



Karelia-ammattikorkeakoulu
Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka (AMK)

Pientuulivoiman hyödyntäminen osana yrityksen energiantuotantoa

Ville Kosonen

Opinnäytetyö, Marraskuu 2024

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2024
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Ville Kosonen

Nimeke
Pientuulivoiman hyödyntäminen osana yrityksen energiantuotantoa

Toimeksiantaja
Koivikon Kartano Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin tuulivoimalan tekniikkaa ja toimintaperiaatetta sekä pientuulivoimalan hankinnassa huomioonotettavia asioita. Tavoitteena oli selvittää pientuulivoimalan hyödyntämisen taloudellista kannattavuutta toimeksiantajan yritykselle. Opinnäytetyön toimeksiantajana on ollut Pohjois-Karjalassa toimiva maatalousyrittäjä Koivikon Kartano Oy.

Opinnäytetyö on tutkimuksellinen. Työssä perehdyttiin tietokirjallisuuden, alan asiantuntijoiden ja verkkojulkaisujen avulla pientuulivoimalan tekniikkaan ja sen hankintaan liittyvään kulurakenteeseen. Toimeksiantajan yrityksen energiankulutustietojen perusteella ja Tuuliatlakselta kerätyn tuulisuusdatan avulla tehtiin pientuulivoimalan investointilaskelmat sekä sijoittamispaikan suunnittelu.

Opinnäytetyön kannattavuuslaskelmat osoittavat, että pientuulivoimalan investointi ei ole toimeksiantajan yritykselle taloudellisesti kannattavaa ilman investointitukia. Vuoden 2023 pörssisähkön keskihinnan perusteella pientuulivoimalan investoinnin takaisinmaksuaika ilman tukia on noin 13–14 vuotta. Investointitukien avulla takaisinmaksuaika lyhenee 6–9,5 vuoteen. Laskelmat sisältävät kuitenkin paljon muuttuvia tekijöitä, joihin ei voi vaikuttaa, kuten energian hinnan muutokset ja tuulisuusolosuhteet. Tutkimuksen tuloksiin on suhtauduttava sen vuoksi kriittisesti.

Tämän opinnäytetyön tutkimustulos antaa merkittävää tietoa pientuulivoimaloiden hankintakustannuksista. Pientuulivoimaloiden hyödyntäminen ja käyttäminen yritysten energiantuotannossa ei ole nykyisin vielä kovin yleistä. Tutkimuksen tulos kuitenkin osoittaa, että pientuulivoimala on tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto uusiutuvan energian tuotantomuotona.

Kieli
suomi

Sivuja 56

Asiasanat
tuulivoima, pientuulivoimala, energiantuotanto, uusiutuva energia, kannattavuuslaskenta



THESIS
November 2024
Degree Programme in Energy and Environmental Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Ville Kosonen

Title
Utilization of small wind power as part of company's energy production

Commissioned by
Koivikon Kartano Oy

Abstract

The purpose of this thesis was to study the technology and operating principle of the wind turbine, as well as issues to be taken into account in the acquisition of a small wind plant. The aim was to find out whether investing in a small wind power plant would be economically viable for the client's company. The thesis was commissioned by Koivikon Kartano Oy, an agricultural company operating in North Karelia.

This thesis was a research project. With the help of literature, experts in the field and online publications, the study looked into the technology of small wind power plant and the cost structure related to its acquisition. Furthermore, investment calculations of a small wind turbine and plans for its location were made, based on the energy consumption data of client's company and with the help of wind data collected from Tuuliatlas.

The profitability calculations made in this thesis show that a small wind plant would not be an economically viable investment for the client's company without investment aid. Based on the average price of exchange electricity in 2023, the payback period for an investment in the small wind turbine would be approximately even 13-14 years without subsidies. With investment aids, the payback period will be shortened to 6–9.5 years. However, the calculations contain many variable factors that cannot be influenced, such as energy price changes and wind conditions. The results of the research must therefore be viewed critically. The research result of this thesis provides significant information about the acquisition costs of small wind turbines. Nowadays, utilization and use of small wind turbines in energy production for companies is not yet very common. However, the result of the study shows that the small wind turbine is a viable option as a form of renewable energy in the future.

Language
Finnish

Pages 56

Keywords
wind power, small wind turbine, energy production, renewable energy, profitability calculation

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Tuulivoima.....	6
2.1	Tuulen synty.....	6
2.2	Tuulivoimalan rakenne ja toimintaperiaate	7
2.3	Tuulivoimaloiden energiantuotanto	8
2.3.1	Huipunkäyttöaika.....	10
2.3.2	Betzin laki.....	10
2.3.3	Tuulivoimalan pyyhkäisyypinta-ala.....	12
2.4	Vaaka- ja pysty akseliset tuulivoimalat.....	13
2.5	Tuulivoimalan tekniset ratkaisut	14
2.6	Tuulivoimalan sijoittamispaikan suunnittelu.....	16
3	Pientuulivoima	19
3.1	Pientuulivoimalan hankinta.....	20
3.2	Pientuulivoimalla tuotetun energian käyttökohteet	22
3.3	Pientuulivoimaloiden ympäristövaikutukset.....	23
3.4	Pientuulivoimalan tarvittavat luvat.....	24
3.5	Pientuulivoimalan investointituet	25
3.6	Pientuulivoimalan muut tekniset ratkaisut	27
4	Työn tavoite ja menetelmät	28
5	Kannattavuuslaskennan toiminnallinen toteutus	30
5.1	Yrityksen energiankulutus	30
5.2	Tuuliatlas.....	32
5.2.1	Tuulisuustiedot.....	33
5.2.2	Tuuliruusu	38
5.3	Pientuulivoimalan valinta.....	40
6	Tulokset ja yhteenveto	41
6.1	Pientuulivoimaloiden energiantuotanto	41
6.2	Investoinnin kannattavuuslaskelmat.....	44
6.3	Tulosten herkkyyshanalyysi	48
6.4	Tulosten yhteenveto.....	51
7	Pohdinta	52
	Lähteet	55

Liitteet

Liite 1: Tutkimuskohteen valitut tuulisuuspisteet

Liite 2: 60 kW:n pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmat, osa 1

Liite 3: 60 kW:n pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmat, osa 2

Liite 4: 60 kW:n pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmat, osa 3

1 Johdanto

Pientuulivoimaloiden rakentaminen on tällä hetkellä hyvin marginaalista, ja tuulen potentiaalista energialähdettä ei olla pystytty isoissa määrin täysin hyödyntämään. Pientuulivoimalaksi määritellään yleisen kansainvälisen määritelmän mukaan nimellisteholtaan maksimissaan noin 50 kW tuulivoimalat, joiden roottorin pyyhkäisyypinta-ala on maksimissaan 200 m². (Industrial Technology Research Institute 2018.) Tuulivoiman käyttäminen uusiutuvana energianlähteenä ja –tuotantomuotona tulee kuitenkin tulevaisuudessa lisääntymään. Tuulivoimailoilla tuotetun energian avulla pystytään tulevaisuudessa vähentämään entisestään riippuvuutta perinteisistä sähköverkoista ja fossiilisista polttoaineista.

Pientuulivoimaloiden hyödyntäminen energiantuotannossa on valitettavasti vielä huonosti tiedossa tavallisille kuluttajille sekä yrityksille. Tällä hetkellä niiden investointikustannukset ovat hyvin suuria ja takaisinmaksuajat pitkiä verrattuna esimerkiksi aurinkovoimalan rakentamiseen nähden. Lisäksi investoinnin kannattavuuteen liittyy monia epävarmuustekijöitä, kuten energian hinnanvaihtelut, voimaloiden käyttöiän ennusteet ja alueen tuulisuusolosuhteet. Rakentamisen suuret alkuinvestoinnit ja kannattavuuteen liittyvät muuttuvat tekijät yhdessä luovat epävarmuutta yrityksille lähteä investoimaan pientuulivoimalaan.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan pientuulivoimalan hyödyntämisen taloudellista kannattavuutta toimeksiantajan yritykselle. Työn toimeksiantajana toimii Koivikon Kartano Oy, joka on Pohjois-Karjalassa sijaitseva maatalousyritys. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tehdä teknistaloudellinen tarkastelu pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuudesta työn toimeksiantajalle. Opinnäytetyössä perehdytään pientuulivoimalan hankinnan kustannusrakenteeseen ja tehdään Excelin avulla pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuuslaskelmat yrityksen energiankulutustietojen sekä Tuuliatlaksesta kerätyn tuulisuusdatan perusteella. Tämän työn pyrkimyksenä on auttaa hahmottamaan paremmin pientuulivoiman roolia kestävästä energiantuotannon ratkaisuna ja sen soveltuvuutta liiketoimintaympäristöön.

2 Tuulivoima

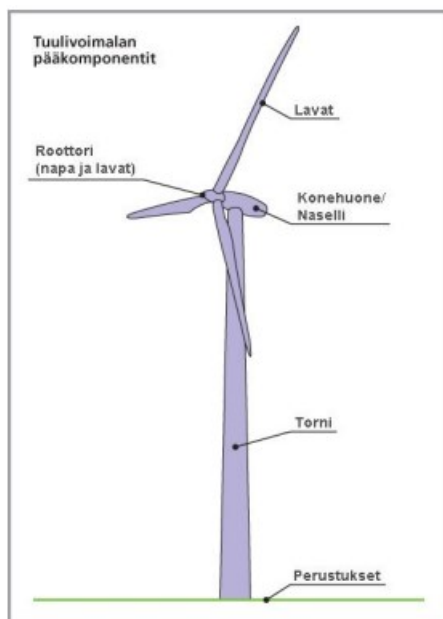
2.1 Tuulen synty

Jotta tuulivoiman energiantuotannon ymmärtäminen olisi mahdollisimman yksinkertaista, on hyvä perehtyä ensin siihen mitä tuuli on ja miten se syntyy. Tuuli on uusiutuva energianlähde ja sen energia syntyy auringon tuottamasta lämpösäteilystä. Aurinko lämmittää maapalloa epätasaisesti, minkä seurauksena lämpötilaeroja syntyy eri alueille. Päiväntasaajan lähellä auringon lämpösäteily tulee enemmän kohtisuorassa kulmassa ilmakehän läpi maanpinnalle, kun taas lähempänä napa-alueita auringon säteily tulee enemmän loivassa kulmassa. Tällöin auringon lämpösäteilyn matka maanpinnalle sekä ilmakehän läpi on pidempi ja sen lämpöenergia jäähtyy ennen lämpösäteiden pääsyä maanpinnalle. Lämpöisemmillä alueilla ilman lämpenemisen seurauksena lämmin ilma alkaa haihtumaan ylöspäin ja aiheuttaa matalapaineen tälle alueelle. Tämä ylöspäin haihtunut lämmin ilma alkaa liikkumaan kohti napoja lämpötilaerojen ja niistä johtuvien paine-erojen takia. Matkalla tämä ilma alkaa kuitenkin jäähtymään ja lopulta tiivistyy takaisin maanpinnalle, aiheuttaen kyseiselle alueelle korkeapaineen alueen. Tällöin korkeapaineen alueen ja matalapaineen alueen välille syntyy ilmanpaine erot, jotka luonnollisesti pyrkivät tasoittumaan. Eli korkeapaineen alueelta ilma alkaa virtaamaan kohti matalanpaineen aluetta, jolloin syntyy tuuli. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2024.)

Tuulen ilmanpaineella on iso merkitys myös tuulivoimalan tuotannon kannalta. Lämpötilan kasvaessa ilmamolekyylit lähtevät enemmän liikkeelle ja niiden etäisyys toisistaan kasvaa. Tämän seurauksena ilman tiheys pienenee. (Korpela 2016, 11.) Sen sijaan lämpötilan laskiessa ilman tiheys kasvaa, koska ilman molekyylit eivät liiku niin paljon ja pysyvät lähempänä toisiaan. Tiheämmässä ilmassa on enemmän energiapotentiaalia, jonka syystä juuri talvisin tuulivoimala tuottaa tiheämmän ilman takia enemmän energiaa, vaikka tuulen nopeus onkin sama (Mikkonen 2021).

2.2 Tuulivoimalan rakenne ja toimintaperiaate

Tuulivoimalan rakenne (kuva 1) koostuu hyvin yksinkertaistettuna tornista, konehuoneesta sekä roottorista. Roottori nimitystä käytetään yleisesti yhteisnimityksenä tuulivoimalan navasta ja siihen kiinnitetyistä lavoista. Pientuulivoimaloissa on useimmiten käytössä peräsin, jota käytetään kääntämään tuulivoimalan roottori tuulen suuntaan. Sen sijaan suuremman kokoluokan teollisissa tuulivoimaloissa on yleensä asennetut tuulimittarit, jotka mittaavat jatkuvasti tuulen nopeutta sekä sen suuntaa ja tuulivoimalan lavat kääntyvät moottorisoidun mekaniikan avulla optimaalisesti tuulen suuntaan nähden. (Korpela 2016, 49.)



Kuva 1. Tuulivoimalan yksinkertaistettu rakenne (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2024).

Tuulivoimaloita on lähinnä kahta erilaista mallia, vaaka- ja pystyakselisiä tuulivoimaloita. Niiden eroavaisuuksia sekä niiden hyötyjä ja haittoja tarkastellaan myöhemmin hieman tarkemmin. Tuulivoimalan energiantuotannon periaate perustuu tuulen liike-energian hyödyntämiseen ja sen muuntamiseen sähköenergiaksi. Tuulen liike-energia saa aikaan tuulivoimalan roottorin lapojen pyörimisen, josta lapojen tuottama mekaaninen energia ohjautuu roottorin navan välityksellä tuuligeneraattorin akseliin. Konehuoneessa sijaitseva generaattori hyödyntää

pyörivän akselin mekaanista energiaa ja muuntaa tämän sähköenergiaksi. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2024.)

Alapuolella näkyvässä kuvassa 2 on malli konehuoneen eli nasellin rakenteesta ja siellä olevista pääkomponenteista. Nasellin voidaan sanoa koostuvan yleisesti generaattorista, akselista, vaihdelaatikosta ja turbiinin suunnanmuutoslaakerista. Lisäksi konehuoneessa on valitun tuulivoimalan suuntausjärjestelmän perusteella usein turbiinin suunnanmuutosmoottori sekä mittauslaitteistot tai sitten peräisintä käytettävä ratkaisu. (Korpela 2016, 50.)

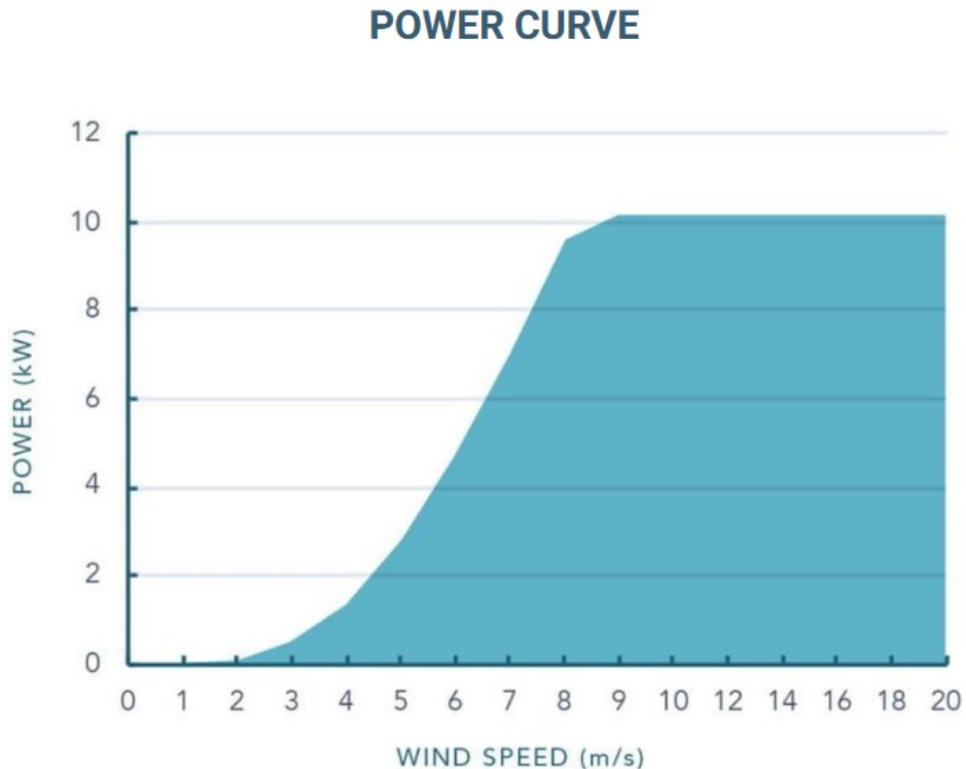


Kuva 2. Tuulivoimaturbiinin konehuone (Aeolos 2024).

2.3 Tuulivoimaloiden energiantuotanto

Yleisesti kaikki toteutuneet tuulivoimahankkeet ovat hyvin tarkasti suunniteltuja, ja yhtenä tärkeimpänä lähtökohtana suunniteltavan tuulivoimalan rakentamisessa on selvittää kyseisen kohteen energiantuotantopotentiaali. Tuulivoimaloiden energian vuosituotantoa pystytään tarkemmin arvioimaan käyttäen hyödyksi generaattorin tehojakaumaa. Tehojakauma kertoo kuinka tuulivoimalan generaattori tuottaa sähkötehoa suhteessa kyseessä olevaan tuulen nopeuteen. Alla olevassa kuvassa 3 nähdään esimerkki tuulivoimalan generaattorin tehokäyrästä. Tämä tehokäyrämenetelmäksi kutsuttu periaate perustuu mitattujen tuulisuusarvojen mallintamiseen ja antaa lähtökohtaisesti melko tarkan

arvion tuulivoimalan tuotanto-odotuksista eri tuulen nopeuksilla (Korpela 2016, 88).



Kuva 3. Tuulivoimalan tehokäyrä (Ryse Energy 2024).

Kuten kuvan 3 generaattorin tehokäyrästä huomataan, tuulivoimala alkaa tuottaa tehoa vasta kun tuulen nopeus nousee niin kutsutun cut-in speed eli voimalan käynnistysnopeuden tasolle, joka on alhaisin tuulen nopeus, jossa se alkaa tuottamaan tehoa. Tässä 10 kW vaaka-akselisen tuulivoimalan esimerkissä käynnistysnopeus on 2 m/s ja se saavuttaa nimellistehonsa jo 9 m/s tuulen nopeudella. Nykyteknologian kehittymisen ansiosta etenkin juuri pientuulivoimaloiden tuotannon tehokkuuden ja energian saannin maksimoinnin kannalta tällaiset matalilla tuulen nopeuksilla käynnistyvät tuulivoimalat ovat erittäin hyödyllisiä. (Rhoads-Weaver ym. 2024.)

