



Pystyakselinen pientuulivoimala valaisinpylvään päällä

Antti Niiranen

OPINNÄYTETYÖ
Lokakuu 2020

Sähkö- ja automaatiotekniikka
Älykkäät koneet

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Älykkäät koneet

NIIRANEN, ANTTI:

Pystyakselinen pientuulivoimala valaisinpylvään päällä

Opinnäytetyö 48 sivua
Marraskuu 2020

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko taloudellisesti kannattavaa asentaa pientuulivoimaloita pylväsvalaisimien päälle. Opinnäytetyö käsittelee tuulivoiman teoriaa, Suomen tuulisuutta, sopivia asennuspaikkoja tuulivoimalle sekä pientuulivoimalan kannattavuutta. Menetelmänä käytettiin teoriapohjaista tutkimusta, jonka tukena hyödynnettiin Tuuliatlas-karttaliittymää tuulisuuden selvittämiseen tarkastelupaikoissa.

Tutkimuksessa ilmeni, että Suomessa ei tuule tarpeeksi maan pinnan läheisyydessä ja pientuulivoimalan hinta on liian kallis. Ongelmana on myös, että tuulesta saadun energian ja valaisinpylvään valon tarpeen ajoitukset eivät aina kohtaa, jolloin joudutaan käyttämään kallista akkua. Akku on kallis, mutta useamman pientuulivoimalan lisääminen systeemiin pienentää kokonaistakaisinmaksuaikaa verrattuna yksittäisen tuulivoimalan takaisinmaksu-aikaan ilman akkua.

Opinnäytetyössä kehitettiin tapa, jolla pientuulivoimalalle voidaan etsiä sopivia sijoituspaikkoja, ja tuotettiin laskentamalli, jolla voidaan laskea pystyakselinen pientuulivoimalan kannattavuus, kun asennuspaikan keskituulisuus tiedetään. Kannattavuutta mitataan takaisinmaksuvuosina.

Tuloksista kävi ilmi, että pystyakselinen pientuulivoimala asennettuna valaisinpylvään päälle ei ole taloudellisesti kannattava Suomessa. Parhaat paikat valaisinpylväiden päälle asennetuille tuulivoimaloille olisivat mahdollisimman korkealla paikalla, meren tai muun aukean läheisyydessä. Opinnäytetyön esittelemien esimerkkipaikkojen tuulisuutta voisi mitata jatkotyönä ja tarkistaa, kuinka tarkka tutkimuksen tuottama laskentamalli on.

Asiasanat: pientuulivoimala, valaisinpylväs, pystyakselinen tuulivoimala, tuuliatlas

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Intelligent Machinery

NIIRANEN, ANTTI:
Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine on Top of Streetlight

Bachelor's thesis pages 48
November 2020

The goal of this thesis was to find out, if it is economically profitable to install a small-scale wind turbine on top of streetlights. The thesis examines the theory of wind power, wind conditions in Finland, suitable installation places for small wind turbines and the cost-effectiveness of these turbines. The method in thesis was theory-based-research, supported by the Tuuliatlas map-interface to consider suitable turbine locations.

The research indicated that wind speeds near ground level in Finland are not high enough, which makes small-scale wind turbines too expensive. Energy taken from wind does not always match the power requirement of the streetlight. To fix this problem, a battery must be added in the system, which raises initial costs. Batteries are expensive but adding more turbines to charge up the battery decreases the payback time of the system when compared to the payback time of a single-turbine system without a battery.

A method was developed in this thesis that can be used to find suitable places for small-scale vertical axis wind turbines. A calculation model was developed to calculate the cost-effectiveness of a small-scale vertical axis wind turbine when the one year's average wind is known. Cost-effectiveness is shown in payback years.

The results show that a small-scale vertical axis wind turbine installed on top of a streetlight is not profitable in Finland. The ideal place for installation was found to be high from the ground and near sea coast or open areas. The windspeeds in the example installation places presented in the thesis could be measured in a follow-up research to verify the accuracy of the calculation model.

