{2,8632} \quad , \text{ kun } 3,5 \leq x \leq 8,45 \quad (5)$$

$$f_2(x) = -1233,2x^2 + 22431x - 91867 \quad , \text{ kun } 8,45 < x \leq 8,765 \quad (6)$$

9.3 WinForcen tehontuotanto 24 metrin korkeudessa

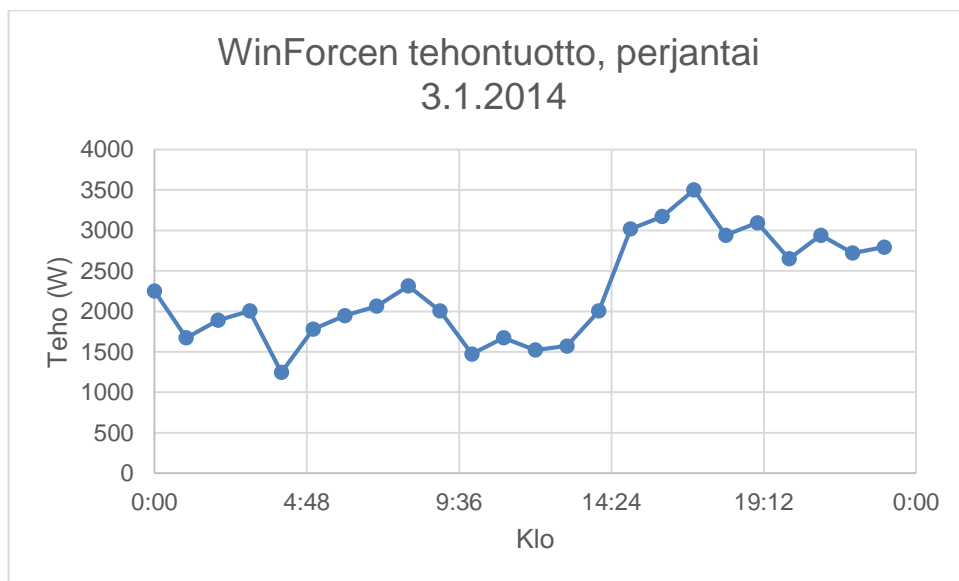
Jos tuulennopeuden arvo on jostain syystä pienempi kuin 3,5 m/s, niin tehon katsotaan olevan nolla. Tämä johtuu siitä, että WinForce-voimalan käynnistymistuulennopeus on 3,5 m/s (Cut-In Wind Speed) [37]. Tehontuotannon laskemisessa on myös otettava huomioon, että yli 10 m/s tuulennopeudella WinForce-voimala tuottaa aina maksimissaan 10 kW:n tehon. Voimalan kytkeytyminen pois päältä yli 25 m/s tuulilla on myös huomiotava. Tämä kaikki onnistuu kuitenkin kätevästi Excelin JOS-funktiolla. Esimerkki tehontuotosta näkyy taulukossa 9.

Taulukko 9. WinForce-voimalan tehontuotto 1.1.2014 Lappeenranta, Lepola.

Päivä	klo:	V_{10m}	V_{24m}	$V_{24,max}$	$V_{h,tod}$	P(W)
1 päivä	0:00	3,0	4,9	4,9	4,9	2006
1 päivä	1:00	3,5	5,4	5,4	5,4	2651
1 päivä	2:00	3,5	5,3	5,3	5,3	2581
1 päivä	3:00	3,5	5,4	5,4	5,4	2651
1 päivä	4:00	3,5	5,3	5,3	5,3	2581
1 päivä	5:00	3,6	5,5	5,5	5,5	2794
1 päivä	6:00	3,4	5,3	5,3	5,3	2512
1 päivä	7:00	3,3	5,2	5,2	5,2	2379
1 päivä	8:00	3,2	5,1	5,1	5,1	2250
1 päivä	9:00	2,8	4,7	4,7	4,7	1780
1 päivä	10:00	2,9	4,7	4,7	4,7	1835
1 päivä	11:00	2,7	4,5	4,5	4,5	1622
1 päivä	12:00	2,1	4,0	4,0	4,0	1121
1 päivä	13:00	2,3	4,2	4,2	4,2	1289
1 päivä	14:00	2,4	4,3	4,3	4,3	1379
1 päivä	15:00	2,0	3,8	3,8	3,8	1005
1 päivä	16:00	2,9	4,7	4,7	4,7	1835
1 päivä	17:00	1,8	3,6	3,6	3,6	862
1 päivä	18:00	1,4	3,3	3,3	0,0	0
1 päivä	19:00	1,5	3,4	3,4	0,0	0
1 päivä	20:00	1,9	3,8	3,8	3,8	968
1 päivä	21:00	2,1	3,9	3,9	3,9	1081
1 päivä	22:00	1,9	3,7	3,7	3,7	932
1 päivä	23:00	1,1	2,9	2,9	0,0	0

Taulukossa 9 arvo V_{10m} tarkoittaa sääaseman datan mukaista tietyn tunnin tuulennopeutta, joka on mitattu noin 10 metrin korkeudella. Taulukon tuulennopeuden arvo V_{24m}

on laskettu luvussa 7.3 kuvatulla tavalla laskien tuulennopeus korkeudella 24 m. Soluissa v_{24m} oleva JOS-funktio ottaa huomioon myös liian korkean tuulennopeuden (>25 m/s), jolloin solu saa arvon 0 m/s. Tämä tarkoittaa samaa kuin jos voimala olisi kytkeytynyt pois päältä, jolloin tehontuottoa ei tapahdu kyseisellä tunnilla. Arvot kohdassa $v_{24m,max}$ on laskettu ottaen huomioon voimalan tehokäyrän maksimi tehon tuotanto (nyt 10 kW). Funktio laskee, että jos v_{24m} on suurempi tai yhtä suuri, kuin 8,765 m/s niin silloin solussa $v_{24m,max}$ käytetään arvoa 8,765 m/s. Arvo 8,765 m/s funktiolla f_2 (ks. yhtälö 6) antaa tehon arvoksi lähes 10 kW, joka on voimalan maksimiteho. Muissa tapauksissa käytetään solun v_{24m} arvoa. Arvo $v_{h,tod}$ ottaa huomioon liian alhaisen tuulennopeuden ($<3,5$ m/s), jolloin voimala ei käynnisty. Tällöin JOS-funktio antaa solulle arvon nolla. $P(W)$ -kohdan funktio laskee tehon käyttäen funktiota f_2 , jos tuulennopeus on suurempi kuin funktioiden raja-arvo (8,45 m/s), muulloin käytetään funktiota f_1 (ks. yhtälö 5). Toimenpide suoritetaan siksi, että tehokäyrän arvojen lähestyessä voimalan nimellistehoa funktion muoto muuttuu potenssi-kuvaajasta polynomi-kuvaajaksi, kuten luvussa 9.2 nähdään. Tässä tutkimuksessa taulukon 9 mukaiset laskelmat tehdään vuoden 2014 jokaiselle päivälle. Kuvassa 10 nähdään esimerkki WinForce-voimalan tuotannosta 24 metrin mastolla Lappeenrannan Lepolassa perjantaina 3.1.2014.



Kuva 10. WinForce-voimalan tuotanto Lappeenrannassa 24 metrin korkeudessa.