Vaikka tuulen nopeus kasvaa yli 9 m/s nopeuksille, tuulivoimalan generaattorin antoteho ei enää kasva vaan se tuottaa saman verran energiaa kuin 9 m/s tuulen nopeudella. Tämän syynä on tuulivoimalan suojausmekanismit, jotka estävät tuulivoimalan tekniikasta riippuen, jarrumekanismien tai turbiinin lapojen

kulmaa säätämällä generaattorin tehoa tuulivoimalalle ja ehkäisee siten sen vaurioitumista. Koska isojen tuulten nopeuksien prosentuaaliset osuudet koko vuoden aikana ovat hyvin vähäisiä, niin kustannussyistä myrskytuulien energian hyödyntäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa toimintaa. Tuulivoimaloille on määritetty myös cut-out tuulen nopeus, jossa voimala on suunniteltu pysähtymään automaattisesti, jolloin tuulivoimalan tuuliturbiini lakkaa tuottamasta sähköenergiaa. Tämä johtuen juuri aiemmin mainituista turvallisuussyistä sekä tuulivoimalan turvallisen käyttämisen ja tekniikan pitkäikäisyyden takaamiseksi. Eteenkin useimmissa teollisen mittakaavan voimaloissa tuulen nopeuden cut-out rajaksi on asetettu 20 m/s tuulen nopeus. (Korpela 2016, 88.)

2.3.1 Huipunkäyttöaika

Tuulivoimaloiden energiantuotannossa käytetään usein huipunkäyttöaika kuvastamaan sitä, kuinka tehokkaasti tuulivoimala tuottaa sähköenergiaa vuoden aikana. Huipunkäyttöaika tarkoittaa sitä tuntimäärää, jona tuulivoimalan on toimittava nimellistehollaan vuoden aikana tuottaakseen tuulivoimalan vuositason sähköntuotannon. Vuodessa on yhteensä 8760 tuntia, joka on tuulivoimaloiden huipunkäyttöajan teoreettinen yläraja. Yleisenä tuulivoimaloiden hyvänä vuosittaisena huipunkäyttöajan rajana pidetään 2400 tunnin rajaa. (Korpela 2016, 86.)

Tuulivoimalatekniikan kehittyminen on kuitenkin mahdollistanut sen, että voimaloiden huipunkäyttöajat ovat viimeisten vuosien aikana alkaneet kasvamaan merkittävästi. Teollisen mittakaavan tuulivoimaloissa huipunkäyttöajat liikkuvat jo vuositasolla noin 3000–4000 tunnin välillä. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2024.)

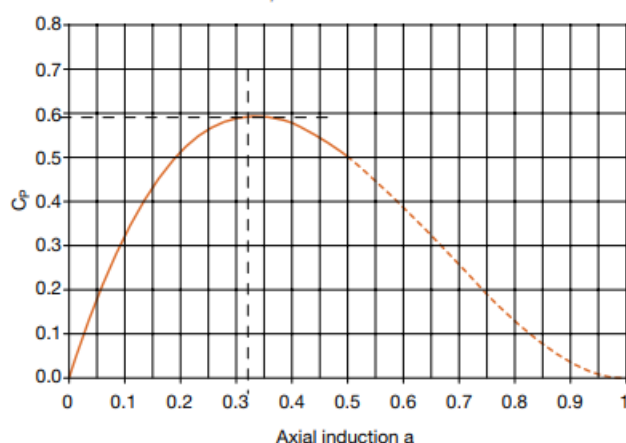
2.3.2 Betzin laki

Energiatehokkuuden kannalta tuulivoimalan hyötysuhteella on suuri merkitys tuulivoimalan kannattavuuteen ja siihen, kuinka kannattavaa tuulivoimalan rakentaminen on taloudellisista näkökulmista tarkasteltuna. Tuulivoimalan

hyötysuhde kuvaa sitä, kuinka tehokkaasti tuulivoimalan turbiini pystyy tuottamaan sähkötehoa suhteessa turbiinille tulevasta tuulen liike-energiasta (Korpela 2016, 86).

Tuulivoimalan hyödyntämää tuulen liike-energiaa ei kuitenkaan pystytä täysimääräisesti hyödyntämään sähköenergiaksi johtuen ilmavirtauksien fysiikkaan sekä aerodynamiikkaan vaikuttavista rajoittavista tekijöistä. Tuulivoimalalla on siis teoreettinen maksimi hyötysuhde, joka perustuu niin kutsuttuun Betzin lakiin. Betzin lain periaatteen mukaan ideaalitilanteessa tuulivoimalan turbiini pystyy tuottamaan maksimissaan noin 59,3 %:n hyötysuhteella energiaa turbiiniin kohdistuvasta tuulen liike-energiasta. Tuulivoimalan hyötysuhteeseen vaikuttavista tekijöistä kaikkein tärkein on aksiaalisen induktion arvo, joka kertoo kuinka paljon tuulen nopeus hidastuu ilmavirran kulkiessa tuulivoimalan turbiinin lävitse. Aksiaalinen induktioarvo kertoo siis, kuinka paljon tuulen nopeus on pienempi roottorin pyörimisakselin suunnassa verrattuna vapaasti kulkevaan tuulen ilmavirtaan. Kuvan 4 kuvaaja osoittaa tuulivoimalan hyötysuhteen sekä aksiaalisen induktion välistä riippuvuutta. Betzin laki osoittaa sen, että aksiaalisen induktiotekijän arvon ollessa $1/3$, teoreettinen tuulen hyötysuhteen maksimointi tapahtuu. (ABB 2011, 33.)

Figure 3.5 - Power coefficient C_p



Kuva 4. Tuulivoimalan tehokertoimen ja aksiaalisen induktion välinen riippuvuus (ABB 2011, 33).

2.3.3 Tuulivoimalan pyyhkäisy-pinta-ala

Pienilläkin tuulen nopeuksien eroilla on hyvin suuri vaikutus tuulivoimalan tehon saantiin. Yleisesti tuulivoimalan tehon saantiin vaikuttaa kaikkein keskeisemmin tuulen nopeus sekä roottorin pyyhkäisy-pinta-ala. Ainoastaan jo tuulen nopeuden kasvaessa lisää noin 1 m/s, tuulivoimalan tuottama spesifinen teho kasvaa jo noin 60–70 %. Spesifisellä teholla tarkoitetaan tuulivoimalan tuottamaa sähkötehoa suhteessa roottorin pinta-alaan. (ABB 2011, 30.) Alla olevassa kaavassa näkyy laskukaava, jolla lasketaan tuulivoimalan tuottama teho. Kaava 1 osoittaa, että tuulivoimalan teho P riippuu ilman tiheydestä ρ , roottorin pyyhkäisy-pinta-alasta A , tuulen nopeudesta v sekä tuulivoimalan tehokkuuskertoimesta C_p .

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p \quad (1)$$

Tuulivoimalan roottorin pyyhkäisy-pinta-ala on kaavan 2 mukaisesti riippuvainen lapojen pituudesta. Tuulivoimalan lavat muodostavat ympyrän muotoisen pinta-alan ja siten tehon laskennassa käytetäänkin ympyrän pinta-alan mukaista laskentakaavaa hyödyksi. Kun tuulivoimalan lapojen pituus kaksinkertaistuu, niin tuulivoimalan tuottama teho samalla nelinkertaistuu. Tuulen nopeuden kaksinkertaistuessa tuulivoimala tuottaa tehoa kahdeksankertaisen määrän. Näistä syistä pienilläkin tuulen nopeuden eroilla sekä roottorin pyyhkäisy-pinta-aloilla on merkittävä vaikutus tuulivoimalan sähkötehon saantiin. (Digma avoin oppimisympäristö 2018.)

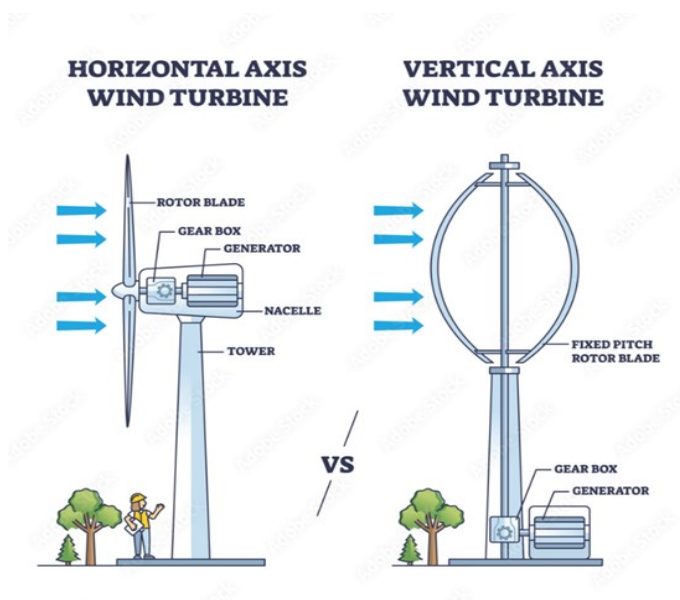
$$A = \pi * r^2 \quad (2)$$

Huomioitavaa tuulivoimalan energiantuotannossa on myös ilmaston olosuhteet. Suomen olosuhteissa talvella tuulee keskimääräisesti enemmän kuin kesällä ja talvella tuulivoimala tuottaa samalla tuulen nopeudella enemmän energiaa, koska ilma on talvella tiheämpää. Lisäksi lapojen pituutta ja maston korkeutta kasvattamalla päästään parempiin tuulen energiantuotanto potentiaaleihin käsiiksi. (Mikkonen 2021.)

2.4 Vaaka- ja pysty akseliset tuulivoimalat

Tuulivoimalat luokitellaan yleensä kahteen eri kategoriaan, vaaka-akselisiin sekä pysty akselisiin tuulivoimaloihin. Vaaka-akseliset tuulivoimalat ovat yleisesti kustannustehokkaampia vaihtoehtoja energiantuotannossa sen takia, että sen roottorin pinta-ala otettavalta tuulelta on paljon suurempi kuin pysty akselisen tuulivoimalan. Vaaka-akselisten tuulivoimaloiden haittapuolina ovat kuitenkin suurempi huolto- ja kunnossapitotarve sekä ympäristöön kohdistuvat meluongelmat, jotka ovat suurempia verrattuna pysty akselisiin tuulivoimaloihin. Pysty akseliset tuulivoimalat ovat hyvin kestäviä sekä melko äänettämiä ja huoltovapaita laitteita. Niiden energiantuotannon tehokkuus on paljon heikompi kuin vaaka-akselisten tuulivoimaloiden, jonka takia niiden suosio on vähäisempää. Energiantuotanto ja sen tehokkuus ovat lopulta merkittävimpiä tekijöitä valittaessa sopivaa tuulivoimalaa kohteelle. (Gregor 2021.)

Vaaka- ja pysty akselisisä tuulivoimaloissa (kuva 5) on suuri tekninen ero siinä, kuinka ne tuottavat sähköenergiaa. Vaaka-akselisen tuuliturbiinin pyörimisakseli on vaakasuuntainen ja suorassa linjassa tulevaan tuulivirtaan nähden, kun taas pysty akselisen tuuliturbiinin pyörimisakseli on pystysuuntainen ja kohtisuorassa tulevaan tuulivirtaan nähden. (Kumar Saini 2022.)



Kuva 5. Vaaka- ja pysty akselisen tuulivoimaturbiinin eroavaisuus (Adobe Stock 2024).

Pystyakselliset pientuulivoimalat eivät ole lähtökohtaisesti edes suunniteltuja suurempaa energiantuotantoa varten. Niiden käyttöä hyödynnetään sähköenergian varastoinnissa akkuihin paikoissa, johon yleisten sähköjakeluverkoston rakentaminen on hankalaa tai jopa mahdotonta. Jos jossain tarvitaan energiaa akkujen lataamiseen, niin pystyaksellista tuulivoimalaa voidaan käyttää siihen, kun tällaisen tuulivoimalan nimellisteho on noin 4–5 kertaa tehokkaampi kuin se energia mitä tarvitaan akkujen lataamiseen. (Gregor 2021.) Pystyakselliset tuulivoimalat voivat olla taloudellisesti hyödyllisiä vaihtoehtoja syrjäisillä alueilla, joissa ovat korkeat tuulisuuskeskiarvot ja paikka on täysin erillään normaaleista sähköjakeluverkostoista (Das ym. 2017).

2.5 Tuulivoimalan tekniset ratkaisut

Tuulivoimalan suuntausjärjestelmän tehtävänä on vastata tuulivoimalan roottorin suuntautumisesta tuuleen nähden ja sen vaikutus energiantuotantoon on merkittävä. Tuulivoimalan suuntausjärjestelmästä käytetään yleisesti nimitystä yaw-system. Yaw-systeemin taloudelliset kustannukset suhteessa yksittäisen tuulivoimalaturbiinin kokonaiskustannuksiin liikkuvat 1,3–5 % luokassa systemaattisesti analysoitujen kirjallisuuskatsauksien perusteella. (Kim & Dalhoff 2014.)

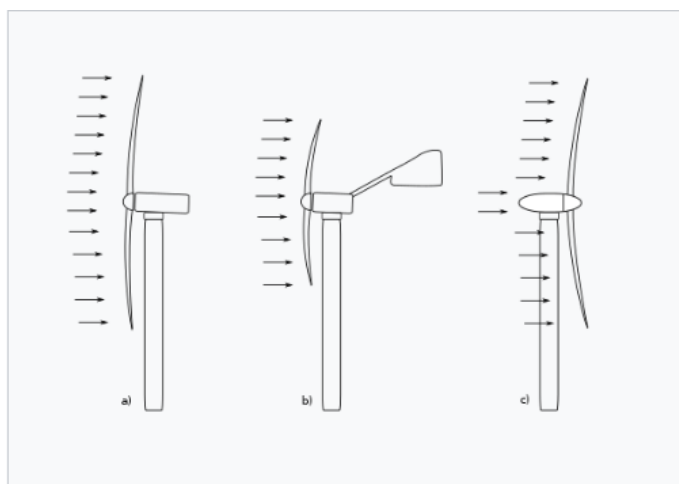
Vaaka-akselisille tuulivoimaloille on mahdollista käyttää kahta erilaista suuntausjärjestelmää, passiivista tai aktiivista yaw-systeemiä. Aktiivista suuntausjärjestelmää käytetään usein etenkin teollisen mittakaavan suurissa tuulivoimaloissa. Aktiivisen yaw-systeemin toiminta perustuu konehuoneessa asennettujen tuulen suuntaa ja suuruutta mittaavien antureiden muodostamaan ohjausjärjestelmään. Mittaavat anturit antavat jatkuvasti tarkkaa dataa tuulen suunnasta sekä sen suuruudesta. Suuntausmoottorin avulla tuulivoimalan konehuone kääntyy optimaalisesti tuulen suuntaan nähden, pyrkien aikaansaamaan maksimaalisen tuulienergian hyödyntämisen. Yleisimmät komponentit aktiivisissa yaw-systeemeissä ovat konehuoneen pyörimisen mahdollistava suuntauslaakeri, jo edellä mainittu suuntausmoottori sekä antureiden signaaleja käsittelevä ohjausjärjestelmä ja konehuoneen kääntymistä uudelleenohjauksen yhteydessä

paikalleen jarruttavat jarrut. Suuntauslaakerina käytetään valitusta tuulivoimalan suuntausjärjestelmästä riippuen joko rulla- tai liukusuuntauslaakeria. Suuntausmoottori voi olla hydraulinen tai sähköinen. (Gasch & Twele 2023.)

Automaatio-ohjauksella toimivan aktiivisen suuntausjärjestelmän tuulivoimaloissa energian vuosituotantomäärä voi olla lähes 20 % enemmän verrattuna peräisimellä toimivaan passiivisen suuntausjärjestelmän tuulivoimalaan. Aktiivisen yaw-systeemin tuulivoimalan investointikustannusten hinta on kuitenkin paljon kalliimpi kuin peräisintä käytettävässä tuulivoimalassa. Tästä syystä etenkin pienemmän kokoluokan pientuulivoimaloissa on taloudellisista syistä usein viisaampaa käyttää peräisimellä varustettua tuulivoimalaa. (Gregor 2021.)

Passiivisessa suuntausjärjestelmässä hyödynnetään nasellin perään kiinnitettyä peräsintä, joka tuulen voiman avulla ohjaa konehuoneen roottorin kääntymistä tuulen suuntaisesti. Pienemmän kokoluokan tuulivoimaloiden konehuoneet ovat herkempiä kääntymisliikkeille muuttuvissa tuulisuusolosuhteissa, joten niiden suuntausjärjestelmät on oltava hyvin suunniteltuja. Passiivisen tuulivoimalan suuntausjärjestelmä koostuu ainoastaan suunnanmuutoslaakerista ja useimpien hydraulisista levyjarruista tai sähköisistä suuntajarruista, joilla saadaan vakautettua sekä ehkäistyä roottorin turhaa pyörimistä ja värähtelyä. Suuntauslaakerin kanssa olisi suositeltavaa käyttää jonkinlaista jarrumekanismia, jolloin tuulivoimalan altistumista kovissa tuulissa voimakkaille värähtelyille ja gyroskooppisille kuormille saataisiin vähennettyä. (Gasch & Twele 2023.) Gyroskooppisella kuormalla tarkoitetaan vastustavia voimia, joita syntyy pyörivän tuuliturbiinin roottorin kohdatessa muutoksia pyörimissuunnassaan tai nopeudessaan. Gyroskooppinen kuorma ilmenee, kun tuuliturbiinin roottorin suunta muuttuu nopeasti esimerkiksi tuulen suunnan muuttuessa äkillisesti tai kun tuuliturbiiniin kohdistuu voimakkaita sivutuulia. (Karimirad 2012.)

Alapuolella olevassa kuvassa nähdään esimerkit tyypillisimmistä tuulivoimalan suuntausjärjestelmistä. Kuvassa 6 vaihtoehto b on esimerkki edellä mainitusta peräisintä hyödyntävästä yaw-systeemistä, joka on pientuulivoimala ratkaisuihin kaikkein tyypillisin vaihtoehto. Kuvan 6 esimerkissä c tuulivoimala ei tarvitse ollenkaan peräsintä ja siinä hyödynnetään alatuulta.



a) Upwind wind turbine equipped with an active yaw system, b) Upwind wind turbine equipped with a passive yaw system, c) Downwind wind turbine equipped with a passive yaw system.

Kuva 6. Tuulivoimalan erilaiset yaw-systeemit (Gasch & Twele 2023.)

Alatuulta hyödyntävä tuuliturbiini eroaa ylätuulta hyödyntävästä tuuliturbiinista siinä, että alatuuliturbiinissa tuuli osuu ensin tornin päähän ja konehuoneeseen ennen potentiaalisen tuulen kohdatessa tuulivoimalan roottorin. Kuvan 6 a ja b esimerkeissä on kyseessä sen sijaan ylätuulta hyödyntävä tuuliturbiini, joka ottaa tuulienergian vastaan suoraan tuulen roottorille. (Das ym. 2017.) Alatuulta hyödyntäviä tuulivoimaloita on käytössä vielä tähän mennessä paljon vähemmän verrattuna ylätuulta hyödyntäviin tuulivoimaloihin. Laskennalliset tutkimukset osoittavat, että vapaasti tuuleen suuntautuvat roottorit lisäävät virheitä alatuulta hyödyntävien tuulivoimaloiden roottorien oikeassa suuntautumisessa tuulen tulosuuntaan nähden ja vähentää siten potentiaalisen tuulienergian saantia. Lisäksi tällaisissa ratkaisussa aiheutuu todistettusti enemmän gyroskooppisia kuormia ja siten huoltokustannuksia tuulivoimaturbiinille. (Borlotti ym. 2021).