Key words: small-scale windgenerator, streetlight, vertical axis wind turbine, tuuliatlas

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TUULIVOIMAN TEORIAA.....	8
	2.1 Nykyaikaiset tuulivoimalat.....	8
	2.1.1 Tuulen teho	9
	2.1.2 Tuulivoimala	10
	2.2 Pientuulivoimala	11
	2.2.1 Vaaka-akselinen tuulivoimala	12
	2.2.2 Pystyakselinen tuulivoimala.....	12
3	SOPIVAT PAIKAT TUULIVOIMAN RAKENTAMISELLE	14
	3.1 Yleisesti.....	14
	3.2 Tuulivoima merellä	15
	3.3 Tuulivoima maalla	15
	3.4 Pientuulivoima kaupungissa.....	17
4	RISTEYSALUE TUULIVOIMALLE	18
	4.1 Risteyksen sähkötarve	18
	4.2 Risteyksen tuulusuus	19
	4.3 Valaisinpylväiden rakenne	22
5	TARVITTAVAT KOMPONENTIT TUULIVOIMALLE	23
	5.1 Siivekkeet.....	23
	5.2 Sähkökomponentit	23
6	LASKENTAMALLI.....	26
	6.1 Pystyakselisen hyötysuhde	26
	6.2 Weibull	27
	6.3 Excelin laskentapa	29
7	KANNATTAVUUSLASKELMA.....	31
	7.1 Käyttökohde 230 V AC-valaisin.....	31
	7.2 Käyttökohde kymmenen 230 V AC-valaisinta akulla	32
	7.3 Kannattava pystyakselinen tuulivoimala.....	34
	7.3.1 Pystyakselinen ilman akkia	34
	7.3.2 Pystyakselinen akun kanssa	35
8	KOHDETARKASTELU.....	37
9	TULOKSET	42
10	POHDINTA	43
	LÄHTEET.....	45

LYHENTEET JA TERMIT

akku	energian välivarasto
Betz:n laki	tuulen energian hyödyntämisen teoreettinen maksimi
invertteri	muuntaa sähkön jännitetasoa ja tasa- tai vaihtojännitettä
kulutuskohte	energiaa käyttävä laite
lataussäädin	säätölee tuotetun energian siirtoa ja toimii samalla suo- jalaitteena
luminanssi	pinnalla olevan valon määrä, joka ilmoitetaan kandela per neliömetri (cd/m^2)
napakorkeus	tuulivoimalan lapojen navan korkeus maanpinnasta
pientuulivoimala	alle 50 kW nimellistehon tuulivoimala
pysty akselinen tuulivoimala	tuulivoimala, jonka roottori on pystysuunnassa
syöttötariffi	Suomen valtion rahallinen tuki uusiutuvalle energian- tuotolle
takaisinmaksuaika	jonkin taloudellisesti tuottavan laitteen aika, jolloin se synnyttää oman hintansa verran tuottoa
turbulenssi	virtauksen nopea nopeuden ja suunnan muutos ajan suhteen
tuulensola	leveän tuulireitin kaventuma, joka aiheuttaa tuulen no- peuden kasvun
Tuuliatlas	karttasovellus, jolla voi tarkastella Suomen tuulisuutta
vaaka-akselinen tuulivoimala	tuulivoimala, jonka roottori on vaakasuunnassa
Weibull	matemaattinen tuulen nopeuksien jakauma
P	tuotettu teho (W)
ρ	ilman tiheys (kg/m^3)
A	kohtisuora pinta-ala ilmavirtaukselle (m^2)
V	tuulen nopeus (m/s)

P_{max}	tuulivoimalan tuoton teoreettinen maksimi
W_{m15}	tarkastelupaikan tuulisuus 15 metrin korkeudessa (m/s)
$\frac{W_{m100}}{h_{100}}$	tarkastelupaikan tuulen nopeuden suhde 100 metriä (1/s)
$\frac{W_{r15}}{h_{15}}$	referenssipaikan tuulen nopeuden suhde 15 metriä (1/s)
$\frac{W_{r100}}{h_{100}}$	referenssipaikan tuulen nopeuden suhde 100 metriä (1/s)
h_{15}	tarkastelupaikan korkeus 15 metriä (m)
C	Weibullin määräkerroin
V_{ka}	tuulen keskiarvo vuodessa (m/s)
Γ	gammafunktio
k	muotokerroin
χ	tuulen voimakkuus (m/s)
a_{maksu}	takaisinmaksuaika vuosina (a)
t	tuulivoimalan hinta (€)
W	tuotettu sähkö (kW)
c	sähkön hinta + siirtomaksu+ verot (€)