9.4 WinForcen energiatase viiden asunnon rivitalossa

Taukukoissa 10, 11 ja 12 nähdään WinForce-voimalan koko vuoden 2014 energiatase kolmessa sijoituspaikassa, Lappeenrannassa, Vantaalla ja Oulussa. Lappeenrannan sijoituspaikka on taajama-alueella, jossa lähellä on metsää ja rakennuksia. Vantaan sijoituspaikan vieressä on lentokenttä ja alue sijaitsee Kylmäojan asutusalueen lähellä. Oulussa sijaintipaikka on meren rannalla. Laskenta on suoritettu olettaen maston korkeuden olevan 24 metriä ja käyttämällä mallinnettuja tuulennopeusarvioita kyseisellä korkeudella. Laskennassa on käytetty rivitalon vuoden energiatarpeena 20 MWh, mikä vastaa noin viiden asunnon rivitaloa. Yhdessä asunnossa on ajateltu asuvan kolme henkilöä. Lappeenrannan Lepolassa vuoden tuulennopeuden keskiarvo (v_k) oli 2,3 m/s kymmenen metrin korkeudella, Vantaalla 4,3 m/s ja Oulussa 5,1 m/s. Vuoden tuulennopeuden keskiarvo vaikuttaa taseeseen voimakkaasti, mutta oleellista on myös energian tuotannon ja tarpeen osuminen samalle ajankohdalle.

Taulukko 10. Energiatase 2014 Lappeenranta, Lepola. Viiden asunnon rivitalo.

	P_{tuotto} (kWh)	P_{tarve} (kWh)	TASE (kWh)	v_k (10m)
Tammikuu	1504	2083	-579	2,8
Helmikuu	915	1789	-874	2,4
Maaliskuu	857	1828	-971	2,5
Huhtikuu	528	1638	-1110	2,3
Toukokuu	835	1513	-678	2,5
Kesäkuu	479	1303	-824	2,1
Heinäkuu	435	1273	-838	2,1
Elokuu	443	1393	-951	2,1
Syyskuu	787	1547	-760	2,1
Lokakuu	959	1769	-810	2,5
Marraskuu	787	1871	-1084	2,0
Joulukuu	994	2163	-1169	2,5
Yht.	9522	20170	-10648	2,3

Taulukko 11. Energiatase 2014 Vantaa. Viiden asunnon rivitalo.

	P_{tuotto}(kWh)	P_{tarve}(kWh)	TASE (kWh)	v_k (10m)
Tammikuu	2512	2083	429	4,2
Helmikuu	2091	1789	302	4,5
Maaliskuu	2352	1828	524	5,0
Huhtikuu	1898	1638	259	4,5
Toukokuu	1868	1513	355	4,2
Kesäkuu	1414	1303	111	3,9
Heinäkuu	1294	1273	21	3,6
Elokuu	1514	1393	121	4,1
Syyskuu	1688	1547	141	3,5
Lokakuu	2309	1769	540	4,8
Marraskuu	1688	1871	-183	4,2
Joulukuu	2496	2163	333	5,2
Yht.	23124	20170	2953	4,3

Taulukko 12. Energiatase 2014 Oulu. Viiden asunnon rivitalo.

	P_{tuotto}(kWh)	P_{tarve}(kWh)	TASE (kWh)	v_k (10m)
Tammikuu	2929	2083	846	4,0
Helmikuu	2942	1789	1153	5,2
Maaliskuu	2648	1828	820	5,7
Huhtikuu	2941	1638	1303	5,6
Toukokuu	2513	1513	1000	5,1
Kesäkuu	2292	1303	989	5,0
Heinäkuu	1523	1273	250	3,7
Elokuu	1809	1393	416	4,5
Syyskuu	3334	1547	1787	6,1
Lokakuu	2958	1769	1189	5,6
Marraskuu	3334	1871	1463	4,9
Joulukuu	3297	2163	1134	5,7
Yht.	32519	20170	12349	5,1

Tuulivoimalan tuotanto Lappeenrannassa oli 9 522 kWh, Vantaalla 23 124 kWh ja Oulussa 32 519 kWh. Lappeenrannassa vuoden 2014 energiatase on -10 586 kWh, Vantaalla 3 015 kWh ja Oulussa 12 411 kWh.

Alla olevista taulukoista 13, 14 ja 15 nähdään voimalan hankinnan taloudellinen hyöty, jos oletetaan sähkön hinnaksi 0,1204 €/kWh. Sähkön myynnistä oletetaan saaduksi

Nord Pool sähköpörssin Suomen alueen hinta 0,0299 €/kWh (klo 18, 21.4.2014). Taloudellisessa hyödyssä ei ole huomioitu myydystä saatua voittoa sen pienuuden takia ja myös sen takia, että sähkön myynnistä ei välttämättä saa korvausta kaikkialla Suomea.

Taulukko 13. Taloudellinen hyöty 2014 Lappeenranta, Lepola. Viiden asunnon rivitalo.

	Hyöty (kWh)	Hyöty (€)	Ostettu (kWh)	Ostettu (€)	Myyty (kWh)	Myyty (€)
Tammikuu	1138	137	946	114	367	11
Helmikuu	761	92	1029	124	154	5
Maaliskuu	716	86	1112	134	141	4
Huhtikuu	464	56	1174	141	64	2
Toukokuu	580	70	933	112	254	8
Kesäkuu	391	47	912	110	87	3
Heinäkuu	388	47	885	107	47	1
Elokuu	399	48	994	120	43	1
Syyskuu	585	70	962	116	201	6
Lokakuu	799	96	970	117	160	5
Marraskuu	641	77	1230	148	146	4
Joulukuu	873	105	1290	155	121	4
Yht.	7736	931	12435	1497	1787	53

Taulukko 14. Taloudellinen hyöty 2014 Vantaa. Viiden asunnon rivitalo.

	Hyöty (kWh)	Hyöty (€)	Ostettu (kWh)	Ostettu (€)	Myyty (kWh)	Myyty (€)
Tammikuu	1358	163	726	87	1155	35
Helmikuu	1140	137	649	78	951	28
Maaliskuu	1072	129	756	91	1280	38
Huhtikuu	913	110	726	87	985	29
Toukokuu	904	109	609	73	964	29
Kesäkuu	727	88	576	69	687	21
Heinäkuu	666	80	607	73	628	19
Elokuu	709	85	684	82	805	24
Syyskuu	797	96	750	90	891	27
Lokakuu	1115	134	654	79	1195	36
Marraskuu	903	109	967	116	785	23
Joulukuu	1304	157	859	103	1192	36
Yht.	11606	1397	8564	1031	11517	344

Taulukko 15. Taloudellinen hyöty 2014 Oulu. Viiden asunnon rivitalo.

	Hyöty (kWh)	Hyöty (€)	Ostettu (kWh)	Ostettu (€)	Myyty (kWh)	Myyty (€)
Tammikuu	1470	177	613	74	1459	44
Helmikuu	1402	169	387	47	1540	46
Maaliskuu	1059	128	769	93	1589	48
Huhtikuu	1090	131	548	66	1851	55
Toukokuu	1026	124	486	59	1486	44
Kesäkuu	805	97	498	60	1486	44
Heinäkuu	776	93	496	60	746	22
Elokuu	835	100	559	67	974	29
Syyskuu	1157	139	390	47	2177	65
Lokakuu	1270	153	499	60	1688	50
Marraskuu	1332	160	539	65	2002	60
Joulukuu	1525	184	638	77	1772	53
Yht.	13748	1655	6422	773	18771	561

9.5 Takaisinmaksuajat viiden asunnon rivitalossa

Taloudellisen hyödyn avulla (taulukot 13–15) voidaan laskea voimaloiden takaisinmaksuajat. Takaisinmaksuaika voidaan laskea yhtälöllä

$$TK = \frac{VKK}{Tuotto}, \quad (7)$$

jossa VKK on voimalan kokonaiskustannus ja $Tuotto$ on voimalan vuosittain tuottama rahallinen energiasäästö. Käytännössä tuoton arvo saadaan energiataseen $Hyöty$ -kohdasta (taulukot 13–15). Lasketaan takaisinmaksuajat WinForce-voimalalle, kun asennuspaikkana on Vantaa, Lappeenranta ja Oulu sillä oletuksella, että kaikki voimalan käyttövuodet vastaavat tuulioloiltaan vuotta 2014 kyseisessä paikassa. Lappeenrannassa tuulennopeuden keskiarvo oli 2,3 m/s, Vantaalla 4,3 m/s ja Oulussa 5,1 m/s 10 metrin korkeudella.