2.6 Tuulivoimalan sijoittamispaikan suunnittelu

Tuulivoimalan sijoittamispaikkaa suunniteltaessa on tärkeää pyrkiä minimoimaan ympäröivän maiseman, kuten puiden ja rakennusten, aiheuttamaa turbulenssia. Tämä on tärkeää, koska turbulenssi aiheuttaa ilmapirran pyörteisyyttä ja heikentää tuulen nopeutta, mikä vaikuttaa heikentävästi

tuulivoimaloiden energiantuotantoon ja tehokkuuteen. Lisäksi tuulivoimalan tornin pituus on valittava niin, että se nousee korkeammalle kuin ympärillä olevat esteet. Tämä auttaa tuuliturbiinia saamaan alueelta paremman ja tasaisemman tuulen, mikä lisää sen tehokkuutta ja energiantuotantoa.

Alueelle rakennettavan tuulivoimalan tuulisuusolosuhteista olisi hyvä olla tarkasti tutkittua dataa tehtyjen tuulimittausten avulla. Monet apuohjelmat alueen tuulisuusarvioista kuten Tuuliatlas on hyvä ohjelmisto tuulisuustietojen keruuseen tutkittavalla alueella. Kaikkein luotettavinta tietoa antaa kuitenkin tutkimuskohteessa tehdyt tuulimittaukset. Paikan päällä tehdyt tuulisuusmittaukset lisäävät merkittävästi tuulisuusarvojen luotettavuutta sekä laadukkuutta. Mittausten avulla saadaan melko tarkkaa dataa tuulisuuden keskinopeudesta tutkittavalla kohdealueella. Huomioitavaa tuulisuusmittauksia tehtäessä on se, että tuulimittaukset pitää lähtökohtaisesti pyrkiä mahdollisimman tarkasti suorittamaan lähellä maston napakorkeutta. Tällöin tuulisuusmittausten tuloksilla on merkittävyyttä, kun saadut tulokset ovat mitattu samalta korkeudelta kuin suunniteltavan tuulivoimalan maston korkeus. Lisäksi tuulisuusmittauksia kohdealueella olisi hyvä tarkastella vähintään yhden vuoden tarkastelujaksolla, jolloin tutkimusten kvalitatiivisuus on aidosti merkittävä. (WINDExchange 2024.)

Tuulisuusmittauksia voidaan suorittaa myös maanpinnan tasolta, jossa hyödynetään mittaustavan valinnan mukaan useimmiten joko mekaanisen paineen vaihteluja tai sähkömagneettisen säteilyn määrää ilmakehässä tutkittavalla kohdealueella. Maan pinnalta tehdyt tuulisuusmittaukset ovat useimmiten perustelutuja valintoja pientuulivoimalahankkeen tuulisuustietoja kerätessä johtuen niiden merkittävästi pienemmistä kustannuksista sekä yksinkertaisuudesta. Tehtyjä tuulisuusmittauksia on hyvä tarkastella vielä jälkeenpäin kriittisesti sekä vertailla mahdollisesti aiemmin kerättyyn dataan tutkimusalueelta tai sen lähialueilta. Tällöin tuulisuuden vuosittaisista vaihteluista saadaan hyvät sekä tarkat arviot tutkimuskohteessa. (Korpela 2016, 44–45.)

Tuulivoimalan paikan optimaalisella valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi tuulivoimalan energiantuotantoon. Tuulivoimalan paikan valintaa suunniteltaessa olisi hyvin tärkeää tehdä mahdollisimman tarkka suunnittelukohteen

paikan arviointi, jossa huomioidaan jo edellä mainitut tuulisuusolosuhteet sekä paikan ominaisuuksien arviointi. Paikan ominaisuuksien arvioinnissa tärkeänä kriteerinä on arvioida tuulivoimalan mahdollisen sijoituspaikan topografisia piirteitä eli alueen maaston muotoja. Myös alueella sijaitsevilla rakennuksilla on vaikutusta tuulen nopeuksiin ja turbulenssin muodostumiseen. Turbulenssin muodostuminen on erittäin merkittävä ongelma etenkin juuri pientuulivoimaloille, koska niiden maston napakorkeudet ovat paljon matalammalla kuin teollisen mittakaavan tuulivoimaloissa. Pientuulivoimalat ovat useimmissa tapauksissa myös lähempänä alueella olevaa infrastruktuuria ja puustoa verrattuna teollisen mittakaavan tuulivoimalaratkaisuihin. Turbulenssi voi aiheuttaa tuulivoimalalle jopa 15–25 % vuotuisen energiantuotannon häviämisen huonolla sijoittamispaikan suunnittelulla ja siten vaikuttaa merkittävästi myös tuulivoimalan kannattavuuteen. (WINDEXchange, 2024.)

Tuulivoimalan sijoittamisen näkökulmasta myös maston korkeudella on merkittävä vaikutus energiantuotantoon. Pientuulivoimaloiden maston korkeussuositukset suhteessa muuhun ympäristöön poikkeavat hieman verrattuna teollisen mittakaavan tuulivoimaloihin. Pientuulivoimalan on suositusten mukaan oltava vähintään 10 metriä korkeammalla kuin mikään 150 metrin etäisyydellä tuulivoimalasta oleva tuulen este kuten puusto tai rakennukset. Lisäksi pientuulivoimalalle on varattava riittävästi tilaa tornin nostamista ja laskemista varten, mikäli kyseessä on niin sanottu laskettava tuulivoimala. Ankkuroitavissa pientuulivoimaloissa, jotka eivät ole kaadettavia on myös varattava riittävästi tilaa ankkurointiputkia varten. (WINDEXchange, 2024.)

Talojen ja metsien, jotka ovat vähintään puolet maston korkeudesta tulisi olla minimissään 50 metrin etäisyydellä pientuulivoimalasta, jottei sen tehon tuotanto merkittävästi alkaisi kärsimään. Lähtökohtaisesti pientuulivoimalan sijoittaminen ei ole suositeltua talojen tai muunkaan rakennuksen katolle. Rakennuksen katolle asennettava pientuulivoimala aiheuttaa tuulen turbulenssia katon pinnoilta, joka heijastuu pientuulivoimalan roottoriin ja pudottaa merkittävästi saatua energiantuotantoa. Myös pientuulivoimalan paino on itsessään jo useamman tonnin painoinen, mikä alkaa vaikuttamaan alla olevan rakennukseen ja

sen katon kestävyteen. Lisäksi tuulivoimalla aiheuttaa paljon tärinää isommilla tuulen nopeuksilla, kun se altistuu suuremmille voimille. (Gregor 2021.)

Tuulivoimalan sijoittamispaikan suunnittelussa täytyy huomioida myös maanteiden sekä muiden liikenneyhteyksien vaikutusta hankkeeseen. Yleisesti vähimmäisetäisyysvaatimus maantiestä on suoja-alueen leveys lisättynä voimalan kokonaiskorkeus eli torni ja sen lavan pituus yhteensä. Maantien suoja-alueen pituus on tapauskohtaisesti vähintään 20–30 metriä maantien ajoradasta. Maantien kaarrekohtassa tuulivoimalla on ohjeistettu sijoitettavan näkökentän ulkopuolelle. Etäisyys rautateihin sen sijaan on oltava vähintään 30 metriä tuulivoimalan kokonaiskorkeus lisättynä lähimmän junaraiteen linjasta. Huomioitavia tekijöitä tuulivoimalan etäisyydestä liikenneväyliin on esimerkiksi tieluokka, nopeusrajoitukset, tiellä oleva liikenteen määrä ja liikenteenturvallisuuteen vaikuttavat tekijät. Tuulivoimalan sijoittamisen etäisyys maanteihin, rautateihin ja vesiväyliin on hyvin tapauskohtaisia, mutta tärkeimpänä arvioinnissa on ottaa huomioon yleisesti liikenneturvallisuuden varmistaminen. (Liikennevirasto, 2012).

3 Pientuulivoima

Pientuulivoimaloiden toimintaperiaate ei poikkea suurista teollisista tuulivoimaloista. Ne ovat ainoastaan kokoluokaltaan pienempiä ja niiden tuotantoteho kapasiteetti on vähäisempi. Pientuulivoimalat ovat suunniteltuja pienimuotoiseen energiantuotantoon esimerkiksi yksittäisille kiinteistöille, pienyrityksille, maataloille ja jopa purjevereisiin. Kansainvälisen standardin mukaan pientuulivoimalla määritellään niin, että sen roottorin pyyhkäisyalue on maksimissaan 200 m² tai ne ovat nimellisteholtaan maksimissaan noin 50 kW. (Industrial Technology Research Institute 2018.) Pientuulivoimalan käsite on kuitenkin hyvin häilyvä ja sen määritelmä vaihtelee hyvin paljon maittain. Alla olevassa taulukossa 1 näkyy muutamien eri maiden ja kansainvälisen standardin määritelmä pientuulivoimalasta.

maa	Osastot/yhdistykset	Ilma-alustyyppi	Nimellisteho (kW)
kansainvälinen	Kansainvälinen sähkötekkinen toimikunta	Pienet tuulivoimalat	≈ 50
Kanada	Kanadan luonnonvarat (NRCan) Kanadan tuulienergiayhdistys (CanWEA)	Pienet tuuliturbiinit	0.3 - 1
		Pienet tuulivoimalat	1 - 30
Kiina	Uusiutuvaa energiaa ja energiatehokkuutta koskeva kumppanuus (REEEP)	Pienet tuulivoimalat	< 100
Saksa	Bundesverband WindEnergie (BWE)	Pienet tuulivoimalat	< 75
Iso-Britannia	Uusiutuva UK	Mikro- ja pientuulivoimalat	< 50
	Mikrotuotannon sertifiointijärjestelmä (MCS)		
Yhdysvallat	Amerikan tuulienergiayhdistys (AWEA)	Pienet tuulivoimalat	< 100

Taulukko 1. Pientuulivoimalan määritelmä eri maittain. (Industrial Technology Research Institute 2018.)

3.1 Pientuulivoimalan hankinta

Pienet aurinkovoimalat ovat tällä hetkellä paljon suosittuimpi energiantuotantomuoto energian pientuotannossa kuin pientuulivoimalat. Useimmiten pientuulivoimaloiden hankintahinta on investointikustannuksiltaan paljon suurempi ja niiden investointien takaisinmaksuaika pidempi verrattuna aurinkovoimaloihin. Aurinkovoimalat ovat teknisesti yksinkertaisempia, huoltovapaampia ja myös monesti paljon halvempi investointi kuin pientuulivoimalan rakentaminen. Pientuulivoimaloissa on kuitenkin paljon potentiaalia energiantuotannossa, mutta sen tekniikkaan ja hankintaan liittyvää tietoa tarvitaan lisätä tavallisille kuluttajille.

Pientuulivoimaloiden myyjien markkinat ovat melko pienet vielä tällä hetkellä Suomessa. Pientuulivoimalaa hankittaessa ostajan tulisi olla hyvin perehtynyt

aiheeseen jo entuudestaan ja tiedostaa sekä arvioida oman kohteen investoinnin kannattavuutta kokonaisuudessa. Myyjän asiantuntevuus on tärkeä tekijä tällaisessa päätöksenteossa, koska kuluttajalla itsellään ei välttämättä ole minkäänlaista käsitystä pientuulivoimaloista. Jotta vääriä arvioita ja päätöksiltä välttyttäisiin pientuulivoimalaa hankittaessa, olisi hyvä myyjän ja ostajan välillä käydä läpi tarkasti sekä kattavasti vielä opastus pientuulivoimalan turvallisesta ja oikeaoppisesta seurannasta, sen käytöstä sekä tarvittavista huoltotoimenpiteistä. Pientuulivoimala tulisi huoltaa vähintään muutaman vuoden välein ja tarkastaa sen yleinen kunto silmämääräisesti vähintään kerran vuodessa hieman tarkemmin. Pientuulivoimalasta tulee huomioida esimerkiksi mekaanisesti kestävät ja turvalliset rakenteet sekä kiinnitykset ja ukkossuojaukset. Hankittavan pientuulivoimalan olisi hyvin suositeltavaa täyttää eurooppalaiset määritetyt standardit ja oltava CE-merkitty. Jotkin pientuulivoimalatoimittajat myyvät avaimet käteen- periaatteella olevia paketteja, jotka voivat monissa tapauksissa olla kaikkein helpoin sekä yksinkertaisin vaihtoehto asiakkaalle. (Gregor 2021.)

Pientuulivoimalan hankintaa harkittaessa olisi hyvä pohtia ensin käytännön tasolla asiantuntevien henkilöiden kanssa tarkemmin, olisiko pientuulivoimalaan viisasta lähteä investoimaan. Ensimmäisenä olisi hyvä tarkastella nykyistä energiakulutusta ja miettiä energiantarvetta, mitä pientuulivoimalla halutaan saavuttaa. Tämä edesauttaa pientuulivoimalan myyjää tekemään sopivan mitoituksen asiakkaalle. Tärkeimpänä tekijänä lopulta pientuulivoimalan hankintaa suunniteltaessa on tarkastella, onko sen rakentamisessa kyseisessä kohteessa minkälaiset edellytykset ja miettiä isossa kuvassa investoinnin kannattavuutta. Pientuulivoimalalle on löydettävä riittävästi tilaa sijoituspaikalle sekä hyvät tuulisuusolosuhteet, jotta sen rakentaminen olisi millään muotoa edes harkittavissa.

Pientuulivoimaloiden keskimääräinen asennushinta on ollut Yhdysvalloissa vuonna 2021 noin 5120 dollaria per asennettu nimellistehollinen kilowattitunti tilastoitujen kyselyjen perusteella. Taulukossa 2 on keskiarvollisia pientuulivoimaloiden asennuskustannuksia riippuen pientuulivoimalan asennetusta nimellistehollisesta määrästä. Asennuskustannusten hinnat ovat melko suuria muutaman kilowatin järjestelmille, mutta niiden hintataso kilowattia kohden alkaa merkittävästi laskea, kun pientuulivoimala järjestelmän kokoluokka nousee yli 10 kW:n.

Pientuulivoimalat vaativat siis melko suuren alkuinvestoinnin ja niiden sijoittaminen taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltuna vaatii usein pitkäaikaista sitoutumista pientuulivoimala hankinnalle, sillä niiden takaisinmaksuajat voivat useimmiten olla melko pitkiäkin ajanjaksoja. (WINDEXchange, 2024.)

Small Wind Turbine Applications	Typical Power Rating	Average Purchase Cost* of Turbine Only (per unit power)	Average Total Installed Cost* (per unit power)
Battery Charging	Up to 1,000 W (1 kW)	\$2,800-3,000/kW	\$5,000-\$7,000/kW
Residential	1 kW to 10 kW	\$3,000-4,000/kW	\$6,000-8,000/kW
Farm	Above 10 kW to 300 kW	\$2,000-\$2,500/kW	\$3,000-4,000/kW

Taulukko 2. Pientuulivoimalan tyypillisiä asennuskustannuksia (Rhoads-Weaver ym. 2024).

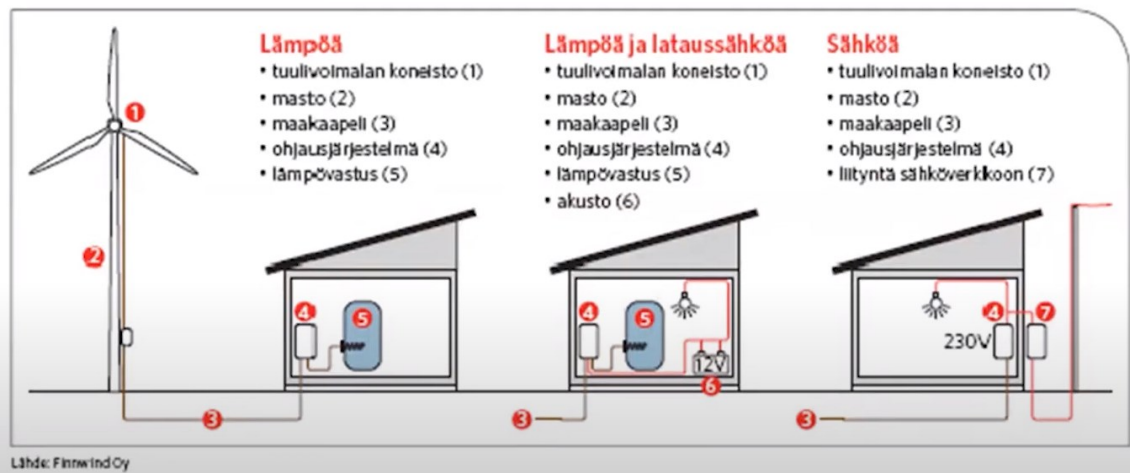
Pientuulivoimalaa ostettaessa suositeltavinta olisi ostaa kaupallisesti testattu ja sertifioitu pientuulivoimala. IEC 61400-2 -standardi sisältää ohjeet pienten tuuliturbiinien suorituskyvyn ja turvallisuuden varmistamiseksi. Tämä standardi ei ole erityinen sertifiointijärjestelmä, mutta sen noudattaminen voi olla vaatimus, kun tuuliturbiineja arvioidaan sertifiointin tai hyväksynnän saamiseksi tietyillä markkinoilla tai alueilla. Jos tuuliturbiinimalli noudattaa IEC 61400-2 -standardia ja täyttää sen vaatimukset, valmistaja voi käyttää tätä standardia todisteena siitä, että heidän tuotteensa on suunniteltu ja testattu kansainvälisesti hyväksytyjen standardien mukaisesti. Standardien mukaisesti pientuulivoimala on sellainen, jonka halkaisija on enintään 15,6 metriä tai sen pyyhkäisyypinta-ala on maksimissaan 200 m². Arviolta 200m² alueelta pientuulivoimalan roottori pystyy teoriassa tuottamaan energiaa noin 60 kW:n nimellisteholla. (Gregor 2021.)

3.2 Pientuulivoimalla tuotetun energian käyttökohteet

Pientuulivoimalla tuotettua energiaa voidaan käyttää useampaan tarkoitukseen. Pienimmissä pientuulivoimaloissa tuotettua energiaa käytetään lataamaan

akkuja. Tässä ratkaisussa ollaan kokonaan irti yleisestä sähköjakeluverkosta ja tuotetaan energiaa vain omien tilojen sähkön käyttöä varten. Lämmitysenergiaa pystytään tuulivoiman avulla tuottamaan myös rakennuksen ja käyttöveden lämmitykseen. Tällaisessa energiaratkaisussa laitetaan lämpövastukset lämminvesivaraajaan ja sitä kautta tuotetaan lämmintä käyttövettä kyseiselle kohteelle.

Pientuulivoimaloiden verkkoinvertertien saatavuus on merkittävästi heikentynyt viime vuosina. Inverterin tarkoitus on muuntaa pientuulivoimalan tuottama vaihtosähkö sähköverkkoon sopivaan muotoon sekä taajuudelle. Niiden avulla mahdollistetaan pientuulivoimalan kytkeminen suoraan kohteen omaan sähköverkkoon ja ylijäämäenergia voidaan myydä paikalliseen sähköverkkoon. (Mikkonen 2021.)