1 JOHDANTO

Suomen pyrkiessä lisäämään uusiutuvien energianlähteiden määrää, tuulivoima on yksi oleellisimmista vaihtoehtoista. Suuren kokoluokan tuulivoimarakentaminen on yleistynyt jo vuosikymmenen, ja tuulivoima onkin kasvamassa merkittäväksi tuotantomuodoksi. Pientuulivoimalat eivät ole vielä kunnolla yleistyneet edes tuulisimmilla paikoilla, sillä pientuulivoimasta on vaikeaa saada taloudellisesti kannattavaa. Pientuulivoimalan huoltokustannukset pienentävät kannattavuutta. Silti pientuulivoimalat ovat hyvä lisä tulevaisuuden hajautetun sähköntuotannon tarpeisiin. Ongelmaksi muodostuu lähellä olevan kulutuksen löytäminen tuulisella paikalla. Tällaisen paikan löytyessä, säästöä ei tulisikaan mittakaavasta vaan helposta asennuksesta, pienistä häviöistä sekä pienestä pääoman tarpeesta.

Tämä opinnäytetyö tarkastelee valaisinpylväiden päälle asennettujen pientuulivoimaloiden teknisiä ja taloudellisia näkökulmia. Ideana on etsiä sopivat olosuhteet pientuulivoimalle ja ottaa selvää, millaiset minimivaatimukset pientuulivoimala vaatii.

Työssä tarkastellaan yksityiskohtia, jotka vaikuttavat mahdollisen tuulivoimalan hankintaan, jos asennus tulisi jo olemassa olevan valaisinpylvään päälle jälki-asennuksena. Tällaisia asioita ovat: tuulivoimalan toimintaperiaate, tehon tuotto, pientuulivoimalan ulkomuoto, sijoituspaikka, risteysalueen tuulisuus sekä valaisun tarve, pientuulivoimalan komponentit ja taloudellisuuslaskenta.

Opinnäytetyössä käsitellään tuulivoiman teoriaa, erilaisia tuulivoimalatyyppejä ja sijainteja, tuulien eroja maalla ja merellä, risteysalueen energian tarvetta, pylväsvalaisimen rakenne, tuulivoimalan komponentit, tuulisuuden arviointimalli, kustannuslaskelma ja esimerkkikohteita pientuulivoimalan asennuspaikaksi.

2 TUULIVOIMAN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään tuulivoimalan käyttöä, taloudellisuutta, ilmavirtauksen tehoa ja esitellään läpi erilaisia tuulivoimaloita.

2.1 Nykyaikaiset tuulivoimalat

Tuulivoimala hyödyntää tuulen liike-energian sähköenergiaksi tuulivoimalan la-
pojen ja generaattorin avulla. Lavat pyörittävät generaattorille menevää akselia,
joka pyöriessään tuottaa sähköenergiaa. (Vattenfall)

Nykyaikaiset tuulivoimalat tuottavat sähköä talouden tarpeisiin, kun taas mennei-
syydessä tuulivoimalat tuottivat mekaanista työtä viljan jauhamiseen tai veden
nostamiseen. (Bull 2010, sivu 7.) Tuulivoimala ei ole tehokkain, eikä varmin tapa
tuottaa sähköä, mutta sen käyttö on lähes ilmaista ja ekologisuutensa ansiosta
myös trendikästä. Tuulisähköä on haluttu tukea taloudellisesti Suomen valtion
toimesta sähkötuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämistarkoituksessa,
vaikka se ei ole ollut itsenäisesti taloudellisesti kannattavaa. Tämän vuoksi Suo-
men valtio on tukenut tuulivoimaloita syöttötariffeilla vuodesta 2011 alkaen, joi-
den suuruus on ollut noin puolet tuotetun sähkön hinnasta. Syöttötariffin piiriin
hyväksyttiin 2500 MW tuulivoimaa ja kyseinen nimellistehomäärä on ollut täynnä
jo muutaman vuoden ajan. Tämä on ollut merkittävä apu tuulivoimalan yleistymi-
selle ja tukenut tuulivoimalavalmistajia kehittämään jatkuvasti tehokkaampia tuu-
livoimaloita ja nyt 2020 Suomeen on tulossa ensimmäinen tuulivoimalapuisto,
joka ei hae valtion tukea. Tuulivoimasta onkin teknisen ja taloudellisen kehityksen
seurauksena tullut markkinaehtoisesti kannattava sähköenergian tuotantomuoto
(Nikkilä M. 2019)