$$TK_{Lappeenranta} = \frac{VKK}{Tuotto_{Lappeenranta}} = \frac{55\,579 \text{ €}}{931 \text{ €}} \approx 60 \text{ vuotta}$$

$$TK_{Vantaa} = \frac{VKK}{Tuotto_{Vantaa}} = \frac{55\,579 \text{ €}}{1\,397 \text{ €}} \approx 40 \text{ vuotta}$$

$$TK_{Oulu} = \frac{VKK}{Tuotto_{Oulu}} = \frac{55\,579\text{ €}}{1\,655\text{ €}} \approx 33,6\text{ vuotta}$$

9.6 Tuulivoimalla tuotetun sähkönhinta

Sähköenergian tuotantohinnaksi tuulivoimalla saadaan

$$H = \frac{VKK}{E_l(kWh)}, \quad (8)$$

jossa $E_l(kWh)$ on tuulivoimalan tuottama kokonaisenergia sen käyttöiän aikana. Tuulivoimaloiden vuotuinen tuotto saadaan taukukoista 10, 11 ja 12. Eli jos oletetaan voimalan käyttöiäksi 15 vuotta, niin tuulivoimala tuottaa energiaa Lappeenrannassa 142 830 kWh (eli 9 522 kWh * 15 vuotta), Vantaalla 346 860 kWh (eli 23 124 kWh * 15 vuotta) ja Oulussa 487 785 kWh (eli 32 519 kWh * 15 vuotta). Lasketaan tästä tuulivoimaloiden sähköntuotantohinnat.

$$H_{Lappeenranta} = \frac{55\,579\text{ €}}{142\,830\text{ kWh}} = 0,389\text{ €/kWh} \approx 39\text{ snt/kWh}$$

$$H_{Vantaa} = \frac{55\,579\text{ €}}{346\,860\text{ kWh}} = 0,16\text{ €/kWh} = 16\text{ snt/kWh}$$

$$H_{Oulu} = \frac{55\,579\text{ €}}{487\,785\text{ kWh}} = 0,114\text{ €/kWh} \approx 11\text{ snt/kWh}$$

Alla olevassa taulukossa 16 nähdään tuulivoimalla tuotetun energianhinnat suhteessa odotettavaan käyttöikään. Kun käyttöikä ylittää 15 vuotta niin on otettava huomioon, että WinForcen kokonaiskustannuksessa on otettu huomioon huoltokustannukset vain 15 vuodelle. Sen takia taulukossa 16 näkyvät tuulivoimalan energian tuotantohinnat 15 vuoden jälkeen eivät ole niin tarkkoja ja hinnat voivat olla todellisuudessa 1–2 snt/kWh kalliimpia. Vastaavasti virhettä voi esiintyä hieman negatiiviseen suuntaan käyttöiän ollessa lyhempi kuin 15 vuotta. Taulukossa alaindeksin lyhenne *La* tarkoittaa Lappeenranta, *Va* tarkoittaa Vantaata ja *Ou* tarkoittaa Oulua.

Vantaalla, jossa vuoden keskiarvotuulisuus oli 4,3 m/s, tuulisähkön tuotantohinnaksi 15 vuoden käyttöiällä saadaan 0,144 €/kWh, joka on jo lähellä laskelmassa käytettyä ososähkön hintaa 0,1204 €/kWh. Lappeenrannassa, jossa vuoden keskiarvotuulisuus oli

2,3 m/s tuulivoimalla tuotetun sähköhinnaksi saadaan 15 vuoden käyttöiällä 0,35 €/kWh, joka on lähes kolminkertaisesti suurempi, kuin sähköyhtiöltä ostetun energian hinta. Oulussa, jossa vuoden keskiarvotuulisuus oli 5,1 m/s tuulivoimalla tuotetun sähköhinnaksi saadaan 15 vuoden käyttöiällä 0,114 €/kWh, joka on suunnilleen saman verran, kuin arvioitu sähköyhtiöltä ostetun energian hinta.

Taulukko 16. Tuulivoimalan energian tuotantohinnat suhteessa käyttöaikaan.

Ikä	E _{La} (MWh)	H _{La} (snt/kWh)	E _{Va} (MWh)	H _{Va} (snt/kWh)	E _{Ou} (MWh)	H _{Ou} (snt/kWh)
6	57,1	97,3	138,7	40,1	195,1	28,5
7	66,7	83,4	161,9	34,3	227,6	24,4
8	76,2	73,0	185,0	30,0	260,2	21,4
9	85,7	64,9	208,1	26,7	292,7	19,0
10	95,2	58,4	231,2	24,0	325,2	17,1
11	104,7	53,1	254,4	21,9	357,7	15,5
12	114,3	48,6	277,5	20,0	390,2	14,2
13	123,8	44,9	300,6	18,5	422,7	13,1
14	133,3	41,7	323,7	17,2	455,3	12,2
15	142,8	38,9	346,9	16,0	487,8	11,4
16	152,4	36,5	370,0	15,0	520,3	10,7
17	161,9	34,3	393,1	14,1	552,8	10,1
18	171,4	32,4	416,2	13,4	585,3	9,5
19	180,9	30,7	439,4	12,7	617,9	9,0
20	190,4	29,2	462,5	12,0	650,4	8,5
21	200,0	27,8	485,6	11,4	682,9	8,1
22	209,5	26,5	508,7	10,9	715,4	7,8
23	219,0	25,4	531,9	10,5	747,9	7,4
24	228,5	24,3	555,0	10,0	780,5	7,1
25	238,1	23,3	578,1	9,6	813,0	6,8

9.7 WinForcen energiatase 12 asunnon rivitalossa

Taukukoissa 17, 18 ja 19 nähdään WinForce-voimalan koko vuoden 2014 energiatase kolmessa sijoituspaikassa, Lappeenrannassa, Vantaalla ja Oulussa. Laskenta on suoritettu samaan tapaan, kuin viiden asunnon rivitalolle luvussa 9.5. Tarkemmat esimerkit energiataseen laskemisesta löytyvät liitteistä 1–3.

Taulukko 17. Energiatase 2014 Lappeenranta, Lepola. 12 asunnon rivitalo.

	P_{tuotto}(kWh)	P_{tarve}(kWh)	TASE (kWh)	v_k (10m)
Tammikuu	1504	5000	-3495	2,8
Helmikuu	915	4294	-3379	2,4
Maaliskuu	857	4387	-3530	2,5
Huhtikuu	528	3932	-3404	2,3
Toukokuu	835	3630	-2796	2,5
Kesäkuu	479	3127	-2648	2,1
Heinäkuu	435	3055	-2620	2,1
Elokuu	443	3343	-2901	2,1
Syyskuu	787	3713	-2926	2,1
Lokakuu	959	4246	-3286	2,5
Marraskuu	787	4490	-3703	2,0
Joulukuu	994	5191	-4197	2,5
Yht.	9522	48409	-38887	2,3

Taulukko 18. Energiatase 2014 Vantaa. 12 asunnon rivitalo.