Kuva 7. Vaihtoehtoja pientuulivoimalla tuotetun energian käyttöön (Finnwind 2024).

3.3 Pientuulivoimaloiden ympäristövaikutukset

Pientuulivoimalan rakentamisen perusteita ja syitä voi olla useampia. Yleisimpänä syynä on useimmiten taloudelliset hyödyt ja pyrkimys vähentää ostosähkön tarvetta. Lisäksi omavaraisuuden lisääminen, ympäristöajattelu, CO₂-päästöjen vähentäminen ja ekologisesti puhtaasti tuotetun energian merkittävyys voi olla perusteltuja syitä kuluttajalle investoida pientuulivoimalaan. Myös yrityksen

imagon rakennus voi osittain vaikuttaa päätökseen pientuulivoimalla hankittuun energiantuotantoon päättämisestä. Pientuulivoimalasta koituvat ympäristölliset haitat ovat paljon vähäisempiä verrattuna teollisen mittakaavan tuulivoimala ratkaisuihin. Tämä johtuu siitä, että ne tarvitsevat merkittävästi vähemmän tonttitiilaa eivätkä vaadi suuria maanmuokkauksia tai tieverkostojen rakentamista. Yleisellä tasolla pientuulivoimalan maisemalliset haitat ja vaikutus lähiympäristön ekosysteemille ovat melko vähäisiä.

Pientuulivoimalasta voi aiheutua äänihaittoja, jotka on huomioitava luvitusvaiheessa. Pientuulivoimaloiden napakorkeus on merkittävästi lähempänä maanpintaa kuin teollisen kokoluokan tuulivoimaloissa. Useimmiten pientuulivoimalat on asennettu paljon lähemmäs myös muuta asutusta ja rakennuksia, jolloin äänilähde on paljon lähempänä. Lapojen pyörimisestä koituvat äänihaitat saattavat häiritä esimerkiksi alueella olevia eläimiä. Pientuulivoimaloiden äänen aiheuttaa lähinnä voimalan lapojen pyöriminen. Kierrosnopeudet pientuulivoimaloissa kovilla tuulilla ovat suuria, jolloin äänen määrä ja ääniongelmien helposti lisääntyvät alueella. Nykyaikaisissa pientuulivoimalaratkaisussa tekniikka on kuitenkin kehittynyt merkittävästi viime vuosien aikana. Niissä on jo siipien suunnittelussa otettu huomioon mahdolliset ääniongelmien. Lapojen kierrosnopeudet nousevat maksimissaan muutamaan sataan kierrokseen minuutissa, jolloin tuulivoimasta aiheutuvat äänet eivät enää usein muodostu ongelmaksi. Havaittavaa ääntä kuuluu usein vasta kun tuulen nopeus ylittää 8 m/s, jolloin ympäristössä syntyy jo itsestään luonnon omaa ääntä, mikä osittain peittää pientuulivoimalan äänen. (Gregor 2021.)

3.4 Pientuulivoimalan tarvittavat luvat

Pientuulivoimalan lupamenettely ja tarvittavien lupien saaminen on riippuvainen kunnasta. Tyypillisesti pientuulivoimala tarvitsee joko toimenpideluvan tai rakennusluvan. Kunnan rakennustarkastajalta täytyy selvittää tarkemmin, kuinka menettely kunnassa toimii, ja luvat on oltava hankittuina ennen pientuulivoimalan rakentamista. Rakennuslupa-asian käsittelyyn kannattaa varata aikaa, koska kaikissa kunnissa ei välttämättä ole rakennusviranomaiset olleet

pientuulivoimaloiden kanssa aiemmin tekemisissä. (Gregor 2021.) Kunnilla on siis eroavaisuuksia tuulivoimalan lupamenettelyn käsittelyissä ja kunnan lupamenettelyissä kannattaakin olla yhteydessä kunnan rakennustarkastajaan. Tarvittavien toimenpide- ja rakennuslupahakemuksien lisäksi lupia haettaessa täytyy olla tuulivoimalasta tehdyt julkisivupiirroksot sekä asemapiirustukset tuulivoimalan sijoituspaikasta. Joissain tapauksissa myös naapureiden lupa tarvitaan pientuulivoimalan rakentamisen hyväksymiseksi. Vaikkei naapurin lupaa tarvittaisi, on hyvä tiedottaa asiasta, mikäli on suunnittelemassa pientuulivoimalan rakentamista omalle tontilleen. (Finnwind 2024.)

Yleisesti pientuulivoimalan lupa-asioita hakiessa täytyy ottaa huomioon muutamia vaatimuksia sekä rajoituksia, joita säätelevät esimerkiksi viranomaiset sekä kunnan rakennustarkastaja. Pientuulivoimalan rakentamiseen liittyviä rajoituksia on muun muassa vaadittu tontin vähimmäiskoko sekä tietyt etäisyydet kiinteistörajoista ja naapureiden rakennuksista. Myös melumääräyksiä sekä korkeusrajoituksia on selvitettävä lupa-asioiden järjestelyissä. (WINDExchange, 2024.)

Pientuulivoimalan rakentaminen voi vaatia myös lentoesteluvan. Yli 30 metrin rakennukset lentoasemien lähialueilla ja kaikki yli 60 metrin rakennukset Suomessa vaativat lentoesteluvan. Traficom käsittelee lentoestelupia ja siihen vaaditaan liikenteen turvallisuusvirasto ANS Finlandin lausunto. Lisäksi yli 50 metriä korkeat tuulivoimalat vaativat luvan puolustusvoimilta. On myös mahdollista, että pientuulivoimala voi tarvita näiden lisäksi esimerkiksi vesi- tai ympäristölupaa tai rajavartiolaitoksen lausuntoa. (Suomen Tuulivoimayhdistys 2024.)

3.5 Pientuulivoimalan investointituet

Pientuulivoimalan investointituet ovat merkittävässä roolissa investoinnin kannattavuuden kannalta, ja nykypäivänä tukien saaminen on usein edellytys taloudellisen kannattavuuden onnistumisessa. Pientuulivoimaloille voidaan myöntää useita erilaisia investointitukia. Kaikilla pientuulivoimalaan saatavilla oleviin

investointitukiin on omat vaatimukset ja kriteerit, jotka on täytyttävä, jotta tukipaketin saaminen on mahdollista.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on maatalousyrittäjä, jolla on mahdollista hakea pientuulivoimalan rakentamiseen ainakin ELY:n myöntämää maatalouden investointitukea. Tuen määrä on 40 prosenttia kokonaisinvestoinnista, ja siihen voi lisätä myös pientuulivoimalan suunnitteluun liittyvät kulut. Investoitavan pientuulivoimalan on oltava kuitenkin uusi ja vähintään 17 500 € suuruinen investointi. Käytettyjä laitteita ei hyväksytä tähän tukipakettiin. Lisäksi pientuulivoimalla tuotettu energia pitää hyödyntää maatalouden tuotannolliseen toimintaan täysimääräisesti ja siitä pitää rajata pois ei tuotantoon käytettävät kiinteistöt. Tukipäätös on oltava valmiiksi käsiteltynä ennen kuin tukea hakenut yritys tai henkilö voi tehdä laiteinvestoinnin. (Ruokavirasto 2024).

Pientuulivoimalalle voi hakea myös ELY:n maaseuturahoitustukea, jonka maksimituen määrä on 30 % investoinnista. Kyseistä tukea voidaan myöntää maaseutualueille oleville pienille tai keskikokoisille yrityksille ja yrittäjille. Investoinnin on oltava 10 000 € - 2 000 000 € suuruinen, ja tässä tuessa hyväksytään myös käytetyt investoitavat laitteet, mikäli niiden arvioitu käyttöikä on vielä riittävän pitkä. Vaatimuksena tuen saannille on, että investointi on taloudellisesti kannattava sijoitus yrittäjälle tai yritykselle, mikä tulee todentaa kannattavuuslaskelmien perusteella. Tämä tuki eroaa maatalouden investointituesta lisäksi siten, että investoinnin voi aloittaa heti tukihakemuksen lähettämisen jälkeen. Jos investoinnin kuitenkin haluaa aloittaa ennen tukipäätöstä, investointi on tehtävä omalla vastuulla riippumatta siitä saako tuen hakija lopulta kyseistä maaseuturahoitus tukea. (Ruokavirasto 2024).

Kolmantena vaihtoehtona on hakea tukea työ- ja elinkeinoministeriön jakamasta investointituesta. Tämän tuen edut ovat kuitenkin pientuulivoimalalle paljon huomattavampia ja myönnettävän tuen vaatimukset ovat tiukemmat. Maaseutuyrittäjille tämä tuki ei ole välttämättä usein taloudellisesti kannattavaa, sillä pientuulivoimala ei saa olla nimellistehoaltaan 20 kW suurempi ja tuotetusta sähköstä on myytävä vähintään 80 % sähköverkkoon, mikä todistetusti ei ole pienen energiantuotannon kokoluokassa kannattavaa. (Ruokavirasto 2024).

3.6 Pientuulivoimalan muut tekniset ratkaisut

Kovien myrskytuulien varalle on tekniikoita, joilla pientuulivoimalan saa toimimaan ja pysähtymään turvallisesti, ettei mikään osa voimalasta hajoaisi. Roottoriin voidaan asentaa mekaaninen jarru tai sähköinen jarruvastus. Pientuulivoimalan generaattorista riippuen esimerkiksi sähkömagneettigeneraattoriin ei voi asentaa jarruvastuksia. Tällainen asennusratkaisu voisi olla vaarallinen sähkökatkon tapahtuessa, koska pientuulivoimalan roottori jatkaisi vain pyörimistään aiheuttaen herkästi voimalan vaurioitumisen. Paras vaihtoehto on lähtökohtaisesti mekaaninen jarru, jossa on tavalliset jarrulevyt. Joissain teknisissä ratkaisuissa siipien kärjissä on niin kutsutut tippujarrut, jotka aktivoituvat korkeissa tuulen nopeuksissa. Tippujarruissa pientuulivoimalan lapaan kärkiosa kääntyy 90 astetta muuhun lapaan nähden ja hidastaa lapaan kierrosnopeuden pyörimistä sekä ehkäisee pientuulivoimalan vaurioitumista kovilla tuulilla. Mikäli jarrut eivät toimi, pientuulivoimala pyörii kovilla tuulilla liian kovia kierrosnopeuksia, jolloin tuulivoimalan rakenteet voivat vaurioitua ja lavat tuhoutua. Lavat voivat irrota kokonaan tuulivoimalasta ja rikkoa voimalan kääntömekanismit sekä mahdollisesti myös jopa vääntää maston. (Gregor 2021).

Pientuulivoimalassa, johon on asennettu kestoplaneettigeneraattori, on käytettävä invertteriä. Invertteri muuntaa generaattorin tuottamaa tasavirtaa vaihtovirraksi, jotta sitä voidaan käyttää yleisessä sähköverkossa. Kestoplaneettigeneraattorit ovat energiantuotannon näkökulmasta tarkasteltuna parempia kuin sähkömagneettiset generaattorit, koska ne toimivat paremmin myös pienemmillä tuulen nopeuksilla. Sähkömagneettisessa generaattorissa on oltava mukana myös vaihdelaatikko ja siihen on vaihdettava vaihteistoöljyt vähintään 3–5 vuoden välein. (Gregor 2021).

4 Työn tavoite ja menetelmät

Opinnäytetyön tavoitteena on ollut tehdä teknistaloudellinen selvitys pientuulivoimalan rakentamisesta toimeksiantajan maatalousyritykselle. Työn tavoitteena oli suunnitella sekä tarkastella pientuulivoimalan rakentamiseen vaadittavia edellytyksiä ja toimenpiteitä. Työssä tarkasteltiin taloudellisesta ja laskennallisesta näkökulmasta, kuinka kannattava investointi pientuulivoimalan rakentaminen työn toimeksiantajan Koivikon Kartano Oy:lle tulisi olemaan.

Työn lopputuloksen tavoitteena oli selvittää, onko Koivikon Kartano Oy:n järkevää lähteä investoimaan pientuulivoimalaan. Laskelmien avulla tarkasteltiin investoinnin taloudellista kannattavuutta. Kerättyjen lähtötietojen sekä tehtyjen mitoituslaskelmien avulla saatiin informatiivinen tietopaketti pientuulivoimalan rakentamisen kustannusrakenteesta ja sen kannattavuudesta yritykselle.

Työssä on ollut tarkoituksena selvittää mahdollisimman yksityiskohtaisesti ja tarkasti pientuulivoimalan investoinnin asennus-, ylläpito- ja käyttökustannukset. Opinnäytetyössä tehtyjen laskelmien ohella on saatu myös kerättyjen aineistojen avulla yksityiskohtaista tietoa pientuulivoimalan rakentamisen teknisistä vaatimuksista sekä tietoa tarvittavista luvista ja määräyksistä. Työn tavoitteena oli samalla edesauttaa sekä helpottaa toimeksiantajaa tekemään päätös pientuulivoimalahankkeen mahdollisesta toteutuksesta.

Tässä opinnäytetyössä on käytetty hyödyksi tuulivoimaan liittyvää kirjallisuutta, kyseisen alan asiantuntijoiden sekä yritysten näkemystä ja verkkojulkaisuja. Tämä on tutkimuksellinen opinnäytetyö, jossa pyrittiin laatimaan tarkasti analysoitu ja laskennallisesti toteutettu kokonaisuus toimeksiantajalle pientuulivoimalan hankinnan kustannusrakenteesta. Työssä kerättyjä tietoja pystytään soveltamaan yleisesti pientuulivoimala investoinnin kannattavuuslaskennassa ja lisäksi se antaa hyvää tietoa pienyrityksille sekä muille pientuulivoimalan hankinnasta kiinnostuneille henkilöille.

Työssä perehdyttiin pientuulivoimalan hankinnan kustannusrakenteeseen ja tehtiin pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuuslaskelmat yrityksen

energiankulutustietojen sekä Tuuliatlaksesta kerätyn tuulisuusdatan perusteella. Toimeksiantajan kautta hankittiin tärkeimmät lähtötiedot, jota analysoitiin sekä käsiteltiin laskennallisia työkaluja hyödyksi käyttäen. Yrityksen edellisen vuoden energiankulutustietoja käytettiin lähtötietoina, joiden avulla tehtiin Excel laskurilla pientuulivoimalan mitoituslaskelmaa tutkimuskohteeseen.

Mitoituslaskelmaa varten tarvittiin myös kohteen tuulisuustiedot, jotka selvitettiin Tuuliatlaksen avulla. Kohteessa tehdyt tuulisuusmittaukset olisivat antaneet kaikkein luotettavinta ja laadullista tietoa alueen tuulisuudesta, mutta tässä työssä on jouduttu tyytymään Tuuliatlas sovelluksen tilastoituihin keskimääräisiin tuuliolosuhteisiin tutkimuskohteesta. Sovelluksen antamien tuulisuustietojen ja todellisten tuulisuusolosuhteiden tiedostetaan poikkeavan hieman toisistaan ja siten pienissä määrin heikentävän kerättyjen tuulisuustietojen laadullisuutta. Suomen työ- ja elinkeinoministeriö sekä Ilmatieteen laitos irtaantuvat kaikesta vastuusta ja siitä syntyvistä taloudellisista vaikutuksista, mikäli jokin yritys tai organisaatio aikoo käyttää Tuuliatlaksesta kerättyjä tietoja perusteena omien hankkeiden päätöksenteossa. (Ilmatieteenlaitos 2024.)

Pientuulivoimalan investoinnin kannattavuuslaskelmia varten oli tehtävä sopivan pientuulivoimalan valinta ja selvitettävä lisäksi sen investointikustannukset. Pientuulivoimalan valintaa tehdessä tarvittiin mitoituslaskelmaa varten tuulivoimalan ilmoitettuja tehokäyriä. Tehokäyrän avulla saatiin selvitettyä kyseisen voimalan antotehot eri tuulen nopeuksilla, joiden tietoa tarvittiin tuulivoimalan energiatuotantopotentiaalin selvittämistä varten. Pientuulivoimaloita opinnäytetyöhön valittaessa pyrittiin noudattamaan luvussa 3.1 kerrottuja pientuulivoimalan valinnan laadullisia kriteereitä, jotka noudattavat standardin IEC 61400-2 ohjeita. Tällöin saadaan takuu, että tuulivoimalasta kerrotut tiedot pitävät paikkansa ja ne ovat kaupallisesti testattuja sekä sertifioituja tuulivoimaloita. Tuuliatlaksesta kerättyjen tuulisuustietojen weibull- jakauman avulla selvitettiin tuulisuuden ajat eri tuulennopeuksilla. Pientuulivoimalan antotehon ja tuulisuuksien aikojen avulla laskettiin lopulta voimalan vuosittainen energiantuotanto. Toimeksiantajan energiakulutustietojen ja pientuulivoimalan energiatuotantotietojen avulla tehtiin tarkempi mitoitus tutkimuskohteeseen. Tavoitteena oli mitoittaa pientuulivoimala siten, että sen tuottama energia saataisiin lopulta mahdollisimman

tehokkaasti hyödynnettyä täysmääräisesti suoraan yrityksen energiankulutukseen.

5 Kannattavuuslaskennan toiminnallinen toteutus

Pientuulivoimalan kannattavuuslaskentaa varten tarvitaan lähtötietoja, joiden avulla pystytään tekemään ja perustelemaan laskennalliset tulokset. Lähtötietojen kerääminen vaatii huolellista toteuttamista ja suunnittelua, jotta keskitytään ainoastaan olennaisen tiedon hankintaan. Kerätyt lähtötiedot vaikuttavat suoraan kannattavuuslaskennan tuloksiin, joten tietojen etsintään täytyy käyttää aikaa ja pyrkiä löytämään laadullisesti luotettavia sekä monipuolisia lähteitä.

5.1 Yrityksen energiankulutus

Energiakulutustietojen selvittäminen on välttämätön vaihe pientuulivoimalan mitoittamista ja kannattavuuslaskentaa varten. Vuosittainen energiankulutus ja sen jakautuminen eri aikaväleillä, kuten päivittäisellä tai kuukausittaisella tasolla auttaa selventämään paremmin yrityksen energiantarvetta. Sähköenergian kulutus jo pelkästään kuukausitasolla voi vaihdella suuresti, ja siten pientuulivoimalan sopivaa mitoittamista varten on hyvä tietää mahdollisimman tarkasti energiankulutuksen jakautuminen.

Koivikon Kartano Oy:n sähköenergiankulutus (Taulukko 3) on ollut vuonna 2023 yhteensä 426 583 kWh. Yrityksellä on asennettuna aurinkopaneeleita 100 kW:n nimellistehon verran, ja niiden vuosituotanto on ollut vuoden 2023 aikana vähän vajaat 90 000 kWh. Aurinkopaneelien tuottamasta sähköenergiasta omaan kulutukseen on mennyt yhteensä kyseisenä vuonna noin 66 500 kWh ja sähköverkkoon sitä on myyty vajaat 23 000 kWh. Kun suoraan omaan käyttöön otettu sähköenergia huomioidaan vuosikulutukseen, niin ostosähköä kului siis vuoden 2023 aikana reilut 360 000 kWh.