Vuonna 2011 tuulivoimalan nimellisteho oli keskimäärin 3,0 megawattia, mutta
nykyaikainen pystyy tuottamaan nimellisesti jopa 5,8 megawattia. Nimellisteho
saavutetaan yleensä 12 m/s tuulella. Investointikustannukset eivät kuitenkaan ole
kasvaneet samassa suhteessa nimellistehon kanssa, vaan ovat pysyneet suun-
nilleen samana. Syöttötariffimaksut ovat toimineet halutulla tavalla ja avittaneet

tuulivoimalavalmistajia valmistamaan suuren kokoluokan tuulivoimaloita taloudellisesti kannattaviksi. (Kankare M. 2019)

2.1.1 Tuulen teho

Tuulivoimala ottaa energiansa ilmavirtauksen tehosta. Ilmavirtauksen teho voidaan esittää kaavalla 1.

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

P tuotettu teho (W)

ρ ilman tiheys (kg/m³)

A kohtisuora pinta-ala ilmavirtaukselle (m²)

V tuulen nopeus (m/s)

Tuulivoimalan nimellistehoa laskiessa täytyy ottaa mukaan Betzin laki. Betzin laki tarkoittaa sitä, että roottori ei pysty kokonaan ottamaan tuulen liike-energiaa vastaan, vaan päästää osan tuulesta lävitseen. Tämä antaa teoreettisen ylärajan mekaaniselle teholle, jota voidaan hyödyntää tuulivoimalan pyörittämiseen. Tämä yläraja on 59% ilmavirtauksen maksimitehosta. (Bull 2010, sivu 39) Käytännössä luku on pienempi, sillä Betzin laki ilmaisee teoreettisen maksimin. Hyväksi hyötysuhteeksi on todettu 40%. Betzin lain mukainen tuulivoimalan kokonaishyötysuhteen teoreettinen yläraja on esitetty kaavassa 2

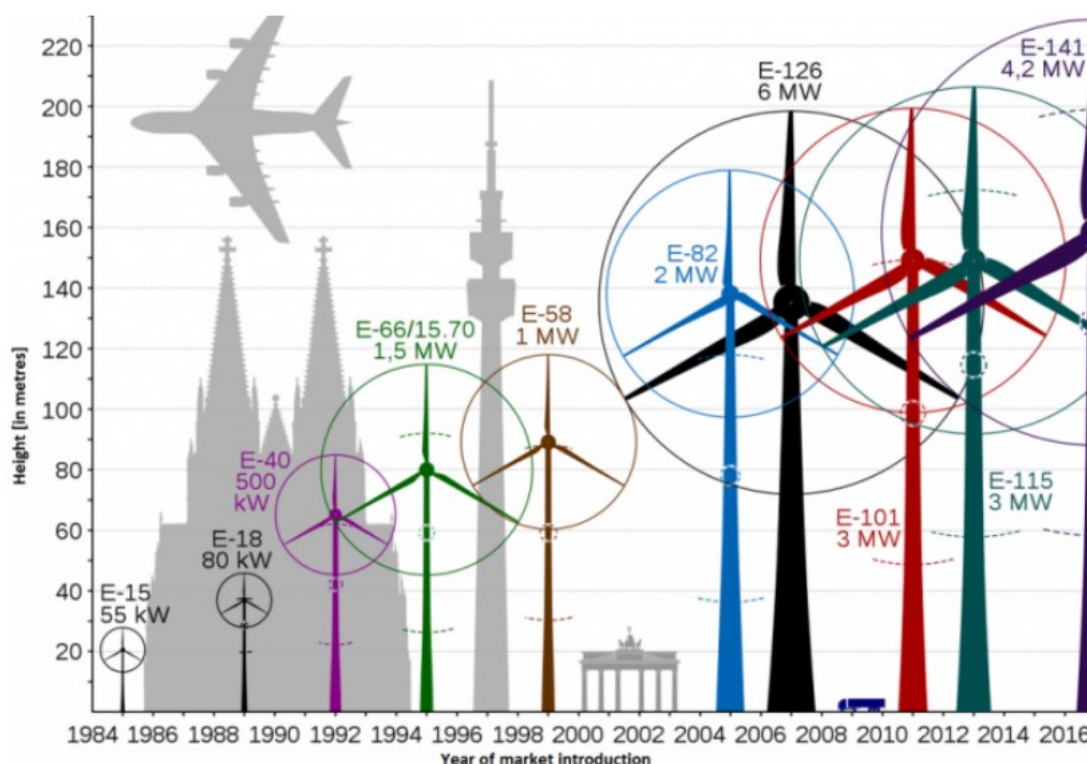
$$P_{max} = \frac{16}{27} * \frac{\rho}{2} * A * V^3 \quad (2)$$