	P_{tuotto}(kWh)	P_{tarve}(kWh)	TASE (kWh)	v_k (10m)
Tammikuu	2512	5000	-2488	4,2
Helmikuu	2091	4294	-2203	4,5
Maaliskuu	2352	4387	-2035	5,0
Huhtikuu	1898	3932	-2035	4,5
Toukokuu	1868	3630	-1763	4,2
Kesäkuu	1414	3127	-1713	3,9
Heinäkuu	1294	3055	-1761	3,6
Elokuu	1514	3343	-1829	4,1
Syyskuu	1688	3713	-2025	3,5
Lokakuu	2309	4246	-1936	4,8
Marraskuu	1688	4490	-2802	4,2
Joulukuu	2496	5191	-2695	5,2
Yht.	23124	48409	-25285	4,3

Taulukko 19. Energiatase 2014 Oulu. 12 asunnon rivitalo.

	P _{tuotto} (kWh)	P _{tarve} (kWh)	TASE (kWh)	v _k (10m)
Tammikuu	2929	5000	-2071	4,0
Helmikuu	2942	4294	-1352	5,2
Maaliskuu	2648	4387	-1739	5,7
Huhtikuu	2941	3932	-991	5,6
Toukokuu	2513	3630	-1118	5,1
Kesäkuu	2292	3127	-836	5,0
Heinäkuu	1523	3055	-1532	3,7
Elokuu	1809	3343	-1534	4,5
Syyskuu	3334	3713	-379	6,1
Lokakuu	2958	4246	-1288	5,6
Marraskuu	3334	4490	-1156	4,9
Joulukuu	3297	5191	-1894	5,7
Yht.	32519	48409	-15890	5,1

Tuulivoimalan tuotanto Lappeenrannassa oli 9 522 kWh, Vantaalla 23 124 kWh ja Oulussa 32 519 kWh. Alla olevista taulukoista 20, 21 ja 22 nähdään taloudellinen hyöty voimalan hankinnasta, kun sähköhinnaksi oletetaan 0,1204 €/kWh.

Taulukko 20. Energiatase 2014 Lappeenranta, Lepola. 12 asunnon rivitalo.

	Hyöty (kWh)	Hyöty (€)	Ostettu (kWh)	Ostettu (€)	Myyty (kWh)	Myyty (€)
Tammikuu	1433	173	3567	429	71	2
Helmikuu	890	107	3405	410	26	1
Maaliskuu	832	100	3555	428	24	1
Huhtikuu	524	63	3408	410	4	0
Toukokuu	782	94	2848	343	52	2
Kesäkuu	469	56	2658	320	10	0
Heinäkuu	432	52	2623	316	3	0
Elokuu	441	53	2902	349	1	0
Syyskuu	733	88	2979	359	53	2
Lokakuu	947	114	3299	397	13	0
Marraskuu	754	91	3736	450	33	1
Joulukuu	990	119	4201	506	3	0
Yht.	9229	1111	39180	4717	294	9

Taulukko 21. Energiatase 2014 Vantaa. 12 asunnon rivitalo.

	Hyöty (kWh)	Hyöty (€)	Ostettu (kWh)	Ostettu (€)	Myyty (kWh)	Myyty (€)
Tammikuu	2121	255	2878	347	391	12
Helmikuu	1714	206	2580	311	377	11
Maaliskuu	1809	218	2578	310	542	16
Huhtikuu	1487	179	2445	294	411	12
Toukokuu	1427	172	2203	265	441	13
Kesäkuu	1132	136	1995	240	282	8
Heinäkuu	1063	128	1992	240	231	7
Elokuu	1134	137	2209	266	380	11
Syyskuu	1308	158	2404	289	380	11
Lokakuu	1789	215	2456	296	520	16
Marraskuu	1420	171	3070	370	268	8
Joulukuu	2055	247	3136	378	440	13
Yht.	18461	2223	29948	3606	4663	139

Taulukko 22. Energiatase 2014 Oulu. 12 asunnon rivitalo.

	Hyöty (kWh)	Hyöty (€)	Ostettu (kWh)	Ostettu (€)	Myyty (kWh)	Myyty (€)
Tammikuu	2416	291	2583	311	513	15
Helmikuu	2325	280	1969	237	617	18
Maaliskuu	1862	224	2525	304	786	24
Huhtikuu	2055	247	1877	226	886	26
Toukokuu	1813	218	1817	219	699	21
Kesäkuu	1503	181	1624	196	789	24
Heinäkuu	1217	147	1838	221	306	9
Elokuu	1409	170	1935	233	400	12
Syyskuu	2197	265	1516	183	1137	34
Lokakuu	2218	267	2027	244	739	22
Marraskuu	2434	293	2056	248	900	27
Joulukuu	2588	312	2603	313	709	21
Yht.	24038	2894	24371	2934	8481	254

Vertailemalla taulukoiden 20–22 arvoja taulukoiden 13–15 arvoihin voidaan havaita, että siirtyminen viiden asunnon rivitalosta 12 asunnon rivitaloon on kannattavinta Oulussa, jolloin vuotuisia säästöjä syntyy 1 239 € (2 894 € - 1 655 €). Vuotuisia säästöjä syntyy vähiten eli 180 € Lappeenrannassa (1 111 € - 931 €).

9.8 Takaisinmaksuajat 12 asunnon rivitalossa

Taloudellisen hyödyn avulla (taulukot 20–22) voidaan laskea voimaloiden takaisinmaksuajat käyttäen yhtälöä 6.

$$TK_{Lappeenranta} = \frac{VKK}{Tuotto_{Lappeenranta}} = \frac{55\,579\,€}{1\,111\,€} \approx 50\, vuotta$$

$$TK_{Vantaa} = \frac{VKK}{Tuotto_{Vantaa}} = \frac{55\,579\,€}{2\,223\,€} \approx 25\, vuotta$$

$$TK_{Oulu} = \frac{VKK}{Tuotto_{Oulu}} = \frac{55\,579\,€}{2\,894\,€} \approx 19,2\, vuotta$$

Sähköenergian tuotantohinnaksi tuulivoimalla 12 asunnon rivitalossa saadaan samat arvot kuin viiden asunnon rivitalossa, koska voimalan tuottaman energian määrä ja voimalan investointihinta eivät muutu.

9.9 WinForcen energiatase erikokoisissa rivitaloissa

Taulukoissa 23, 24 ja 25 nähdään WinForce-tuulivoimalan energiataseen erikokoisissa rivitaloissa eri sijoituspaikoilla. Positiivinen tase tarkoittaa, että tuulivoimalan tuottaman energian määrä on suurempi, kuin rivitalon tarvitseman energian määrä vuoden ajalta. Rivitalon tarvitsema energia on suurempi, kuin voimalan tuottama energia, jos tase on negatiivinen.

Taulukko 23. Rivitalon asuntojen lukumäärän suhde ja energiataseeseen Lappeenrannassa.