Pientuulivoimalan kannattavuuslaskenta vaiheessa on käytetty hyödyksi oletusarvona reilun 360 000 kWh vuosittaista sähköenergiakulutuservoa. Laskentavaiheessa ei lähdetä spekuloidaan enempää nykyisen aurinkojärjestelmän mahdollisia energiantuotannon muutoksia tai sen käyttöikä, joilla on vaikutusta vuosittaiseen ostosähkön tarpeeseen. Tämä siitä syystä, että kyseessä on muuttuva tekijä, jonka muutoksiin ei pystytä vaikuttamaan eikä myöskään ennustamaan. Kyseinen arvo vastaa parhaiten nykyistä energiankulutustasoa ja siten todennukaisinta ostosähkön tarvetta yrityksellä tulevina vuosina.

Sähkön vuosikulutus	Aurinkopaneelien tuotanto huomioituna	Ilman aurinkopaneeleita
Tammikuu	36812.61	36976.27
Helmikuu	32117.64	32992.30
Maaliskuu	33892.56	36947.22
Huhtikuu	26312.64	33347.27
Toukokuu	23983.28	33541.70
Kesäkuu	18810.39	31867.80
Heinäkuu	22300.35	33717.05
Elokuu	24963.47	36153.77
Syyskuu	27813.09	34437.00
Lokakuu	31104.75	34420.69
Marraskuu	38195.9	38384.58
Joulukuu	43789.91	43797.82
Yhteensä	360096.59	426583.47

Taulukko 3. Koivikon Kartano Oy:n ostosähkön vuosikulutus.

Toinen asia oli selvittää yritykseltä, kuinka paljon ostosähköstä on maksettu arviolta yhtä kWh kohden. Tätä laskettua ostosähkön hinta-arvoa käytettiin lopulta myös pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmissa. Yrityksellä on pörssisähkösopimus ja sen perusteella laskelmissa on käytetty vuoden 2023 pörssisähkön keskihintaa, joka oli 7,2 c/kWh. Kuvassa 8 on määriteltynä tarkemmin sähkön käytöstä aiheutuvat kustannukset kuten sähköverot ja tehomaksut.

Sähkön käyttö:		
Pörssisähkön hinta (2023)	0.072	€/kWh
Sähkövero vl.1	0.02253	€/kWh
Sähkönsiirtomaksu	0.016585	€/kWh
Talviarkipäivä	0.02565	€/kWh
Muu aika	0.0127	€/kWh
Talviarkipäivien määrä vuodessa	30 %	
Muu aika määrä vuodessa	70 %	
Perusmaksu	103.91	€/kk
	1246.92	€/v
	0.003462738	€/kWh
Tehomaksu	5.58	€/kW
Karkeasti arvioitu kuukausittainen huippiuteho	60	kW
Tehomaksu kuukaudessa	334.8	€/kk
	4017.6	€/v
	0.011157007	€/kWh
Ostosähkön kokonaishinta	0.1257	€/kWh

Kuva 8. Koivikon Kartano Oy:n arvioitu ostosähkön hinta.

5.2 Tuuliatlas

Opinnäytetyössä on hyödynnetty Tuuliatlasta, joka on Suomen tuulisuusolosuhteita kuvastava tuulienergiakartasto. Tämän sovelluksen kerätyn tietokannan avulla pystytään tarkastelemaan tuulen nopeuksia eri puolella Suomea. Tietokanta on kerätty erilaisten sääennustusmallinnusten avulla ja mallinnuksien tuloksia hyödynnetään WAsP-laskentaohjelmistoon. Wind Atlas Analysis and Application Program- ohjelmisto ottaa huomioon monenlaisia tuulisuuteen vaikuttavia tekijöitä kuten esimerkiksi alueen maaston muodot ja rosoisuuden. Tuuliatlaksen kerätty data perustuu siis tietokonemallinnuksen tekemiin laskelmiin, ja niiden antamat tuulisuustulokset ovat ainoastaan suuntaa antavia. Ne eivät anna tarkkaa kuvaa todellisesta tuulisuudesta alueella, ja kaikkein luotettavimmat tulokset saadaan tekemällä pitkän aikavälin tuulisuusmittauksia tutkimuskohteessa. (Suomen Tuuliatlas, 2024).

Sääennustusmallinnuksia on tehty Tuuliatlaksessa 50–400 metrin korkeuksilta. Tutkittavan alueen tuulisuustietoja pystytään analysoimaan ja hyödyntämään

monilla eri tavoin. Tuulisuustietoja pystytään tarkastelemaan Tuuliatlaksessa sekä vuositasolla että myös kuukausitasolla. Kerätystä tuulisuusdatasta löytyy eri korkeuksilta määriteltynä esimerkiksi tuulen keskinopeudet sekä tuuliprofiilin mallintamisessa hyödynnettävät A- ja k-parametrit. Näitä kahta parametriä käytetään tuulen Weibull-jakauman eli todennäköisyysjakauman määrittämisessä. Parametrien arvot vaikuttavat siihen, miten tuulen todennäköisyys jakautuu eri tuulen nopeuksille. (Suomen Tuuliatlas, 2024).

Muotoparametri k arvo vaikuttaa siihen, kuinka paljon tuulisuus vaihtelee alueella. Sen arvo vaihtelee yleisesti 1–3 välillä. Pieni k-parametrin arvo tarkoittaa sitä, että tuulisuuden jakauma on leveä eli tuulen nopeudet vaihtelevat suuremmalla välillä ja tuulisuusolosuhteet alueella ovat hyvin vaihtelevia. Suuri k-parametrin arvo viittaa sen sijaan tasaisempaan ja vakaampaan tuulisuuteen ja tuulennopeudet vaihtelevat tällöin vähemmän alueella. Skaalaparametrin A arvo kertoo sen sijaan tuulennopeuden jakauman keskikohdan eli toisin sanoen tuulen keskinopeuden tarkasteltavalla aikavälillä. (Suomen Tuuliatlas, 2024).

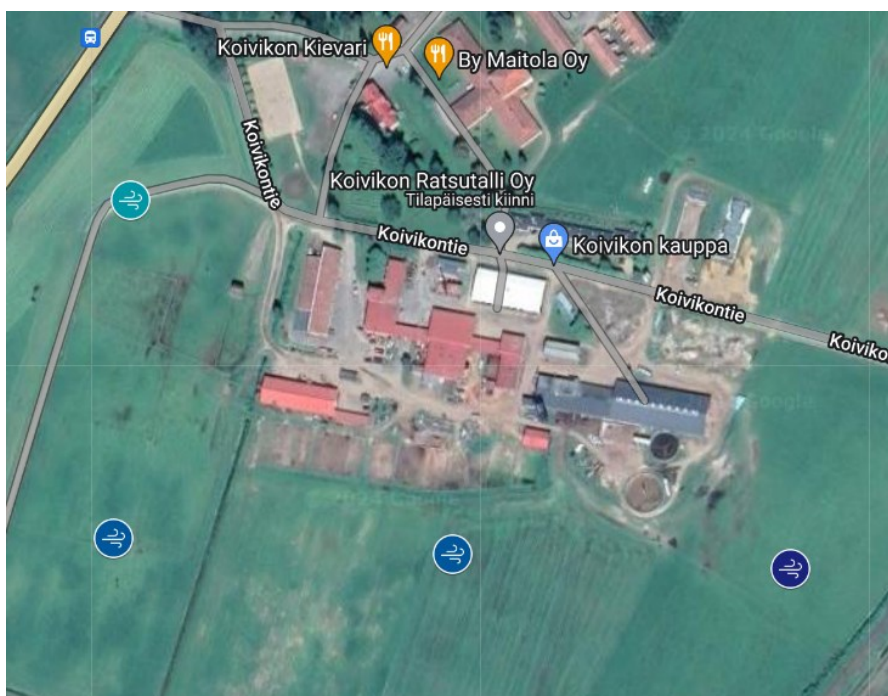
5.2.1 Tuulisuustiedot

Tuulisuustietojen käsitteleminen Tuuliatlaksesta kerätyllä datalla on tämän opinäytetyön vaihtoehtoinen ratkaisu sille, että paikan päällä tehtyjä tuulisuusmittauksia ei olla pystytty tekemään. Tuuliatlaksen tuulisuusdatat antavat riittävän tarkan arvion tutkittavan kohteen keskimääräisestä tuulisuudesta. Sääennustusmallinnuksilla tehdyt ennustetut tuulisuustiedot poikkeavat maston tutkahavainnoista 0,0–0,5 m/s hieman korkeudesta ja kohteesta riippuen. (Suomen Tuuliatlas, 2024.)

Alueen tuulisuustietoja etsittäessä päätettiin valita yrityksen mailta lähtökohtaisesti tutkimuspiste, jossa tuulisuuden vuotuinen tuulen keskinopeus on kaikkein pienin. Tämän valinnan taustalla on halu varmistaa, että tulosten tarkastelussa voitaisiin luottaa siihen, ettei tuulen nopeus alueella olisi suhteessa todellisiin tuulennopeuksiin nähden ainakaan merkittävästi alhaisempi. Kyseisen tutkimuspisteen voidaan olettaa tällöin olevan myös alueen kriittinen alhaisin keskituulen nopeus. Tuulisuustietojen tulosten tarkastelussa on otettu huomioon myös

vaihtoehtoinen tuulen suurin keskinopeus yrityksen maantontilta. Näin on kerätty sekä maksimi- että minimiarvot tuulen keskinopeudelle alueella, ja voidaan karkeasti arvioida tuulen todellisen keskinopeuden olevan näiden raja-arvojen välillä.

Tuulisuustietojen keräysalue on rajattu siten, että tuulisuustietoja on etsitty hyvin pieneltä alueelta ja rajatusti läheltä yrityksen talouskeskusta. Lisäksi on huomioitu tuuliruusun antamat alueen tuulisuuden yleisimmät tulosuunnat, ja tämän perusteella on rajattu yrityksen talouskeskuksen lähialueelta kuvan 9 mukaisesti neljä tutkimuspistettä. Toisin sanoen Tuuliatlaksen tuulisuustietoja on etsitty vain muutaman sadan metrin säteellä talouskeskuksesta, koska alueen länsipuolta rajoittaa maantie ja itäpuolta junaraiteet. Toisena tärkeänä perusteluna tälle ratkaisulle on pientuulivoimalan sähkönsiirtoyhteyksien huomioiminen. Pitkät sähkönsiirtoyhteydet pientuulivoimalan ja sähkön käyttöpaikan välillä lisäävät merkittävästi investointikustannuksia ja aiheuttavat sähkötehon hävikkiä eivätkä siten ole taloudellisesti kannattava ratkaisu yritykselle.



Kuva 9. Satelliittikuva ja suunniteltavien pientuulivoimaloiden arvioidut sijoituspaikat yrityksen talouskeskuksen alueelta (Google Maps 2024).

Valittujen hilaruutujen joukosta pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmiin on kerätty tuulisuusdatat aluksi ainoastaan heikoimmasta vuosittaisesta keskituulen

nopeudesta ilmoitetusta koordinaattipisteestä. Vuoden keskituulen nopeus on pienin kuvan 9 vasemman ylänurkan koordinaattipisteessä, jossa tuulen keskimääräinen nopeus vuoden aikana on 50 metrin korkeudessa 5,1 m/s Tuuliatlaksen perusteella. Tästä tutkimuspisteestä on otettu jokaisen kuukauden tuulisuusdatat Excel-tiedostoon ja tarkasteltu sen antamaa dataa. Pientuulivoimalan energiatuotantolaskuissa ei varsinaisesti tehdä mitään tuulen vuosittaisella tai kuukausikohtaisella keskinopeudella. Tarkasteltavana kohteena on Weibull-jakauman skaala- ja muotoparametrien arvot. Näiden arvojen avulla on selvitetty kuukausikohtainen tuulen todennäköisyysjakauma eri tuulen nopeuksille ja sen kautta tarkasteltavan pientuulivoimalan kuukausikohtainen energiatuotanto.

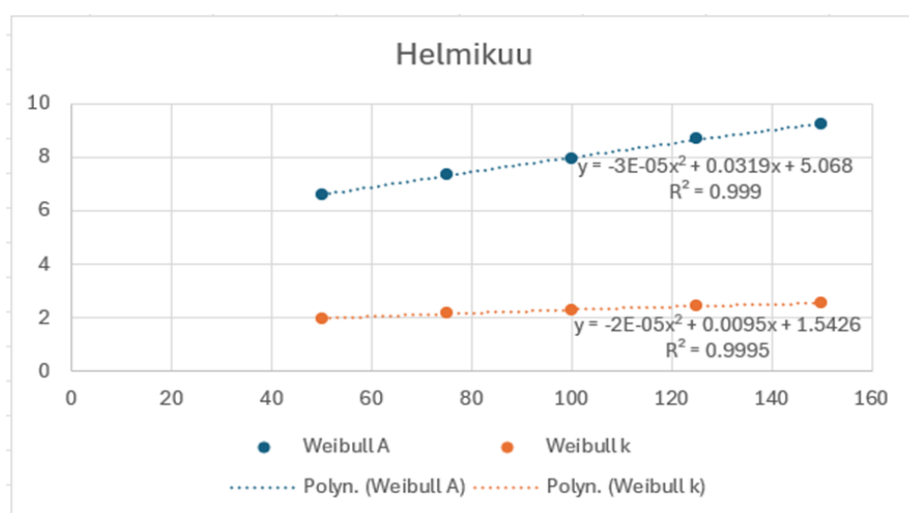
250 x 250 neliömetrin hilakoossa on ilmoitettuna taulukon 4 mukaisesti tuulen keskinopeudet ja Weibull-jakaumat 50–150 metrin väliltä aina 25 metrin korkeuseroilla mitattuina. Ongelmana Weibull-jakauman laskuissa on tuulisuustietojen puuttuminen alle 50 metrin korkeuksista. Opinnäytetyössä valittujen pientuulivoimaloiden maston korkeudet ovat ainoastaan 36 tai 30 metrin korkuiset ja Weibull-jakauman parametrien arvot täytyy suhteuttaa näihin korkeuksiin nähdessä.

Tiedot valituista pisteistä kaudelta: helmikuu, solun koko 250 m							
Wgs lat	Wgs lon	V (m/s)	Korkeus (m)	Weibull A	Weibull k	Tuulivoimalan tuotto 3 MW	Tuulen energiasisältö
62.08184	29.94924	8.2	150	9.26	2.541	849	536
62.08184	29.94924	7.7	125	8.68	2.436	748	455
62.08184	29.94924	7	100	7.95	2.295	625	367
62.08184	29.94924	6.5	75	7.35	2.154	530	307
62.08184	29.94924	5.8	50	6.59	1.967	424	244
			36	6.1775	1.859		
			30	5.998	1.81		

Taulukko 4. Tuuliatlaksen tuulisuusdata 250 x 250 m² hilakoosta (Suomen Tuuliatlas 2024).

Opinnäytetyön pientuulivoimalan energiatuotannon selvittämiseksi kuukausikohtaisella tasolla on tarvittu muoto- ja skaalaparametrien tarkat arvot juuri halutulta korkeudelta. Tällaisen tuulen todennäköisyysjakauman tarkkaan selvittämiseen ei ole olemassa mitään suoranaista kaavaa. Työssä on käytetty olemassa olevaa dataa ja laskettu toisen asteen polynomifunktion kaavojen avulla (kuva 10) Weibull-jakauman parametrien arvot 36 ja 30 metrin korkeuksilta (taulukko 4). Funktion muuttujana x on mitattava korkeus, joka syötettynä kaavaan antaa

parametrille arvon halutusta korkeudesta. Kaavan tilastollinen mittari R^2 määrittää, kuinka suurella todennäköisyydellä muuttujan x muuttuminen voidaan selittää tämän toisen asteen polynomifunktion avulla. Yksinkertaistettuna se selittää todennäköisyyden muuttujan x parametrien arvoille. Todennäköisyys kuvan x funktioissa on erittäin hyvä ja laskettujen kuukausikohtaisten parametrien arvojen virhemarginaali laskuissa on ainoastaan keskimäärin noin 0,5 %. Tuulen todennäköisyysjakauman parametrien täydellisen tarkka selvittäminen ei ole mahdollista ja laskettujen parametrien arvojen tilastolliseen luotettavuuteen pitää suhtautua opinnäytetyössä tehdyissä laskuissa kriittisesti. Tulokset ovat ainoastaan suuntaa antavia ja niihin liittyy epävarmuustekijöitä, joihin ei pystytä täysin vaikuttamaan.

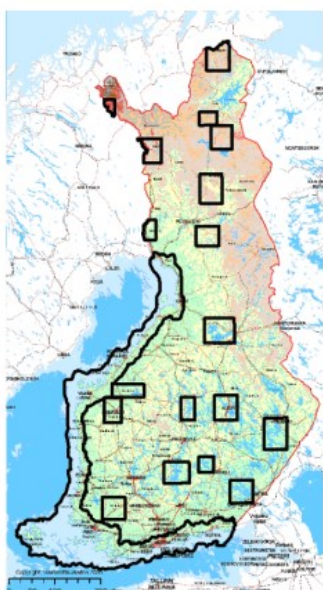


Kuva 10. Weibull-jakauman parametrien määrittäminen toisen asteen polynomifunktion avulla.

Tuuliatlaksessa hyödynnettävissä tuulisuustiedoissa on huomioitavia asioita, jotka vaikuttavat opinnäytetyön Excel-laskuissa tehtäviin pientuulivoimalan arviointeihin energiantuotannon arvoihin. Yhtenä ongelmana Tuuliatlaksen käytössä on määritettyjen tuulisuusdatojen hilakoot. Tuuliatlaksessa hilakoko tietylle alueelle voi olla ainoastaan laskettuna 250 x 250 neliömetrin kokoisena tai 2,5 x 2,5 neliökilometrin kokoisena alueena. Hilakoon 250 x 250 neliometriä tuulisuusdatat ovat määriteltynä Suomen kartalla kuvan 11 mukaisesti ainoastaan tietyillä alueilla. Hilakoko 2,5 x 2,5 neliökilometriä on sen sijaan määriteltynä tuulisuusdatana koko Suomen kartan alueelta. Säämallinnohjelmistojen arviot perustuvat jokaisessa tutkitussa hilakoossa ainoastaan kyseisen hilaruudun

arvioilta tehtyyn keskimääräiseen rosoisuuteen ja maaston muotoihin. Näiden keskimääräisten rosoisuusparametrien avulla lasketaan lopulta kyseisten hilakojen muodostaman alueen tuulisuusdatat aiemmin mainitun WAsP-ohjelmiston avulla. (Suomen tuuliatlas, 2024).