Tuulivoimalan ottama teho tuulesta on parhaimmillaan kovalla ja laminaarisella, eli pyörteettömällä tuulella. Pyörteinen tuuli, eli turbulентtinen tuuli, romahduttaa tuulivoimalan lapojen aerodynaamisen hyötysuhteen. Turbulenttiset tuulet ovat erittäin yleisiä lähellä maan pintaa, sillä puut, rakennukset ja muut tuulenesteet aiheuttavat turbulентtisuutta. Korkeammalle mennessä tuulenesteet vähenevät ja

tuulisuus muuttuu enemmän laminaariseksi. Tuulivoimala ei siis välttämättä tuota paljoa energiaa, vaikka tuulisuus olisikin kova, jos tuuli on kovin turbulენტista.

2.1.2 Tuulivoimala

Yleisesti kun puhutaan tuulivoimalasta, tarkoitetaan kolmilapaisia, megawattiluokan generaattoreita. Suurimpien tuulivoimaloiden pyyhkäisyala on jopa yli hehtaarin. Esimerkiksi, jos tuulivoimalan lavan pituus on 70 metriä, niin pyyhkäisyala on yli 1,5 hehtaaria. Tähän vaaditaan korkeaa napakorkeutta, eli korkeutta missä lapojen napa sijaitsee. Uusimmilla napakorkeus yltää jopa 150 metriin ja jos lapojen pituus on 70 metriä, korkeimmillaan lapojen kärki yltää reilusti yli 200 metriin. Ne siis näkyvät varsin kauas. Jatkuvasti nousseen napakorkeuden mittasuhte on esitetty kuvassa 1. Mitä korkeammalle napakorkeus ylettyy, sitä parempi lapojen vastaanottama tuulisuus on.



KUVA 1. Kuva tuulivoimaloiden korkeuden kasvusta. (Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimatekniikka.)

Tuulipuistosata puhutaan silloin, kun useampia tuulivoimaloita rakennetaan lähemmäksi toisia. Tällöin tehon tuotto kasvaa ja säästöä syntyy infrastruktuuria rakennet-

taessa, sillä tuulivoiman rakentaminen on halvempaa kerralla suuremmalle kapasiteetille samaan paikkaan kuin hajautetulle tuulivoimalle. Hyvälle paikalle kannattaa myös rakentaa mieluummin mahdollisimman monta tuulivoimalaa, sillä hyviä paikkoja on rajoitetusti. Ulkonäön kannalta ei ole enää niinkään väliä, onko lähialueella yksi vai useampi voimala.

2.2 Pientuulivoimala

Pientuulivoimalla tarkoitetaan pienen nimellistehon, alle 50 kW, generaattoreita. Ne eivät oleellisesti pienemmän pyyhkäisyypinta-alansa vuoksi pysty hyödyntämään yhtä paljon tuulen tarjoamaa tehoa kuin perinteiset suuren kokoluokan tuulivoimalat. Niitä käytetään tyypillisesti sähköverkon ulkopuolella, maatiloilla tai pienentämässä omakotitalon sähkölaskua. Täysin sähköenergiaomavaraista ei omakotitalosta pysty pelkällä pientuulivoimalla tekemään, mutta sen tueksi voi laittaa aurinkopaneeleita tai aggregaatin. Jos haluaa säästää investointikustannuksissa, olisi tärkeää, että tuotetun energian voisi käyttää heti. Tällöin ei tarvitsin hankkia kallista akustoa välivarastoksi. Esimerkkinä jatkuvasta kulutuskohteesta on pakastin, suuri lämminvesivaraaja tai jatkuva valaistus. (Pientuulivoimala-yhteistyöryhmä)