Asuntojen lkm	Hyöty (€)	P _{tuotto} (kWh)	P _{tarve} (kWh)	TASE
3	728	9522	12102	-2580
4	850	9522	16136	-6614
5	931	9522	20170	-10648
6	984	9522	24204	-14682
7	1027	9522	28239	-18716
8	1055	9522	32273	-22751
9	1076	9522	36307	-26785
10	1091	9522	40341	-30819
11	1102	9522	44375	-34853
12	1111	9522	48409	-38887
13	1118	9522	52443	-42921
14	1123	9522	56477	-46955
15	1127	9522	60511	-50989
16	1131	9522	64545	-55023
17	1133	9522	68579	-59057

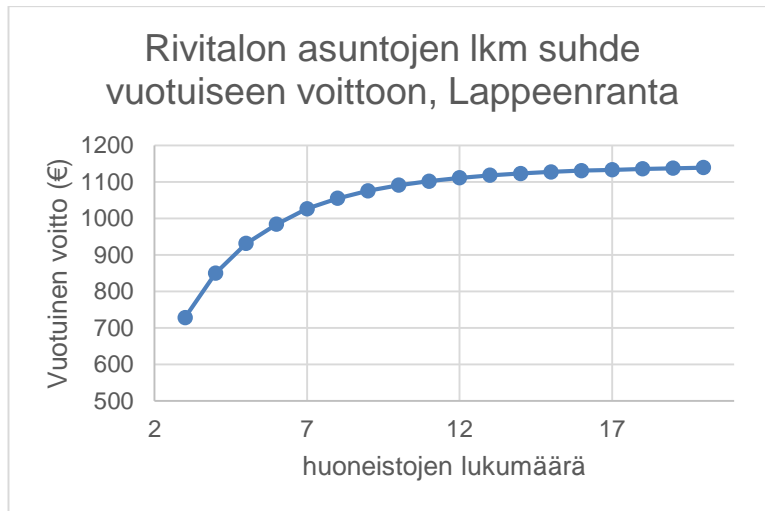
Taulukko 24. Rivitalon asuntojen lukumäärän suhde energiataseeseen Vantaalla.

Asuntojen lkm	Hyöty (€)	P _{tuotto} (kWh)	P _{tarve} (kWh)	TASE (kWh)
3	963	23124	12102	11021
4	1199	23124	16136	6987
5	1397	23124	20170	2953
6	1566	23124	24204	-1081
7	1712	23124	28239	-5115
8	1840	23124	32273	-9149
9	1953	23124	36307	-13183
10	2055	23124	40341	-17217
11	2144	23124	44375	-21251
12	2223	23124	48409	-25285
13	2291	23124	52443	-29319
14	2353	23124	56477	-33354
15	2408	23124	60511	-37388
16	2457	23124	64545	-41422
17	2501	23124	68579	-45456
18	2540	23124	72613	-49490
19	2575	23124	76648	-53524
20	2606	23124	80682	-57558

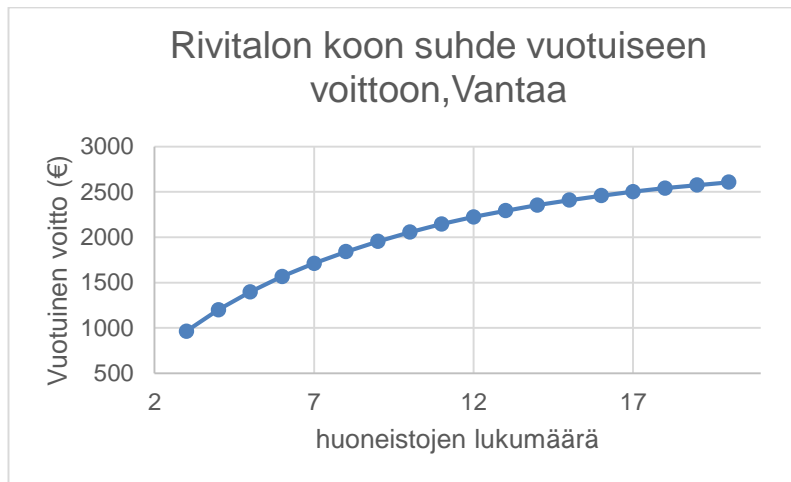
Taulukko 25. Rivitalon asuntojen lukumäärän suhde energiataseeseen Oulussa.

Asuntojen lkm	Hyöty (€)	P _{tuotto} (kWh)	P _{tarve} (kWh)	TASE (kWh)
3	1095	32519	12102	20417
4	1391	32519	16136	16383
5	1655	32519	20170	12349
6	1890	32519	24204	8315
7	2101	32519	28239	4281
8	2293	32519	32273	247
9	2468	32519	36307	-3787
10	2626	32519	40341	-7821
11	2767	32519	44375	-11855
12	2894	32519	48409	-15890
13	3008	32519	52443	-19924
14	3110	32519	56477	-23958
15	3202	32519	60511	-27992
16	3286	32519	64545	-32026
17	3362	32519	68579	-36060
18	3431	32519	72613	-40094
19	3493	32519	76648	-44128
20	3548	32519	80682	-48162
21	3598	32519	84716	-52196
22	3642	32519	88750	-56230
23	3680	32519	92784	-60264
24	3714	32519	96818	-64298
25	3742	32519	100852	-68333
26	3766	32519	104886	-72367
27	3787	32519	108920	-76401
28	3806	32519	112954	-80435

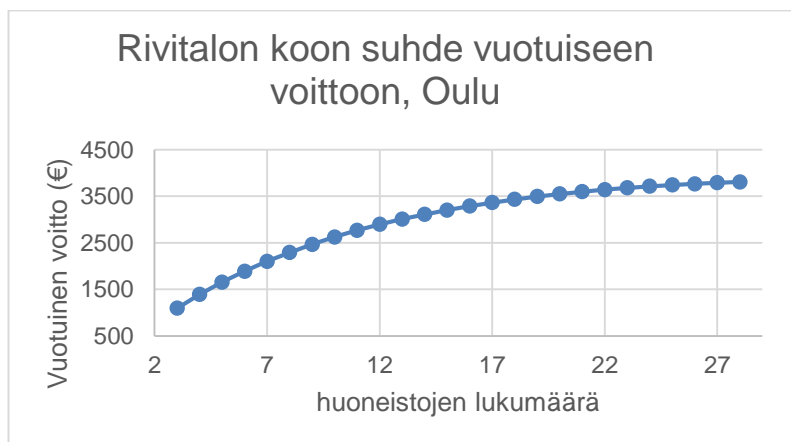
Taulukosta 24 nähdään, että Vantaalla energiatase on positiivinen, jos rivitalon koko on pienempi kuin viisi asuntoa. Tuulisemmalla sijaintipaikalla Oulussa saadaan tase positiiviseksi jo kahdeksan asunnon kokoisessa rivitalossa. Alla olevista kuvista 11, 12 ja 13 nähdään rivitalojen lukumäärän suhde vuotuisen voittoon eri paikkakunnilla. Tämä antaa viitteitä optimaalista rivitalon koosta.



Kuva 11. Rivitalon koon suhde saatuun vuotuisen hyötyyn Lappeenrannassa.



Kuva 12. Rivitalon koon suhde saatuun vuotuisen hyötyyn Vantaalla.



Kuva 13. Rivitalon koon suhde saatuun vuotuisen hyötyyn Oulussa.

Kuvasta 11 voidaan päätellä, että Lappeenrannassa rivitalon koko on hyvä olla yli 10 asuntoa. Vantaalla korkeammilla keskituulennopeuksilla olisi rivitalon koon hyvä olla yli 17 asuntoa, jotta taloudellinen hyöty voitaisiin maksimoida (kuva 12). Oulussa rivitalon koon olisi hyvä olla yli 20 asuntoa (kuva 13). Kuvaajien tulokset selittyvät helposti, jos ajatellaan, että suuremmalla rivitalolla energiankulutus on jokaisella kellonajalla suurempi kuin pienellä rivitalolla. Tällöin todennäköisyys on pieni, että voimalan tuottama sähköenergia olisi kulutukseen nähden liian suuri. Nämä tulokset ovat tietenkin voimassa vain näillä laskelmilla, sijoituspaikoilla ja jos käytetään WinForce-voimalaa, mutta tulos on suuntaa antava myös muille voimaloille ja sijoituspaikoille.

9.10 Rivitalon koon suhde takaisinmaksu-aikaan

Alla olevista taulukoista 26, 27 ja 28 nähdään rivitalojen lukumäärän suhde takaisinmaksu-aikaan Lappeenrannassa, Vantaalla ja Oulussa.