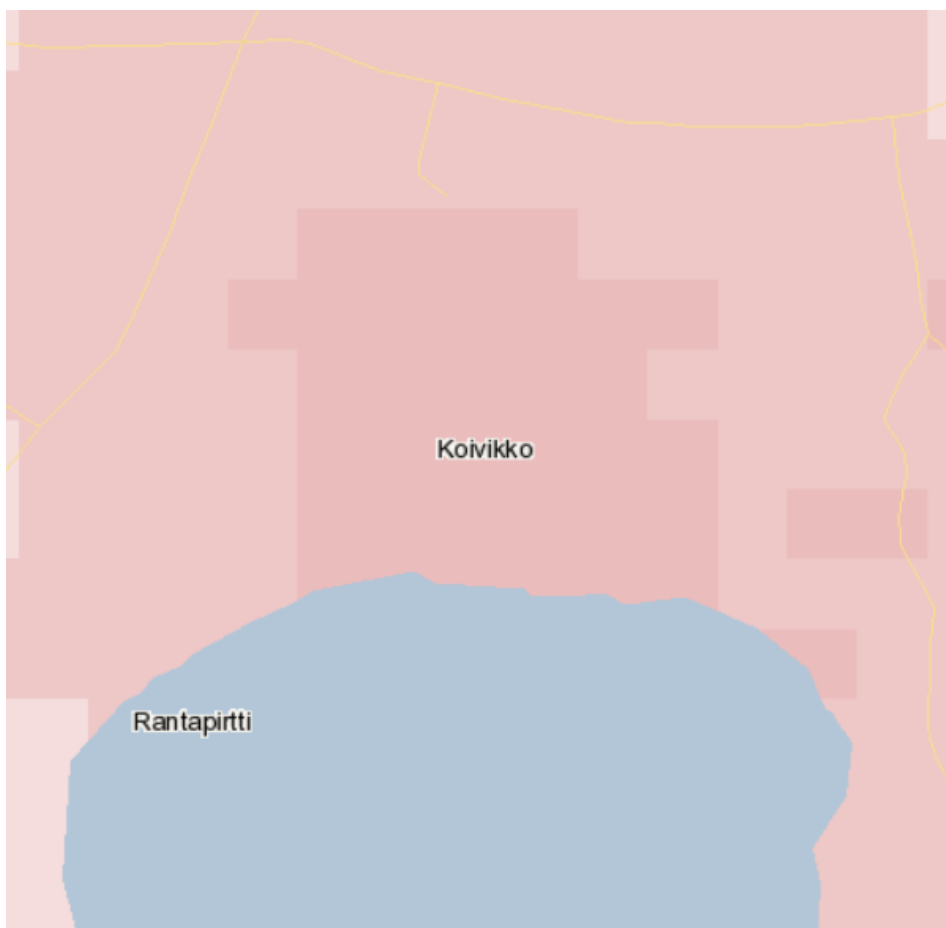
Ongelmana hilakoon määrittämisessä on se, että kun halutaan selvittää valitun alueen tuulisuusdataa, laskettu data perustuu koko hilakoon keskimääräiseen rosoisuuteen eikä halutun tarkasti määritetyn koordinaatin rosoisuuteen. Maaston muodot ja rosoisuusparametrit voivat vaihdella hyvin paljon lyhyelläkin matkavälillä, jolloin tuulisuusdatan luotettavuus pienissä määrin heikkenee.



Kuva 11. 250 x 250 neliömetrin hilakoolla määritetyt alueet Tuuliatlaksessa. (Suomen tuuliatlas, 2024).

Opinnäytetyön merkittävyyden arvioimisen kannalta on erittäin suuri hyöty siitä, että kohteesta löytyy tuulisuusdatat tarkemmassa 250 x 250 neliömetrin hilakoossa (kuva 12). Tämän hilakoon etuna on se, että voidaan rajata haluttu alue, johon pientuulivoimalan sijoittamista voitaisiin suunnitella pienemmälle tarkasteltavalle alueelle. Tällöin säämallinnusohjelmistojen tekemät keskiarvolliset rosoisuusparametrit ja maaston topografisten muotojen arvot eivät poikkea myöskään läheskään niin paljon todellisista arvoista. Tämän pienemmän hilakoon toisena merkittävänä hyötynä on sen tuulisuusdatan parametrien suurempi tarkuus. Tässä hilakoossa muoto- ja skaalaparametrien arvot ilmoitetaan

tarkemmin jopa kolmen desimaalin tarkkuudella. Se on erittäin tärkeää siitä syystä, että parametrien pienilläkin muutoksilla on merkittäviä vaikutuksia tuulen Weibull-jakaumaan ja siltä osin myös laskettuihin energiantuotantoarvoihin. Ongelmana isomman hilakoon 2,5 x 2,5 neliökilometriä käytössä on se, että kaikki parametrien arvot ovat ilmoitettuna ainoastaan yhden desimaalin tarkkuudella, jolloin tuulisuustuloksien luotettavuudet kärsivät myös merkittävästi.

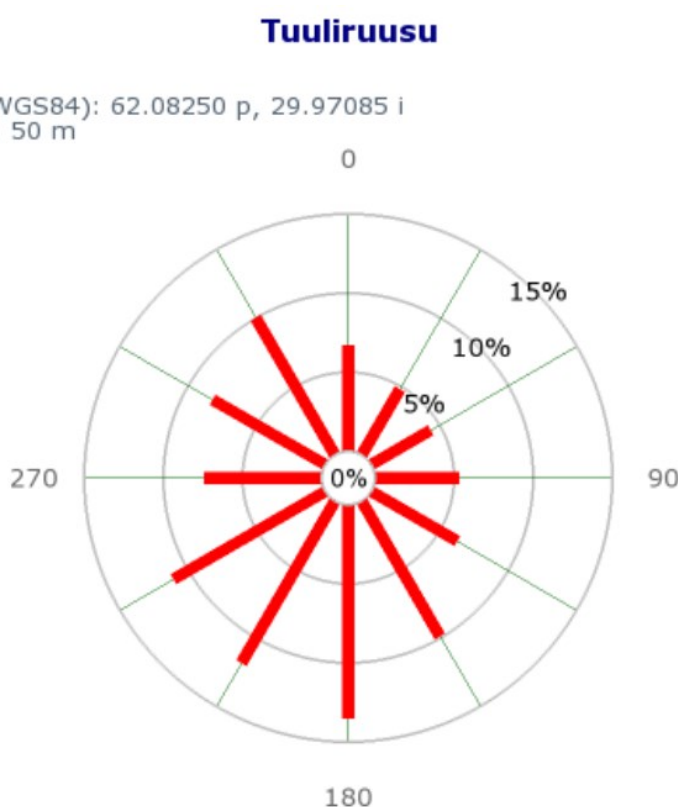


Kuva 12. Tuuliatlaksen 250 x 250 m² hilakoon tuulisuus tutkimuskohteessa. Tummempi väri kartalla viittaa suurempaan vuosittaiseen tuulen keskinopeuteen. (Suomen Tuuliatlas 2024.)

5.2.2 Tuuliruusu

Sijoittamispaikan suunnittelulla voidaan edesauttaa sekä parantaa energiantuotantoa, ja tuuliruusu on yksi hyvä apuväline tämän suunnittelussa. Tuuliruusu (kuva 13) on graafinen kuvaaja, jossa näkyy valitun koordinaattipisteen tuulen

yleisimmät tulosuunnat. Tuuliatlaksessa tuuliruusu on jaoteltuna kahteentoista tuulen suunnan sektoriin. Jokaisessa sektorissa on palkki, joka näyttää tuulen suunnan frekvenssin eli tuulen vuotuisen prosentuaalisen toistuvuuden kyseisestä ilmansuunnasta. Eli mitä suurempi on tuulen suunnan frekvenssi, sitä suuremman ajan vuodesta kyseisestä ilmansuunnasta tuulee. (Suomen Tuuliatlas, 2024).



Kuva 13. Tuuliruusun kuvaaja. (Suomen Tuuliatlas, 2024).

Tuuliruusun tuulen suunnan arvioimisessa on myös ongelmia. Tuuliatlaksen tuuliruusua pystyy käyttämään ainoastaan 2,5 x 2,5 neliökilometrin hilakoossa. Tästä syystä valitun hilakoon todelliset tuulen suunnan frekvenssit vertaillaessa suunniteltavan pientuulivoimalan sijaintiin nähden ovat koordinaateiltaan jossain määrin erilaiset. Karkeasti arvioidut pientuulivoimalan sijoituspaikat (kuva 9), perustuvat kuvan 13 tuuliruusun kuvaajan frekvenssin jakautumiseen. Eniten tuulee toimeksiantajan talousalueella etelän ja lounaan ilmansuunnista, kun taas kaikkein vähiten tuulee pohjoisen ja idän välisellä sektorilla. Alueen rakennuksilla ja muilla esteillä on vaikutusta tuulen vapaaseen liikkumiseen. Pientuulivoimala kannattaisi lähtökohtaisesti sijoittaa mahdollisimman aukealle alueelle,

jossa tuulella on vapaa liikkuvuus, ja se on riittävän korkealla suhteessa lähellä oleviin rakennuksiin sekä muihin esteisiin.

5.3 Pientuulivoimalan valinta


Toimeksiantajan yrityksen vuosittainen energiankulutus on niin suurta, ettei pelkästään pientuulivoimalan energiantuotannolla pystytä täysimääräisesti kattamaan yrityksen energiantarvetta. Yrityksen sijaintialueen vuoden keskituulen nopeus 50 metrin korkeudella kuvan 9 valituissa hilaruuduissa oli 5,1–5,4 m/s. Kun pientuulivoimalan maston korkeudet ovat 30–36 metriä, tuulen vuosittainen keskinopeus alueella pientuulivoimalan korkeudessa on noin 5 m/s. Tällaisilla tuulen nopeuksilla ei pysty pientuulivoimalalla tuottamaan millään reilua 360 000 kWh vuosittaista energiantarvetta.

Pientuulivoimalan valintaa tehdessä tärkeimpänä kriteerinä oli sen taloudellinen kannattavuus. Tarkoituksena oli löytää mahdollisimman tehokas pientuulivoimala, jonka investointikustannukset suhteessa energiantuotantoon ovat parhaimmat. Pientuulivoimaloiden valinnassa keskityttiin 10–60 kW:n nimellisteholla toimiviin voimaloihin, jotka täyttävät yleisesti määritellyn pientuulivoimalan käsitteen. Suositeltavaa oli myös löytää lähtökohtaisesti pientuulivoimala, joka on suunniteltu ja testattu kansainvälisesti hyväksytyjen standardien mukaisesti, jotta voitaisiin luottaa tuotteen laadukkuuteen ja toimintavarmuuteen.

Sopivan pientuulivoimalan löytäminen osoittautui lopulta yllättävän vaikeaksi tehtäväksi, sillä monilla yritysten nettisivuilla ei ollut suoria hintatietoja voimaloista. Useimmiten niistä puuttui myös vaadittavat tiedot kuten tuulivoimalan antotehot, jotka ovat välttämättömät energiantuotannon laskemista varten. Ainoa keino haluttujen pientuulivoimaloiden löytämiseksi oli kysellä suoraan niitä valmistavilta yrityksiltä hintatarjouksia tuotteista. Etsinnän ja kyselyiden jälkeen lopulta saatiin kattavat hintatarjoukset sekä laitteiden tarkat tarvittavat tekniset tiedot Aeolos Wind Turbine -nimiseltä pientuulivoimalayritykseltä. Aeolos markkinoi itseään maailman johtavana pientuulivoimaloiden valmistajana. Tämä

kansainvälisesti tunnettu yritys on perustettu Tanskassa vuonna 1986, ja se on toimittanut pientuulivoimaloita jo yli 60 eri maahan ympäri maapalloa.

Aeolokselta saatiin kattavat tiedot 10 kW, 20 kW, 30 kW, 50 kW ja 60 kW nimellistehollisista vaaka-akselisista pientuulivoimaloista. Kuvassa 14 näkyy 60 kW nimellistehollisen pientuulivoimalan turbiinin ja siihen tarvittavien komponenttien hinta Yhdysvaltojen dollareissa. Maston hinnat olivat vielä tarjouksissa erikseen eriteltynä. Toivottavaa olisi ollut saada pientuulivoimaloiden hintatarjouksia ja niiden tarvittavia teknisiä tietoja useimmilta yrityksiltä, mutta näiden tietojen pohjalta pystyttiin tekemään jo kannattavuuslaskelmat ja vertailemaan eri kokoisten voimaloiden kannattavuutta sekä energiantuotantoa.

Photo	AEOLOS-H 60kW (Off-Grid)	Unit Price
	60kW Wind Turbine	USD 75600
	Off-Grid Controller	USD 8600
	Pitch Control System	USD 6770
	Off-Grid Inverter	USD 18150
	Total	USD 109120

Kuva 14. Aeolos-H 60 kW pientuulivoimalaturbiinin ja komponenttien hinta. Ilmoitetut arvot muutettu euroiksi kannattavuuslaskuissa suhteella 1 USD=0,94 €, joka on ollut rahayksikköjen kurssi saatujen tarjousten aikaan keväällä 2024. (Aeolos 2024.)

6 Tulokset ja yhteenveto

6.1 Pientuulivoimaloiden energiantuotanto

Energiantuotannon laskemiseksi oli ensin selvitettävä pientuulivoimalan antotehot eri tuulen nopeuksilla. Antotehot (taulukko 5) ovat ilmoitettuna suoraan laitteen teknisissä tiedoissa ja ne kertovat, kuinka paljon voimala pystyy tuottamaan sähköenergiaa tietyssä tuulennopeudessa. Laskelmissa on käytetty esimerkkinä Aeoloksen 60 kW nimellistehollista tuulivoimalaa.

Wind Speed(m/s)	Power Coefficient	Power Output(kW)
3.0	0.13	0.83
3.5	0.14	1.37
4.0	0.21	3.12
4.5	0.29	5.93
5.0	0.34	9.70
5.5	0.38	14.24
6.0	0.40	19.53
6.5	0.41	25.70
7.0	0.42	32.88
7.5	0.42	40.44
8.0	0.41	47.91
8.5	0.40	55.75
9.0	0.36	59.56

Taulukko 5. Esimerkki 60 kW pientuulivoimalan antotehoista eri tuulen nopeuksilla. (Aeolos 2024)

Lisäksi oli selvitettävä tuulen Weibull-jakauman muoto- ja skaalaparametrien arvot halutusta korkeudesta tutkittavassa hilaruudussa. Tutkittavana hilaruutuna oli kuvan 9 koordinaattipiste, jossa vuoden keskituulen nopeus oli heikointa, noin 4,83 m/s 36 metrin korkeudessa. Pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmissa haluttiin selvittää energiantuotanto ensin kuukausitasolla, jotta voitiin vertailla tuotetun energian vaihtelua eri kuukausina. Taulukossa 6 on esimerkki helmikuun lasketusta energiantuotannosta 60 kW:n ja 36 metrin mastolla olevalle voimalalle. Weibull-jakauman parametrien avulla on saatu laskettua tuulen prosentuaalinen jakauma eri tuulen nopeuksille kuukauden aikana. Tätä tietoa hyödyksi käyttäen on laskettu tuulisuuden aika eri tuulen nopeuksille kertomalla Weibull-jakauman prosentuaalinen osuus kuukauden kokonaistunneilla. Lopulta energiantuotanto on saatu laskettua kertomalla tuulisuuden aika ja voimalan antoteho keskenään.

Helmikuu			Helmikuun tunnit	672	Voimalan tornin korkeus	36 m
Tuulen keskinopeus (m/s)	a	K				
5.4934	6.178	1.859				
Tuulen nopeus (m/s)	Weibull-jakauma	Tuulisuuden aika (h/a)	Energian tuotanto (kWh)	Antoteho (kW)	Tuulen teho roottorin alalta (kW)	Hyötysuhde
0	0.00 %	0.0	0.0	0	0.0	0.0 %
0.5	1.72 %	11.6	0.0	0	0.0	0.0 %
1	3.04 %	20.5	0.0	0	0.2	0.0 %
1.5	4.15 %	27.9	0.0	0	0.8	0.0 %
2	5.05 %	33.9	0.0	0	1.9	0.0 %
2.5	5.74 %	38.6	0.0	0	3.7	0.0 %
3	6.23 %	41.9	34.8	0.83	6.5	12.9 %
3.5	6.52 %	43.8	60.0	1.37	10.3	13.4 %
4	6.63 %	44.6	139.1	3.12	15.3	20.4 %
4.5	6.58 %	44.2	262.2	5.93	21.8	27.2 %
5	6.39 %	42.9	416.4	9.7	29.9	32.5 %
5.5	6.08 %	40.9	582.1	14.24	39.8	35.8 %
6	5.69 %	38.2	746.7	19.53	51.6	37.8 %
6.5	5.24 %	35.2	904.2	25.7	65.7	39.1 %
7	4.74 %	31.9	1048.1	32.88	82.0	40.1 %
7.5	4.24 %	28.5	1150.9	40.44	100.9	40.1 %
8	3.73 %	25.1	1200.5	47.91	122.4	39.1 %
8.5	3.24 %	21.8	1213.4	55.75	146.8	38.0 %
9	2.78 %	18.7	1111.6	59.56	174.3	34.2 %
9.5	2.35 %	15.8	941.3	59.56	205.0	29.1 %
10	1.97 %	13.2	787.3	59.56	239.1	24.9 %
10.5	1.63 %	10.9	650.8	59.56	276.8	21.5 %
11	1.33 %	8.9	531.7	59.56	318.3	18.7 %
11.5	1.07 %	7.2	429.4	59.56	363.7	16.4 %
12	0.86 %	5.8	343.0	59.56	413.2	14.4 %
12.5	0.68 %	4.5	271.0	59.56	467.0	12.8 %
13	0.53 %	3.6	211.8	59.56	525.3	11.3 %
13.5	0.41 %	2.7	163.7	59.56	588.3	10.1 %
14	0.31 %	2.1	125.3	59.56	656.1	9.1 %
14.5	0.24 %	1.6	94.8	59.56	729.0	8.2 %
15	0.18 %	1.2	71.1	59.56	807.0	7.4 %
15.5	0.13 %	0.9	52.7	59.56	890.5	6.7 %
16	0.10 %	0.6	38.7	59.56	979.4	6.1 %
			13582.5			

Taulukko 6. Helmikuun energiantuotanto 60 kW pientuulivoimalla.

Laskelmat suoritettiin kaikille kuukausille erikseen, että saatiin vertailtua kuukausikohtaista energiantuotantoa. Taulukossa 7 näkyy esimerkkinä 60 kW nimellistehollisen tuulivoimalan laskennallinen energiantuotannon määrä eri kuukausina. Kuukausikohtaiset energiantuotannon vaihtelut ovat suuria ja sopivan pientuulivoimalan mitoittamisessa tällaiset tiedot ovat erittäin tärkeitä.

Pientuulivoimalan 60 kW (torni 36 m) vuosituotanto	Energiantuotanto (kWh)
Tammikuu	17241.29
Helmikuu	13582.50
Maaliskuu	12366.07
Huhtikuu	9418.58
Toukokuu	9971.77
Kesäkuu	7941.04
Heinäkuu	7367.04
Elokuu	6662.49
Syyskuu	10634.20
Lokakuu	13284.27
Marraskuu	15170.90
Joulukuu	13042.74
Yhteensä	136682.89

Taulukko 7. Kuukausikohtainen energiantuotanto 60 kW pientuulivoimalalle.