Taulukko 26. Rivitalon asuntojen lukumäärän suhde takaisinmaksu-aikaan Lappeenrannassa.

Asuntojen lkm	Hyöty (€)	TK (vuotta)
3	728	76
4	850	65
5	931	60
6	984	56
7	1027	54
8	1055	53
9	1076	52
10	1091	51
11	1102	50
12	1111	50
13	1118	50
14	1123	49
15	1127	49
16	1131	49
17	1133	49
18	1136	49
19	1138	49
20	1139	49

Taulukko 27. Rivitalojen lukumäärän suhde takaisinmaksu-aikaan Vantaalla.

Asuntojen lkm	Hyöty (€)	TK (vuotta)
7	1712	32
8	1840	30
9	1953	28
10	2055	27
11	2144	26
12	2223	25
13	2291	24
14	2353	24
15	2408	23
16	2457	23
17	2501	22
18	2540	22
19	2575	22
20	2606	21

Taulukko 28. Rivitalojen lukumäärän suhde takaisinmaksu-aikaan Oulussa.

Asuntojen lkm	Hyöty (€)	TK (vuotta)
9	2468	23
10	2626	21
11	2767	20
12	2894	19
13	3008	18
14	3110	18
15	3202	17
16	3286	17
17	3362	17
18	3431	16
19	3493	16
20	3548	16
21	3598	15
22	3642	15
23	3680	15
24	3714	15
25	3742	15
26	3766	15
27	3787	15
28	3806	15

Jos WinForce-voimalan arvioitu käyttöikä olisi suurempi kuin 15 vuotta, niin kyseisen voimalan hankinta Oulun sijaintipaikassa olisi kannattavaa. Tämä on mahdollista, koska WinForcen-voimalan myyjän sivuilla ilmoitetaan, että voimalan suunniteltu käyttöikä on suurempi, kuin 20 vuotta [32]. Oulun sijaintipaikassa vuoden tuulennopeuden keskiarvo oli 5,1 m/s 10 metrin korkeudella.

Tuulivoimalan sijoituspaikka Oulun Vihreäsaarella voidaan nähdä Google Mapsin kuvassa 14. Myöhemmin kävi ilmi, että sinne on myös todellisuudessa sijoitettu kaksi tuulivoimalaa.



Kuva 14. Tuulivoimalan sijoituspaikka Oulun Vihreäsaarella [38]

10 Päätelmät

Työn tavoitteena oli tutkia erilaisia verkkoon kytkettäviä pientuulivoimaloita, joita olisi kannattavaa sijoittaa rivitaloon. Energiataselaskenta osoittautui kuitenkin aikaa vieväksi työksi ja taselaskenta ehdittiin tekemään vain WinForce-voimalalle. Laskelmat antavat silti suuntaa-antavia tuloksia, joita voi soveltaa muille voimaloille. Laskelmien mukaan WinForce-voimalan sijoittaminen ei olisi kannattavaa Lappeenrannan ja Vantaan sijoituspaikoissa, joissa vuoden tuulennopeuden keskiarvot olivat 2,3 m/s ja 4,3 m/s. Siellä saadaan takaisinmaksuajaksi 12 asunnon rivitalossa 50 vuotta (Lappeenranta) ja 25 vuotta (Vantaa). Tuulivoimalla tuotetun sähkön hinnaksi saatiin 39 snt/kWh (Lappeenranta) ja 16 snt/kWh (Vantaa). Taselaskennan tulosten mukaan WinForce-voimalan sijoittaminen olisi kannattavinta Oulun sijoituspaikassa, koska siellä saadaan lyhin takaisinmaksuaika eli 15 vuotta, tosin rivitalon koon pitäisi olla yli 21 asuntoa. Oulun sijoituspaikassa, vuoden tuulennopeuden keskiarvon ollessa 5,1 m/s 10 metrin korkeudella, saadaan edullisin tuulivoimalla tuotettu sähkön hinta eli 11 snt/kWh.

Laskelmien tulokset muuttuisivat, jos ylijäämä sähkö huomioitaisiin ja siitä saisi kohtuullisemman korvauksen. Lisäksi sähkön myynnistä saadun taloudellisen hyödyn voisi arvioida tarkemmin tunti-kohtaisesti koko kuluneelle vuodelle Nord Pool Spot-hintojen avulla [39]. Tuulivoimaloiden hankinta tulisi todennäköisesti kannattavammaksi, jos saatavat tuet huomioitaisiin. Laskelmissa käytettyä lainan ja korkojen suuruutta voisi lisäksi tarkentaa. Nyt lainassa on huomioitu myös 15 vuoden huoltokustannukset. Kuormituksen indeksisarjamalli antaisi tarkempia tuloksia, jos käytetään omia tunti-indeksejä kesän ja talven lisäksi keväälle ja syksyille. Laskelmat tarkentuvat myös, jos sääasemien tuulennopeuden arvot haetaan 10 minuutin väleiltä, eikä vain 60 minuutin väleiltä. Laskelmat voisi tehdä myös muille maston korkeuksille, ja esimerkiksi 30 metrin maston korkeudella tuulivoimaloiden kannattavuus saattaisi jo muuttua tietyillä sijoituspaikoilla. Laskelmista saataisiin myös tarkempia käyttämällä esimerkiksi SEPEN-organisaation testeistä saatuja tuulivoimaloiden tehokäyriä [40]. Pienissä rivitaloissa huipputehon vaikutusta laskelmiin voisi myös arvioida. Sijoituspaikkakohtaisilla sähkön tyyppikäyttäjien tarkoilla kuormituskäyrillä saadaan tarkemmat laskelmat, kuin indeksisarjalla. Voisi myös tutkia, olisiko voimala kannattavaa hankkia rakennukseen, jossa on erityyppisiä sähkönkäyttäjiä. Tällöin tehojen risteily tulisi ottaa huomioon. Voimaloiden hankinnan kannattavuus saattaisi muuttua, jos rivitaloon asennettaisiin useampi, kuin yksi voimala. Tehokäyriään erilaisten voimaloiden sijoittaminen rivitaloon voisi olla kannattavaa, koska erilaiset tuulennopeudet saataisiin silloin kattavammin hyödynnettyä.

Tuloksista voidaan päätellä, että tuulivoimala maksaa itsensä takaisin parhaiten, mitä suurempi on rivitalon vuotuinen energian tarve. Tämä johtuu siitä, että isossa rivitalossa sellaisten ajankohtien lukumäärä on vähäinen, jolloin voimalan tuottamaa tehoa ei voida käyttää omaan kulutukseen. Kuitenkin alueilla, joilla vuoden tuulennopeuden keskiarvo on pieni ja luokkaa 2,3 m/s, suuremmassa rivitalossa ei saavuteta merkittävästi isompaa säästöä, kuin pienemmässä rivitalossa (ks. luku 9.7). Lisäksi havaitaan, että WinForce-voimalan hankkiminen on kannattavaa vain melko tuulisilla alueilla, joissa vuoden tuulennopeuden keskiarvo on luokkaa 5,1 m/s. Taselaskennan perusteiden mukaan vuoden tuulennopeuden keskiarvo ei kuitenkaan ole tärkein sijoituspaikan valintaperuste, vaan tärkeintä on valita sijoituspaikka, jossa tuulennopeudesta riippuvainen tuulivoimalan tuotanto osuu ajallisesti hyvin yhteen rivitalon sähkön kulutuksen kanssa. Toisin sanoen alue, jossa tuulee yleensä öisin paljon ja jonka vuoden tuulennopeuden keskiarvo on korkea, ei välttämättä ole kannattava sijoituspaikka liian pienelle tuulivoimalalla varustetulle rivitalolle, koska kulutuksen sähköenergian tarve ei ole yöllä tarpeeksi suurta. Tämän takia laskelmat olisi aiheellista tehdä myös kerrostaloille ja teollisuuskiinteistöille, missä energian tarve ympäri vuorokauden on suuri, jolloin kaikki tuulivoimalan tuottama energia saataisiin todennäköisemmin hyödynnettyä.

Työn tuloksista voidaan päätellä, että sääasemien ja Tuuliatlaksen mittaustietoja voidaan teoriassa käyttää yhdessä tuulennopeuden logaritmisin mallinnuksen kanssa erilaisten tuulivoimaloiden kannattavuuden karkeaan arviointiin, jos asennuspaikka sijaitsee sääasemien lähellä ja sijoituspaikan ympärillä ei ole korkeita esteitä. Laskelmat voisi suorittaa kaikille alueille Suomessa, joiden läheisyydessä on sääasemia tai tuulimittareita. Tulokset voisivat teoriassa antaa tarpeeksi tietoa yksittäisellä paikalla aloitettavien tuulimittauksien tekemisen kannattavuudesta. Tällöin ei tarvitse turhaan asentaa paikan päälle mittauslaitteistoa ja odottaa pitkiä aikoja, jotta alueen tuulisuudesta saadaan tarkka arvio. Lisäksi menetelmällä saadaan samalla nopeasti arvio siitä, minkälainen voimala alueelle olisi kannattavinta asentaa. Tämä edellyttäisi kuitenkin useiden eri voimaloiden valmistajien tai tuulivoimaloiden testaus-organisaatioiden antamien tehokäyrien lisäämistä laskentajärjestelmään. Tämä idea toimii vain, jos sääasema tai mittauspiste sijaitsee tarpeeksi lähellä tuulivoimalan sijoituspaikkaa ja tarkemman arvion saamiseksi vaadittaisiin myös tietoa alueen tuulisuudesta 50 metrin ja 100 metrin korkeudella Tuuliatlaksesta. Tuuliatlaksen mittaukset kyseisillä korkeuksilla eivät ole saatavilla läheskään koko Suomen alueelle. Laskelmia voidaan teoriassa muodostaa sääasemilta hie- man kauempana sijaitseville alueille, jos maanpinnan rosoisuus voidaan määritellä.

Olisi myös mielenkiintoista laskea, tulevatko tuulivoimalan kustannukset, takaisinmaksu-aika ja tuotetun sähkön hinta pienemmiksi, jos voidaan käyttää Altaerosin tai SheerWindin tulevaisuuden tuulivoimaloita. Olisi myös mielenkiintoista selvittää kustannukset, jos järjestelmään lisätään esimerkiksi Tesla Motors-yhtiön vasta julkaistut edulliset Powerwall-akut [41]. Tällöin järjestelmässä tarvitaan myös esimerkiksi Sunny Island-akkuinvertteri [42]. Omavaraisesta verkko- ja akkujärjestelmän yhdistelmästä olisivat varmasti kiinnostuneita asukkaat, jotka asuvat alueilla, joissa esiintyy myrskyjen aikaan pitkiä sähkökatkoksia. Tällaisia alueita on esimerkiksi maaseudulla, joissa on sähköverkkona 20 kV:n avolinja.

Lähteet

- 1 Wind in power, 2014 European statistics. 2015. Verkkodokumentti. The European Wind Energy Association. <<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>>. Luettu 29.4.2015.
- 2 Ajankohtaista tuulivoimassa. 2015. Verkkodokumentti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/959/yli_miljardi_kwh_-_kotimainen_tuulivoima_merkittavaan_rooliin_vuonna_2014>. Luettu 29.4.2015.
- 3 Lisää tuulivoimaa. Verkkodokumentti. Motiva Oy. <http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima>. 10.4.2015. Luettu 29.4.2015.
- 4 Tuulivoiman työllisyysvaikutukset. Verkkodokumentti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. <<http://www.tuulivoimatieto.fi/tyollisyys>>. Luettu 29.4.2015.
- 5 Energiavuosi 2014. 2015. Verkkodokumentti. Energiateollisuus ry. <http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/tilastot-ja-julkaisut/energiavuosi_2014.ppt>. Luettu 29.4.2015.
- 6 Asumisen energian kulutus 2013. 2014. Verkkodokumentti. Tilastokeskus. <http://www.tilastokeskus.fi/til/asen/2013/asen_2013_2014-11-14_fi.pdf>. Luettu 29.4.2015.
- 7 Pientuulivoima. Verkkodokumentti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. <<http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima>>. Luettu 1.5.2015.
- 8 Parkkari & Perkkiö. 2011. Opas oman pientuulivoimalan hankintaan. Verkkodokumentti. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/590-Opas_oman_pientuulivoimalan_hankintaan_-_Parkkari%2C_Perkkio.pdf>. Luettu 1.5.2015.
- 9 Global Wind Report. 2015. Verkkodokumentti. Global Wind Energy Council. <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf>. Luettu 1.5.2015.
- 10 Vaaka- ja pysty akseliset turbiinit. Verkkodokumentti. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. <<http://www.tuulivoimatieto.fi/pysty akseliset>>. Luettu 1.5.2015.
- 11 Mökkisähköä tuulesta. Verkkodokumentti. Oy Windside Production Ltd. <<http://www.windside.com/filebank/356-MokkiEsite2014.pdf>>. Luettu 9.5.2015.
- 12 ENERCON product overview. Verkkodokumentti. Enercon. <http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_Produnkt_en_web_032014.pdf>. Updated March 2014. Luettu 1.5.2015.

- 13 WS-12. Verkkodokumentti. Oy Windside Production Ltd. <<http://www.windside.com/fi/tuotteet/ws-12>>. Luettu 1.5.2015.
- 14 Paavola, Mikko. 2011. Tuulivoima omakotitalon sähkönlähteenä. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 15 Rekiranta, Juho. 2010. Pientuulivoimalan rakentaminen ja käyttö. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti. <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201005179492>>. Luettu 1.5.2015.
- 16 Power Capacity Versus Number of Turbines & Wind Class. Verkkodokumentti. SheerWind. <<http://sheerwind.com/product-line-2/product-energy-output/power-capacity-vs-number-of-turbines-wind-class>>. Luettu 1.5.2015.
- 17 How INVELOX Works. Verkkodokumentti. Sheerwind. <<http://sheerwind.com/technology/how-does-it-work>>. Luettu 1.5.2015.
- 18 Germany INVELOX models with triple turbine. Verkkodokumentti. Sheerwind. <http://sheerwind.com/wp-content/uploads/sheerwind/2014/05/Model_Germ-Houses_vs_Wind-Class.jpg>. Luettu 1.5.2015.
- 19 BAT: The Buoyant Airborne Turbine. Verkkodokumentti. Altaeros Energies. <<http://www.altaerosenergies.com/bat.html>>. Luettu 1.5.2015.
- 20 Rönkkö, Miika. 2013. Pientuulivoimalan verkkoon liittäminen ja taselaskenta. Insinööriyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti. <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013121020694>>. Luettu 1.5.2015.
- 21 Mitä on tuulivoima. Verkkodokumentti. Suomen Tuuliatlas. <<http://www.tuuliatlas.fi/tuulivoima/index.html>>. Luettu 1.5.2015.
- 22 Miten säätä havainnoidaan Ilmatieteen laitoksessa. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/saahavainnot>>. 13.3.2013. Luettu 1.5.2015.
- 23 WindSpot 1,5 - 3,5 kW. Verkkodokumentti. Kodin vihreä energia Oy. <<http://www.kodinenergia.com/windspot-tuulivoimalat>>. Luettu 1.5.2015.
- 24 Tarjoushinnat. Verkkodokumentti. Energiavirasto. <<https://www.sahkonhinta.fi/tilastot/Tarjoushinnat.xlsx>>. Luettu 20.4.2015.
- 25 Sähkön siirtohinta. Verkkodokumentti. Energiavirasto. <<https://www.sahkonhinta.fi/tilastot/Viimeisimm%C3%A4tSiirtohinnat.xlsx>>. Luettu 20.4.2015.
- 26 Sähkönkäyttö rivitalokodissa. Verkkodokumentti. Vattenfall. <<http://www.vattenfall.fi/fi/rivitalo.htm>>. Luettu 1.5.2015.