6.2 Investoinnin kannattavuuslaskelmat

Aeolos-yritykseltä saaduissa pientuulivoimaloiden hinnoissa ei ole huomioitu asennus- ja toimituskuluja. Pientuulivoimaloiden vuosittaisista huoltokustannuksista ei myöskään ole suoraa tietoa. Siksi pientuulivoimaloiden kannattavuuteen vaikuttavien muuttuvien kustannusten arvioimiseen on käytetty alan asiantuntijoiden näkemyksiä.

Pientuulivoimasta on tehty eräs kattava tutkimusraportti, joka on Euroopan tuuli-voima-akatemian pienten tuulivoimaloiden teknisen komitean tukema tutkimus. Tutkimusraporttiin on kerätty eri puolilta maailmaa olevien asiantuntijoiden näkemyksiä sekä käyttäjien kokemuksia pientuulivoimaloiden nykytilanteesta ja sen teknologian haasteista. Taulukossa 8 on esitetty pientuulivoimaloiden kustannusrakenteen jakautuminen. Tutkimusraportissa on myös huomioitu, että tietoja pientuulivoimaloiden kokonaisasennuskustannuksista on erittäin vaikea löytää. (Bianchini ym. 2022.)

Cost Factor	Impact [% of Global Cost]
Purchase	76%
Building material	7%
Labor	2%
Engineering	1%
Land purchase	10%
Grid connection	2%
Transportation	2%

Taulukko 8. Pientuulivoimalaprojektien kustannusrakenne. (Bianchini ym. 2022.)

Taulukossa 9 on esimerkki Eunice Energy Group -yrityksen 60 kW pientuulivoimalan komponenttien kustannusten erittelystä. Pelkästään voimalan suunnittelukustannuksiin voi mennä arviolta noin 15 000 €. Suunnittelukustannuksiin kuuluu tuuliolosuhteiden ja paikan arvioinnit, joiden avulla lasketaan kohteen odotettava vuotuinen energiantuotanto. Sen sijaan maanrakennuskustannusten

hinnat vaihtelevat projektin mukaan kuitenkin hyvin paljon, ja siihen vaikuttavat esimerkiksi kohteen maaston muodot, tiet, perustukset ja tarvittavat kaivuutyöt. Esimerkiksi Eunice Energy Groupin rakentaman 60 kW:n pientuulivoimalan perustusten kustannusrakenne on jakautunut saatujen tietojen perusteella 23 % kaivuutöihin, 61 % tarvittavaan betoniin ja 16 % maanrakennustöihin. Nämä tiedot ovat ainoastaan suuntaa antavia eikä näitä tietoja voi suoraan verrata todellisiin pientuulivoimalan kustannusrakenteen arvioihin. (Bianchini ym. 2022.)

	Cost	% of the total
Tower	≈7 k€/ton (≈7 k\$/ton)	18%
Generator	≈13 k€/ton (≈15 k\$/ton) (permanent magnets)	21%
Gearbox (1:20)	8-10,000 € (9-11,500 \$)	5%
AC-DC-AC converter	0.23 €/W (0.265 \$/W)	7%
Blades	20 €/kg (23 \$/kg)	4%
Rest of machinery	12 €/kg (14 \$/kg)	5%
Rest of materials	13-15 €/kg (15-17 \$/kg)	15%
Labour cost and standard industrial profit	-	25%

Taulukko 9. Eunice Energy Group -yrityksen 60 kW pientuulivoimalan kustannusten erittely. (Bianchini ym. 2022.)

Huoltokustannukset ovat muuttuva tekijä, joiden tarkkaa hintaa ei voida määrittää, mutta ne voidaan arvioida tutkimusdatan perusteella. Pientuulivoimaloiden toiminta- ja ylläpitokustannuksiin vaikuttaa monet tekijät, kuten asiantuntevien asentajien hinnat ja heidän matkakulunsa, varaosat sekä niiden saatavuus ja korjausten monimutkaisuus. Yleensä on suositeltavaa tehdä pientuulivoimaloille vähintään kerran vuodessa tarkempi suunniteltu vuosihoito. Benchmarking U.S. Small Wind Costs -raportissa on koottuna suunniteltujen pientuulivoimalan huoltojen keskimääräiset kustannukset. Raportin mukaan suunniteltu pientuulivoimalan huolto maksaa vuodessa noin 32 € per asennettu kW (€/kW). Pienten tuulivoimaloiden ylläpito- ja toimintakustannukset vuositasolla ovat keskimäärin tutkimusraportissa kerättyjen lähteiden perusteella noin 1–3 % alkuperäisestä voimalan investointihinnasta. (Bianchini ym. 2022.)

Kun pientuulivoimalan investointihinnat, muuttuvat kustannukset ja vuosittaiset energiantuotantomäärät oli laskettu, päästiin tekemään varsinaista kannattavuuslaskelmaa. Kuvassa 15 näkyy esimerkki 60 kW pientuulivoimalalle tehdyn kannattavuuslaskelman lähtöarvoista, joita hyödynnettiin investoinnin nykyarvolaskelmassa. Investointihinnassa on eriteltynä pientuulivoimalan turbiinin hinnat tarvittavine komponentteineen, tornin hinta sekä asennus- ja toimituskulut. Karkeasti arvioituna kannattavuuslaskelmissa asennus- ja toimituskulujen hintana on käytetty 15 % kokonaisinvestoinnista ja vuosittaisena huoltokustannuksena 2 % kokonaisinvestoinnista. Nämä tiedot perustuvat taulukoissa 8 ja 9 ilmoitettuihin tietoihin sekä Euroopan tuulivoima-akatemian aiemmin mainittuun tutkimusraporttiin. Tuulivoimalan suunnittelukustannuksia ei ole huomioitu kannattavuuslaskelmissa, vaan ne on korvattu Tuuliatlaksella lasketun tuulisuusdatan avulla. Mikäli työn toimeksiantaja tulevaisuudessa lähtee tekemään pientuulivoimalainvestointia talousalueelle, suositeltavaa olisi kuitenkin tehdä suunnittelutyötä vähintään alueen tuulisuusmittauksilla, sillä pelkästään Tuuliatlaksesta saatavaan tuulisuusdataan ei investoinnissa kannata tukeutua.

<u>Investointikustannus:</u>		
60 kW:n tuuliturbiini		102573 €
36 metrinen torni		34658 €
Asennukset ja toimituskulut (karkea arvio) investoinnista		15 %
Tämä sisältää mm. kaivuutyöt, betoniperustukset jne.		20584.59 €
Kokonaiskustannus		157815 €
Huoltokustannusten vuosittainen		2 %
kustannus arviolta kokonaisinvestoinnista		3156.3 €
Tuulivoimalan tuotettu energia vuodessa		136682.89 kWh/a

Kuva 15. 60 kW pientuulivoimalan investoinnin lähtötiedot.

Pientuulivoimalan investoinnin kannattavuuslaskelmissa (taulukko 10) on käytetty laskentakorkokantana 3 %. Korkokanta perustuu tähänhetkiseen euriborin 12 kk keskimääräiseen korkoon, joka on investointilaskelmien aikaan syyskuussa 2024 ollut noin 2,9–3,1 (Suomenpankki 2024). Yrityksille myönnettävissä investointilainoissa käytetään useimmiten viitekorkona juuri kyseistä 12 kk euriborkorkoa. Kannattavuuslaskelmissa vuoden nettotuotto on laskettu kulutetun ostosähkön (kuva 8) ja pientuulivoimalan vuosittaisen energiantuotannon

(taulukko 7) avulla. Aeoloksen pientuulivoimaloiden arvioituna käyttöikä pidetään 20 vuotta, jolloin myös nykyarvolaskelmassa käytetään 20 vuoden ajanjaksoa.

Nykyarvolaskelma diskonttauskaavalla			
		Lähtötiedot	
	Laskentakorkokanta	3 %	
	Investointiaika (vuotta)	20	
			Nykyarvo
vuodet	Investointikustannus	157 815 €	157 815 €
1	1. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	13 621 €
2	2. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	13 224 €
3	3. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	12 839 €
4	4. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	12 465 €
5	5. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	12 102 €
6	6. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	11 749 €
7	7. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	11 407 €
8	8. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	11 075 €
9	9. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	10 752 €
10	10. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	10 439 €
11	11. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	10 135 €
12	12. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	9 840 €
13	13. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	9 553 €
14	14. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	9 275 €
15	15. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	9 005 €
16	16. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	8 743 €
17	17. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	8 488 €
18	18. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	8 241 €
19	19. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	8 001 €
20	20. vuoden nettotuotto	14 029,485 €	7 768 €
	yhteensä		208 723 €
	Jäännösarvo	- €	- €
	Tuottojen nykyarvo		208 723 €
	Kustannusten nykyarvo		157 815 €
	Erotus		50 908 €

Taulukko 10. Pientuulivoimainvestoinnin kannattavuus nykyarvolaskelmalla.

Nykyarvolaskelma diskonttauskaavalla on hyvä tapa lähteä arvioimaan investoinnin kannattavuutta. Tämä kaava ottaa huomioon ajan arvon sekä kustannusten kertymisen ajan myötä. Kaavassa tulevia kassavirtoja alennetaan nykyhetken arvoon käyttämällä diskonttauskerrointa. (Kansainvälinen arviointistandardineuvosto 2012.)

6.3 Tulosten herkkyyshanalyysi

Pientuulivoimalan kannattavuuslaskelmiin ja niiden todenmukaisuuteen vaikuttaa useita muuttuvia tekijöitä kuten sähköenergian muutokset, tuulisuuden vuosittaiset vaihtelut tai vuosittaiset huoltokustannukset. Näihin tekijöihin ei pystytä suoranaisesti vaikuttamaan, mutta työssä halutaan vertailla erilaisten muuttuvien tekijöiden vaikutusta pientuulivoimalainvestoinnin lopulliseen kannattavuuteen. Tulosten herkkyyshanalyysissä on käytetty tutkimuskohteen hilaruutujen koko vuoden keskiarvollisia muoto- ja skaalaparametrien arvoja ja selvitetty tuulen todennäköisyysjakauman parametrien arvot 36 ja 30 metrin korkeuksilta. Koko vuoden keskiarvollista Weibull-jakauman A- ja k-parametrien arvoja on käytetty kannattavuuslaskelmissa, koska pientuulivoimalan vuoden kokonaisenergiatuotanto ei laskelmissa olennaisesti poikkea kuukausitasolla eritellystä tuloksesta (taulukko 7). Lisäksi käsiteltävän datan määrä olisi ollut valtava, mikäli jokaisesta neljästä tutkimuspisteestä olisi eritelty kuukausikohtaisella tasolla A- ja k-parametrien arvot eri korkeuksilta sekä laskettu erikseen jokaisen kuukauden Weibull-jakaumat ja energiantuotannot.

Alla olevassa taulukossa 11 on vertailtuna, kuinka paljon kuukausikohtaisesti laskettu energiantuotanto poikkeaa koko vuoden lasketusta energiantuotannosta. Lähes 3 % poikkeavuus koko vuoden energiantuotannossa selittyy sillä, että kuukausikohtaisesti eriteltynä saadaan tarkemmat A- ja k-parametrien arvot joka kuukaudelta erikseen, jolloin lasketun tuloksen luotettavuus ja tarkkuus paranee. Koko vuoden laskettujen muoto- ja skaalaparametrien arvot ovat kuitenkin riittävän tarkkoja suhteessa kuukausitasolla laskettuihin tuloksiin ja niiden avulla lasketut tulosten herkkyyshanalyysit antavat tärkeää tietoa muuttuvien tekijöiden vaikutuksesta pientuulivoimalan investoinnin kannattavuuteen.

Laskettu hilaruudusta jossa keskituulen nopeus 5,1 m/s 50 metrissä, HUOM! Energiantuotantoarvot laskettu 36 metrin korkeudesta, jossa vuoden keskituulen nopeus on 4,83 m/s		
Energiatuotanto vuodessa kuukausitasolla eriteltynä	136683	kWh
Energiatuotanto vuodessa	132732	kWh
Prosentuaalinen ero	2.977	%

Taulukko 11. Kuukausikohtaisesti eritelty ja koko vuoden energiantuotanto weibull-jakauman parametrejä hyödyksi käyttäen.

Taulukossa 12 on vertailtu tuulisuuden vaikutusta investoinnin kannattavuuteen. Siinä ovat valittuina 4 hilaruutua, jotka ovat perusteltuna kappaleessa 5.2.1 tarkemmin. Näihin hilaruudun pisteisiin tehtiin laskelmat 60 kW pientuulivoimalan energiantuotannosta, jonka torni on 36 metriä korkea. Saatujen tulosten avulla vertailtiin tuulisuuden vaikutusta energiantuotantoon ja siten investoinnin kannattavuuteen taloudellisesti sekä pientuulivoimalan takaisinmaksuaikaa.

Pientuulivoimalan nimellisteho	60 kW	60 kW	60 kW	60 kW
Korkeus (m)	36	36	36	36
Vuoden keskituulen nopeus 50 metrissä (m/s)	5.1	5.2	5.3	5.4
Vuoden keskituulen nopeus 36 metrissä (m/s)	4.830	4.925	5.020	5.115
Investointihinta (€)	157815	157815	157815	157815
Energiantuotanto vuodessa (kWh)	132732	137097	147319	159906
Voitollinen tuotto 20 vuoden aikana (€)	43517.2511	51682.35	70804.5	94349
Korollinen takaisinmaksuaika (vuotta)	14.06	13.46	12.24	10.99

Taulukko 12. Tuulisuuden vaikutus investoinnin kannattavuuteen.

Tuulisuuden pienillä muutoksilla on jo hyvin suuret vaikutukset pientuulivoimalan kannattavuuteen. Tuulen vuosittaisen keskinopeuden kasvaessa pelkästään 0,3 m/s saadaan vähennettyä pientuulivoimalainvestoinnin takaisinmaksuaikaa yli 3 vuodella. Voitollinen tuottomäärä kasvaa lisäksi samana 20 vuoden tarkastelujaksolla reilut 50 000 €.

Eri kokoluokan pientuulivoimaloille tehtiin myös vertailua ja laskettiin niiden energiantuotantoa, investointihintaa, taloudellista tuotto-odotusta sekä niiden takaisinmaksuaikaa laskentakorko huomioiden. Taulukossa 13 on vertailtu 20–60 kW nimellistehollisia pientuulivoimaloita, joita Aeoloksen yritys valmistaa. Laskelmissa on käytetty Aeolokselta saatujen pientuulivoimaloiden hintatarjouksia sekä samoja laskennallisia parametrejä, joita taulukon 10 esimerkin kannattavuuslaskelmassa on käytetty.

Pientuulivoimalan nimellisteho	60 kW	60 kW	50 kW	30 kW	20 kW
Korkeus (m)	36	30	30	30	30
Energiantuotanto vuodessa (kWh)	132732	123936	93584	68936	45588
Investointihinta (€)	157815	151189	107862	77529	72578
Voitollinen tuotto 20 vuoden aikana (€)	43517.25108	35662.42	35102.86	28353.73	-8895.76
Korollinen takaisinmaksuaika (vuotta)	14.06	14.55	13.49	13.05	20.96

Taulukko 13. Eri kokoluokan pientuulivoimaloiden vertailua.

Pientuulivoimaloiden kannattavuuslaskelmien vertailussa takaisinmaksuajat ovat melko samat lukuun ottamatta 20 kW pientuulivoimalaa. 60 kW pientuulivoimala 36 metrin mastolla on tuotto-odotuksiltaan 20 vuoden tarkastelujaksolla paras investointi yksittäiselle voimalalle. Huomioitavaa laskelmissa on, että 30 kW pientuulivoimalan energiatuotantomäärä suhteessa investointihintaan on kaikkein parhain ja takaisinmaksu hieman lyhyempi kuin muut vertailut voimalat. On kuitenkin vaikea arvioida, olisiko esimerkiksi kaksi 30 kW pientuulivoimalaa pitkällä aikavälillä parempi investointi kuin yksi 60 kW voimala. Prosentuaalinen hyöty taloudellisesti tai pientuulivoimalan energiantuotannossa on melko minimaalinen ja investoinnin lopulliseen hintaan vaikuttaa aivan tapauskohtaisesti erilaiset asennus- ja huoltokustannukset.

Lopuksi on tarkasteltu investointitukien vaikutusta pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuuteen. Taulukon 14 ylemmässä osiossa on arvioidun tuulivoimalan sijoituspaikka Koivikon kartanon talouskeskuksen lähialueen heikoimmasta tuulisuuspisteestä, jossa keskituulen nopeus on Tuuliatlaksen lasketun tuulisuustiedon perusteella 36 metrin korkeudessa taulukon 12 mukaisesti 4,83 m/s. Alemmassa taulukon 14 osiossa sen sijaan on tutkimuspiste, jossa on tuulisuustiedon perusteella suurin vuoden keskiarvoinen tuulisuus talouskeskuksen alueella, noin 5,11 m/s.

Pientuulivoimalan nimellisteho	60 kW	60 kW
Korkeus (m)	36	36
Energiantuotanto vuodessa (kWh)	132732	132732
Saatu investointituki	40 %	30 %
Investointihinta (€)	94689	110471
Voitollinen tuotto 20 vuoden aikana (€)	106643	90861.81
Korollinen takaisinmaksuaika (vuotta)	7.97	9.49
Pientuulivoimalan nimellisteho	60 kW	60 kW
Korkeus (m)	36	36
Energiantuotanto vuodessa (kWh)	159906	159906
Saatu investointituki	40 %	30 %
Investointihinta (€)	94689	110471
Voitollinen tuotto 20 vuoden aikana (€)	157475	141693.5
Korollinen takaisinmaksuaika (vuotta)	6.13	7.34

Taulukko 14. Investointitukien vaikutus pientuulivoimalainvestoinnin taloudelliseen kannattavuuteen ja takaisinmaksuaikaan.

Taulukko 14 osoittaa, kuinka merkittävästi investointituki vaikuttaa pientuulivoimalan voitolliseen tuottoon ja takaisinmaksuaikaan 20 vuoden ajanjaksolla.

Mikäli pientuulivoimalainvestoinnille myönnetään Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen myöntämä 40 % maatalouden investointituki, jo heikommassa tuulisuuspisteessä investoinnin korollinen takaisinmaksuaika saadaan lähes puolitettua, ja sähköenergian taloudelliset säästöt kasvavat melkein 2,5-kertaisesti 20 vuoden aikana. Myös mahdollisesti saatava 30 % maaseuturahoitustuki lyhentäisi pientuulivoimalainvestoinnin takaisinmaksuaikaa noin kolmanneksen ja voitollinen tuotto yli kaksinkertaistuisi. Mikäli pientuulivoimala sijoitettaisiin sen sijaan talouskeskuksen lähialueen tuulisimpaan kohtaan, niin investoinnin korollinen takaisinmaksuaika lyhenisi samojen investointitukien mukaan vielä noin 2 vuotta verrattuna heikompaan tuulisuuspisteeseen. Erityisesti sijoituspaikan valinta vaikuttaa vielä enemmän taloudellisesti, sillä pientuulivoimalan investoinnin taloudellinen säästö sähköenergian kulutuksessa 20 vuoden tarkastelujaksolla suhteessa heikompaan tuulisuuspisteeseen vertailtuna kasvaisi reilun 50 000 € verran.