- 27 Säämallit. Verkkodokumentti. Suomen Tuuliatlas. <http://www.tuuliatlas.fi/mallinnus/mallinnus_1.html>. Luettu 1.5.2015.
- 28 Ilmatieteen laitoksen avoin data. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>>. Luettu 1.5.2015.
- 29 Latauspalvelun pikaohje. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/latauspalvelun-pikaohje>>. Luettu 1.5.2015.
- 30 Ilmatieteen laitoksen havaintoasemat. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/havaintoasemat>>. Luettu 1.5.2015.
- 31 Rajakerros. Verkkodokumentti. Suomen Tuuliatlas. <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_4.html>. Luettu 1.5.2015.
- 32 Tuulivoimat. Verkkodokumentti. Kodin vihreä energia Oy. <<http://www.kodin-energia.com>>. Luettu 1.5.2015.
- 33 Eklund, Esa. 2015. Asiakaspalvelu, Kodin vihreä energia Oy, Helsinki. Keskustelu 24.4.2015.
- 34 Kulutusluotot. Verkkodokumentti. Osuuspankki. <<https://www.op.fi/op/henkiloasiakkaat/lainat/kulutusluotot?id=20300&srcpl=8>>. Luettu 1.5.2015.
- 35 Sähkömarkkinat - opetusmoniste. 2008. Verkkodokumentti. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-18.3153/materiaali/S-18_3153_sahkomarkkinat_-_moniste.pdf>. Luettu 1.5.2015.
- 36 WinForce. Verkkodokumentti. VTEK Energy Ab. <http://www.windgate.ch/image.cfm?image=/pictures/WINForce_Diagramm.png&title=>. Luettu 1.5.2015.
- 37 WinForce. Verkkodokumentti. Btek Renewable Energy Products. <http://www.btekenenergy.com/documents/skystream_600.html>. Luettu 1.5.2015.
- 38 Oulu, Vihreäsaari. Verkkodokumentti. Google Maps. <<https://www.google.fi/maps/@65.0099516,25.3979763,943m/data=!3m1!1e3>>. Luettu 9.5.2015.
- 39 Elspot prices. Verkkodokumentti. Nord Pool Spot. <<http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/FI/Hourly/?dd=FI&view=table>>. Luettu 10.5.2015.
- 40 Reports. Verkkodokumentti. SEPEN. <http://www.sepen.fr/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=2&Itemid=82>. Luettu 8.5.2015.

- 41 Tesla raivaa tietä uusiutuvalle energialle. Verkkodokumentti. Helsingin Sanomat. <<http://www.hs.fi/talous/a1430627034953>>. 4.5.2015. Luettu 8.5.2015.
- 42 Sunny Island. Verkkodokumentti. Helsingin Sanomat. SMA Solar Technology AG. <<http://www.sma.de/en/products/battery-inverters/sunny-island-for-increased-self-consumption.html>>. Luettu 8.5.2015.

Energiatase Oulussa

Taulukossa näkyy WinForce-tuulivoimalan energiatase 1.1.2014 (viikko 1) ja 8.1.2014 (viikko 2) 24 metrin mastolla, kun voimalan sijoituspaikka on Oulussa (12 asunnon rivitalo). Muiden päivien taseet on laskettu samalla menetelmällä.

TAMMIKUU										Hyödyt		Osettu		Myyty		Paine		TASE	
			KWh	2416	2583	513		291	311	15		2929	5000	-2071	KWh				
			€																
VIIKKO 1																			
Hyödyt	Osettu	Myyty																	
Yht.	Yht.	Yht.	KWh																
89	48	6	€																
VIIKKO 2																			
Hyödyt	Osettu	Myyty																	
Yht.	Yht.	Yht.	KWh																
83	54	5	€																
VIIKKO 3																			
Hyödyt	Osettu	Myyty																	
Yht.	Yht.	Yht.	KWh																
40	40	40	€																
0:00	1	1.1.2014	Ke	3	4606	65	0	3170	225	4381	225	4381	0	225	4381	0	225	4381	0
1:00	2	1.1.2014		3	3170	50	0	123	3370	-200	3170	200	0	200	0	0	123	3370	-200
2:00	3	1.1.2014		3	2442	50	0	123	3370	-928	2442	928	0	928	0	0	123	3370	-928
3:00	4	1.1.2014		3	2311	50	0	123	3370	-1059	2311	1059	0	1059	0	0	123	3370	-1059
4:00	5	1.1.2014		3	1724	50	0	123	3370	-1646	1724	1646	0	1646	0	0	123	3370	-1646
5:00	6	1.1.2014		3	795	65	0	123	4381	-3586	795	3586	0	3586	0	0	123	4381	-3586
6:00	7	1.1.2014		3	0	80	0	123	5392	-5392	0	5392	0	5392	0	0	123	5392	-5392
7:00	8	1.1.2014		3	930	90	0	123	6066	-5136	930	5136	0	5136	0	0	123	6066	-5136
8:00	9	1.1.2014		3	0	85	0	123	5729	-5729	0	5729	0	5729	0	0	123	5729	-5729
9:00	10	1.1.2014		3	795	85	0	123	5729	-4934	795	4934	0	4934	0	0	123	5729	-4934
10:00	11	1.1.2014		3	0	80	0	123	5392	-5392	0	5392	0	5392	0	0	123	5392	-5392
11:00	12	1.1.2014		3	0	80	0	123	5392	-5392	0	5392	0	5392	0	0	123	5392	-5392
12:00	13	1.1.2014		3	0	75	0	123	5055	-5055	0	5055	0	5055	0	0	123	5055	-5055
13:00	14	1.1.2014		3	0	80	0	123	5392	-5392	0	5392	0	5392	0	0	123	5392	-5392
14:00	15	1.1.2014		3	0	90	0	123	6066	-6066	0	6066	0	6066	0	0	123	6066	-6066
15:00	16	1.1.2014		3	1160	100	0	123	6740	-5580	1160	5580	0	5580	0	0	123	6740	-5580
16:00	17	1.1.2014		3	1424	125	0	123	8425	-7001	1424	7001	0	7001	0	0	123	8425	-7001
17:00	18	1.1.2014		3	1620	150	0	123	10110	-8490	1620	8490	0	8490	0	0	123	10110	-8490
18:00	19	1.1.2014		3	1620	170	0	123	11458	-9838	1620	9838	0	9838	0	0	123	11458	-9838
19:00	20	1.1.2014		3	1332	185	0	123	12468	-1136	1332	1136	0	1136	0	0	123	12468	-1136
20:00	21	1.1.2014		3	1620	175	0	123	11795	-10175	1620	10175	0	10175	0	0	123	11795	-10175
21:00	22	1.1.2014		3	2063	145	0	123	9773	-7710	2063	7710	0	7710	0	0	123	9773	-7710
22:00	23	1.1.2014		3	1520	105	0	123	7077	-5457	1520	5457	0	5457	0	0	123	7077	-5457
23:00	24	1.1.2014		3	2442	85	0	123	5729	-3287	2442	3287	0	3287	0	0	123	5729	-3287