6.4 Tulosten yhteenveto

Tärkeimpinä tekijöinä pientuulivoimalan valintaan vaikuttavat lopulta yrityksen omat halut ja tarpeet, eli se kuinka paljon pientuulivoimalaan ollaan valmiita investoimaan ja minkä verran sillä halutaan tuottaa energiaa suhteessa tämänhetkiseen energiankulutukseen. Tärkeimpänä huomiona lasketuista tuloksista voidaan pitää investointitukien merkitystä pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuuteen. Tulosten perusteella voitaisiin tehdä johtopäätös, että pientuulivoimalainvestointi ei ole taloudellisesti kovinkaan kannattavaa, mikäli pientuulivoimalalle ei myönnetä investointitukia. Saatujen tulosten mukaan pientuulivoimalan takaisinmaksuaika ilman tukia on arviolta jopa noin 13–14 vuotta, joka alkaa olemaan jo melko pitkä takaisinmaksuaika investoinnille. Saadun investointituen avulla pientuulivoimalan takaisinmaksuaika jopa puolittuu ja taloudellinen säästö moninkertaistuu, mikä tekee investoinnista jo ehdottomasti hyvin kannattavan. Teoriassa pientuulivoimalainvestointi olisi kannattava sijoitus myös ilman investointitukia, mutta pitkä takaisinmaksuaika sekä iso taloudellinen investointi pientuulivoimalaan yhdistettynä itsestä riippumattomiin muuttuviin tekijöihin tekee investoinnista hyvin epävarman ja riskialttiin sijoituksen.

Työn toimeksiantajan yritykselle järkevimpänä investointina pitäisin koko kokonaisuus arvioituna 60 kW pientuulivoimalaa. Tällaisella yksittäisellä voimalalla on suurin voitollinen tuotto-odotus suhteessa muihin verrattuihin pientuulivoimaloihin, ja sen energiatuotantomäärät vuositasolla ovat kaikkein suurimmat. Tämän kokoluokan pientuulivoimala ei ole myöskään vielä mitoittamisen näkökulmasta ongelmatekijä. Pientuulivoimala halutaan mitoittaa siten, että sähköenergia tulee suoraan yrityksen omaan käyttöön eikä ylijäämä sähköntuotantoa tulisi juuri ollenkaan. Koska yrityksen energiankulutus on moninkertainen verrattuna 60 kW:n pientuulivoimalan tuottamaan energiaan, ei ole suurta riskiä ylijäämä-sähköntuotannolle. Oletuksena on, että lähes kaikki tuotettu sähköenergia käytettäisiin suoraan yrityksen energiankulutuksen tarpeisiin vuoden aikana. Lisäksi tällaisen suuremman yksittäisen pientuulivoimalan toiminnan ylläpito ja hallinnointi on helpompaa kuin monen pienemmän tuulivoimalan. Mahdollisten käyttökatkojen määrä on silloin oletetusti vähäisempää ja toiminnan ylläpitäminen helpottuu sekä yksinkertaistuu.

Opinnäytetyössä lasketut tulokset ja tehdyt tulosten herkkyyksianalyysit osoittavat kuinka pienetkin muutokset tuulisuudessa, sijoittamispaikassa tai voimalan korkeudessa vaikuttavat merkittävästi pientuulivoimalan energiantuotantoon ja taloudelliseen kannattavuuteen toimeksiantajan talousalueella. Pelkästään lähialueen onnistuneella sijoittamispaikan valinnalla pystyttäisiin lisäämään voimalan vuosittaista energiantuotantoa lähes 30 000 kWh ja lyhentämään sen korollista takaisinmaksuaikaa monella vuodella.

7 Pohdinta

Lähtökohtaisesti tämä opinnäytetyö on tehty hyödyntämään toimeksiantajaa päätöksenteossa pientuulivoimalan rakentamiselle. Kuitenkin opinnäytetyössä koottua tietoa pystyy hyödyntämään myös monet muut pienyritykset ja ihmiset, jotka ovat kiinnostuneita pientuulivoimalan investoinnista omalle yritykselle. Tämä opinnäytetyö tarjoaa kattavaa tietoa tuulivoimaloiden tekniikasta ja

energiantuotannosta sekä pientuulivoimalainvestoinnin hankintakustannuksista ja kulurakenteesta.

Työssä tehdyt kannattavuuslaskelmat antavat luotettavan arvion pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuudesta ja kustannuksista. Laskelmissa käytetyt tiedot ja menetelmät perustuvat laajaan asiantuntevaan tietoperustaan ja ovat hyvin perusteltavissa pientuulivoimaloiden investoinnin nykyhetkiseen kustannusrakenteeseen. Laskelmien tulokset osoittavat, että investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat merkittävästi monet muuttuvat tekijät. Vaikka alueen tuulisuuteen, sähköenergian hintoihin ja pientuulivoimaloiden kustannusrakenteeseen ei voi suoraan itse vaikuttaa, tarkasti suunnitellulla mitoittamisella ja sijoittamispaikan valinnalla on erittäin suuri vaikutus pientuulivoimalainvestoinnin kannattavuuteen.

Työn tavoitteena oli tarkastella pientuulivoimalan investoinnin taloudellista kannattavuutta toimeksiantajan yritykselle. Työssä tehdyt laskelmat osoittivat, että pientuulivoimalan kokoluokan kasvaessa investoinnin taloudellinen kannattavuus paranee. Tämän perusteella toimeksiantajalle suositeltaisiin investoinniksi Aeoloksen tarjoamaa 60 kW:n pientuulivoimalaa. Toimeksiantajalla on entuudestaan nimellisteholtaan 100 kW:n aurinkosähköjärjestelmä, joka tuotti vuoden 2023 aikana vajaat 90 000 kWh sähköenergiaa. Pientuulivoimalan rakentaminen aurinkosähköjärjestelmän rinnalle parantaisi omavaraisuutta tarjoamalla taseisempaa ympärivuotista uusiutuvan energian tuotantoa yritykselle. Aurinkovoima tuottaa energiaa eniten kesäkuukausien aikana, kun taas tuulivoima toimii tehokkaampana energialähteenä talvikuukausien aikana. Tällainen hybridijärjestelmä vähentäisi tarvetta ostosähkölle ja taloudelliset säästöt energiankulutuksessa lisääntyisivät merkittävästi pitkällä aikavälillä tarkasteltuna.

Työssä tehdyistä laskelmista saadut tulokset osoittivat, että pientuulivoimalan investointi olisi erityisen kannattavaa yritykselle, mikäli investoinnille myönnetään ELY:n maatalouden- tai maaseuturahoituksen investointitukia. Saatavien tukien avulla toimeksiantajan pientuulivoimalainvestointi tulisi maksamaan itsensä takaisin lopullisesta voimalan sijoituspaikasta ja saatavien investointitukien määrästä riippuen noin 6–9,5 vuoden aikana. Tarkkaa tietoa

pientuulivoimalan takaisinmaksuajasta on vaikea arvioida, koska siihen liittyy monia muuttuvia tekijöitä kuten tuulisuuden vaihtelut ja sähköenergian hinnan muutokset, joihin ei pystytä vaikuttamaan. Lisäksi tutkimuskohteen alueen tuulisuustiedot ovat laskelmissa perusteltuina laskennallisesti kerättyyn Tuuliatlaksen tuulisuusdataan, ja tuulen todennäköisyysjakaumien selvittämiseksi on täytynyt soveltaa funktionaalisia kaavoja. Tällaiset soveltavasti määritetyt tuulisuudet tutkimuskohteesta heikentävät joltain osin laskettujen tulosten luotettavuutta. Tulokset ovat kuitenkin hyvin suuntaa antavia sekä riittävän tarkkoja ja niiden todenmukaisuutta suhteessa oikeisiin tuulisuusarvoihin ei uskota suurissa määrin poikkeavan todellisista arvoista.

Mikäli työn toimeksiantaja haluaa tulevaisuudessa investoida pientuulivoimalaan, opinnäytetyön jatkokehitysmahdollisuutena voisi esimerkiksi tarkastella työn tutkimuksellisia sekä laskennallisia päätelmiä suhteessa käytännössä toimivaan pientuulivoimalaan. Myös pientuulivoimalan investoinnin vertailua muihin energialähteisiin voitaisiin tehdä kyseisen opinnäytetyön tulosten perusteella, ja pohtia eri energiantuotantomuotojen kannattavuutta erilaisista näkökulmista tarkasteltuna.

Tämän opinnäytetyön luotettavuutta tarkasteltiin kriittisesti, varmistettiin lähteiden aitous sekä luotettavuus ja toimittiin hyvän tieteellisen käytännön periaatteiden mukaisesti. Kerätyn tiedon luotettavuutta pyrittiin vahvistamaan monipuolistamalla lähteiden määrää. Dataa kerättiin useammasta lähteestä sekä pyrittiin löytämään laadullisesti merkittäviä lähteitä opinnäytetyölle. Työssä kerätyt tiedot ja tehtyjen laskelmien tulokset pohjautuvat ainoastaan kerättyyn tietoperustaan ja niiden todenmukaisuuteen täytyy suhtautua varauksella. Opinnäytetyössä käsiteltiin toimeksiantajalta saatuja tietoja, joita hyödynnettiin tutkimuksen eettisiä periaatteita noudattaen. Kerättyä dataa hyödynnettiin ainoastaan osana hyvän tutkimuksellisen opinnäytetyön tavoitteiden saavuttamista, ja toimeksiantajan yksityisyydensuojaa sekä muita oikeudellisia periaatteita noudatettiin työssä erittäin tarkasti ja luottamuksellisesti.

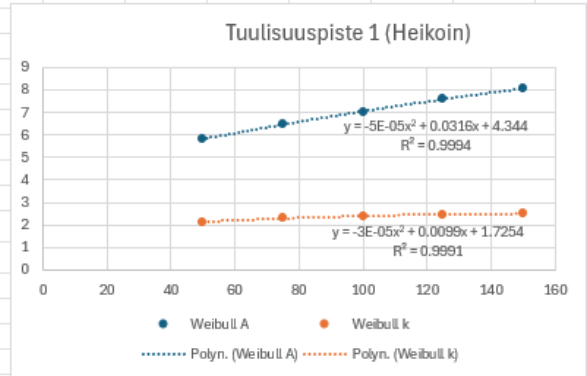
Lähteet

- ABB. 2011. Wind power plants. <https://library.e.abb.com/public/92faf0c1913f5651c1257937002f88e8/1SDC007112G0201.pdf>. 25.2.2024.
- Bianchini, A ym. 2022. Current status and grand challenges for small wind turbine technology. <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2022-34/wes-2022-34-ATC2.pdf>. 5.5.2024
- Bortolotti, P ym. 2021. Challenges, opportunities, and a research roadmap for downwind wind turbines. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.2676>. 12.3.2024.
- Das, A ym. 2017. Vertical axis and horizontal axis wind turbine- A comprehensive review. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8389937>. 20.3.2024.
- Digma Avoin oppimisympäristö. 2018. Tuulivoimatekniikan perusteita (osa 1). YouTube-video. <https://www.youtube.com/watch?v=KFtvLF-dym64&t=244s>. 4.3.2024.
- Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 2024. Tuulivoiman yleisopas. Motiva. https://www.motiva.fi/files/19414/Tuulivoiman_yleisopas.pdf. 27.2.2024.
- Finnwind. 2024. FAQ Pientuulivoimala. <https://finnwind.fi/pientuulivoimala/>. 19.3.2023.
- Google. 2024. Google Maps <https://www.google.fi/maps>. 24.4.2024.
- Ilmatieteen laitos. 2010. Suomen Tuuliatlas yhteenvetraportti. https://expo.fmi.fi/aqes/public/Tuuliatlas_yhteenvetraportti.pdf. 26.4.2024.
- Ilmatieteen laitos. 2024. Suomen tuuliatlas - tuulitiedot Suomen kartalla. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliatlas>. 23.3.2024.
- Ilmatieteen laitos. 2024. Suomen Tuuliatlas. <http://tuuliatlas.fmi.fi/>. 25.4.2024.
- Industrial Technology Research Institute. 2018. Pienten tuulivoimaloiden esittely ja kehityssuunta. <https://www.re.org.tw/knowledge/more.aspx?cid=201&id=1790>. 7.5.2024.
- Karimirad, M. 2012. Comprehensive Renewable Energy. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gyroscopic-load>. 16.3.2024
- Kim, M-G. & Dalhoff, P.H. 2014. Yaw Systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and design methods. IOPscience. [Yaw Systems for wind turbines Overview of concepts.pdf](https://www.iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/12/1/012001). 15.3.2024.
- Korpela, A. 2016. Tuulivoima perusteet. Tampere: Tammertekniikka.
- Kumar Saini, M. 2022. Difference between Horizontal Axis and Vertical Axis Wind Turbines. Tutorialspoint. <https://www.tutorialspoint.com/difference-between-horizontal-axis-and-vertical-axis-wind-turbines>. 19.3.2023.

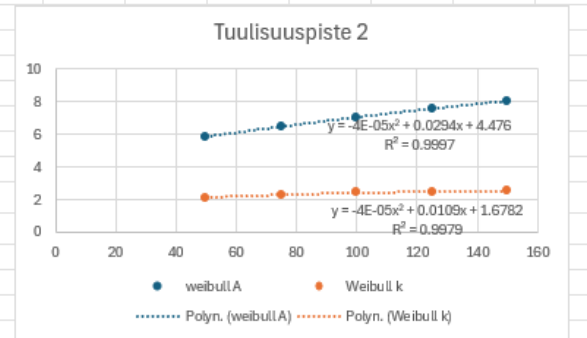
- Liikennevirasto. 2012. Ohje tuulivoimalan rakentamisesta liikenneväylien läheisyyteen. https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121757/lo_2012-08_978-952-255-130-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 27.2.2024.
- Parkkari, M & Perkkiö, T. 2011. Opas oman pientuulivoimalan hankintaan. <https://docplayer.fi/672073-Opas-oman-pientuulivoimalan-hankintaan.html>. 3.5.2024
- Ravinteet ja energia käyttöön. 2021. Pientuulivoimawebinaari. Youtube-video. <https://www.youtube.com/watch?v=ExWMtccic5g>. 25.2.2024.
- Rhoads-Weaver, H ym. 2024. Small Wind Turbine Purchasing Guide – Off-grid, Residential, Farm & Small Business Applications. CanWEA. https://web.archive.org/web/20150908075837/http://www.ontario-sea.org/Storage/39/3065_Small_Wind_Turbine_Purchasing_Guide_-_Off-grid,_Residential,_Farm_&_Small_Business_Applications.pdf. 12.3.2024.
- Ruokavirasto. 2024. Maatalouden investointituet. <https://www.ruokavirasto.fi/tuet/maatalous/investoinnit/maatalouden-investointituet/#3.-maatilojen-energiainvestoinnit>. 19.5.2024.
- Ryse Energy. 2024. 10kW wind turbines. <https://www.ryse.energy/10kw-wind-turbines/>. 4.3.2024.
- Samnytt. 2023. Tuulivoima – pelastus vai tuho? Youtube-video. <https://www.youtube.com/watch?v=7II7hnF6zbU>. 19.2.2024.
- Suomen Tuulivoimayhdistys. 2024. Mitä tuuli on. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tieto-tuulivoimasta-2/tieto-tuulivoimasta/mita-tuuli-on-2/mita-tuuli-on>. 23.2.2024.
- Thomson Reuters. 2024. Euribor rates, daily values. https://www.suomenpankki.fi/en/Statistics/interest-rates/charts/korot_kuviot/euriborkorot_pv_chrt_en/. 6.5.2024.
- Thoubboron, K. 2023. Home wind turbines: Overview, products and costs. <https://www.energysage.com/about-clean-energy/wind/small-wind-turbines-overview/>. 3.5.2024.
- Viitanen, K & Falkenbach, H. 2014. Tekninen ohje 1 Kassavirtalaskelmat. <https://www.skayry.fi/wp-content/uploads/2018/02/Tekninen-ohje-1-Kassavirtalaskelma.pdf>. 8.5.2024
- Wang, H ym. 2023. Small wind turbines and their potential for internet of things applications. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004223017510>. 26.4.2024.
- Wikipedia. 2023. Yaw system. https://en.wikipedia.org/wiki/Yaw_system. 15.3.2024.
- WINDEXchange. 2024. Small Wind Guidebook. <https://windexchange.energy.gov/small-wind-guidebook.pdf>. 2.4.2024.

Tutkimuskohteen valitut tuulisuuspisteet, osa 1

Koordinaatit	Keski v	Korkeus (r)	Weibull A	Weibull k	
62.0818	29.9492	7.2	150	8.06	2.51
62.0818	29.9492	6.7	125	7.59	2.467
62.0818	29.9492	6.2	100	7.02	2.404
62.0818	29.9492	5.7	75	6.49	2.295
62.0818	29.9492	5.1	50	5.8	2.139
			36	5.4168	2.0429
			30	5.247	1.9954

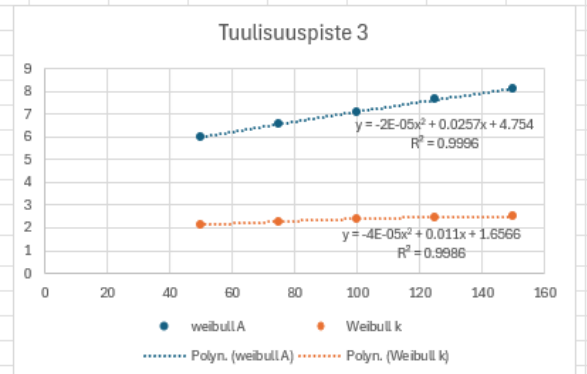


Koordinaatit	Keski v	korkeus	weibull A	Weibull k	
62.0796	29.949	7.1	150	8.06	2.518
62.0796	29.949	6.7	125	7.59	2.475
62.0796	29.949	6.2	100	7.03	2.416
62.0796	29.949	5.8	75	6.49	2.303
62.0796	29.949	5.2	50	5.85	2.131
			36	5.4826	2.0188
			30	5.322	1.9692



Tutkimuskohteen valitut tuulisuuspisteet, osa 2

Koordinaatit	Keski v	korkeus	weibull A	Weibull k	
62.0795	29.9538	7.2	150	8.11	2.51
62.0795	29.9538	6.8	125	7.64	2.467
62.0795	29.9538	6.3	100	7.08	2.404
62.0795	29.9538	5.8	75	6.57	2.287
62.0795	29.9538	5.3	50	5.98	2.115
			36	5.6533	2.0008
			30	5.507	1.9506



Koordinaatit	Keski v	korkeus	weibull A	Weibull k	
62.0794	29.9586	7.2	150	8.14	2.51
62.0794	29.9586	6.8	125	7.66	2.467
62.0794	29.9586	6.3	100	7.1	2.404
62.0794	29.9586	5.9	75	6.65	2.287
62.0794	29.9586	5.4	50	6.14	2.107
			36	5.8722	1.9912
			30	5.7564	1.9386