Pientuulivoimalaa asennettaessa olisi tärkeää tarkistaa paikan tuulisuus ennen asennusta. Harvemmin pientuulivoimalat käynnistyvät alle 3 m/s tuulella, eli se on minimi tuulisuusarvo, joka pitäisi olla, jotta saadaan jatkuvaa energian tuottoa. Hyvä paikka pientuulivoimalan asentamiselle on esteetön ja avoin paikka, kuten talon katolla, korkean tolpan päässä, pellonreunalla tai järven rannassa. (Tuulivoimayhdistys. Pientuulivoimalan tekniikka - Tietoja rakentajalle.) On myös hyvä tiedostaa, että tuulivoimalan takana ei saa olla heti suoraa estettä, kuten metsää. Esimerkiksi jos pellon reunalla sijaitsevan metsän korkeus on 20 metriä, tulisi tuulivoimala asentaa vähintään 40 metriä metsän reunasta. (Bull 2010, sivu 25) Jotta sähköntuotanto olisi mahdollisimman tehokasta, tuulen pitäisi olla tasaista, eikä turbulenttista.

Sähkön tuotto on hyvä aloittaa mahdollisimman pienellä tuulella, mutta sitä ominaisuutta ei kannata vaihtaa kovien tuulien hyödyntämisen tilalle. Tuulen nopeuden kasvaessa, energiamäärä kasvaa kolmannessa potenssissa. Esimerkiksi jos tuulen keskinopeus vuodessa on 3 m/s ja tuulivoimala käynnistyy kaikilla tuulen nopeuksilla, tuulivoimalan tuotto on 100%. Jos verrataan samaan tuottoon realistisemmalla energiantuoton aloituksella, esimerkiksi 2 m/s tuulella, tuotto tippuu vain 95,7%:iin. Menetetty energian määrä on todella pieni. Tämä on yksi syy, miksi tyypillinen tuulivoimala alkaa tuottaa energiaa n. 3 m/s tuulella. Ei kannata käyttää hyväksi tyypillisiä pieniä tuulen nopeuksia, vaan ottaa talteen suurempien tuulien potentiaalinen teho, jossa energian määrä on moninkertainen.

2.2.1 Vaaka-akselinen tuulivoimala

Vaaka-akselilla tarkoitetaan sitä, että tuulivoimalan roottori on vaakasuunnassa. Periteiset tuulivoimalat ovat kaikki vaaka-akselisia tuulivoimaloita. Niillä on yleensä kolme lapaa, joilla otetaan vastaan tuulen virtausta. Lavat pitää kääntää aina kohtisuoraan tuulta vasten. Tämä on toteutettu isoimmissa kääntömoottorilla ja pienemmissä peräsimellä, joka kääntää tuulivoimalan itsestään tuulta kohti. Vaaka-akselisen tuulisuuden toiminta alue on yleensä 3-25 m/s. Tuulivoimala käynnistyy vasta tarpeeksi suurella tuulen nopeudella ja se on pysäytettävä turvallisuussyistä viimeistään 25 m/s kohdalla, joka on jo todella kova myrskylykema. Toiminta-alue on valittu sen mukaan, että saadaan tuotettua mahdollisimman halpaa sähköä. Jos haluttaisiin hyödyntää 0-3 m/s tuulet, niin lapojen määrää pitäisi lisätä huomattavasti, joka olisi toisi lisäkustannuksia. Myös harvinaisten yli 25 m/s tuulien hyödyntämisen lisäkustannukset ovat kalliita, sillä tuulivoimalasta pitäisi tehdä kestävämpi.

2.2.2 Pystyakselinen tuulivoimala

Pystyakselisella tuulivoimalalla tarkoitetaan sitä, että tuulivoimalan roottori on pystysuunnassa. Tällöin tuulivoimalalla ei tule olemaan yhtä suuri pyyhkäisyala kuin vaaka-akselisella, joka kaavan 2 mukaisesti vähentää lineaarisesti tehon tuottoa. Toisaalta pystyakseliset tuulivoimalat ovat kestävämpiä suurilla tuulen

voimakkuuksilla, eikä niitä välttämättä tarvitse edes pysäyttää myrskytuulella. (Windside. Tekniset tiedot.)

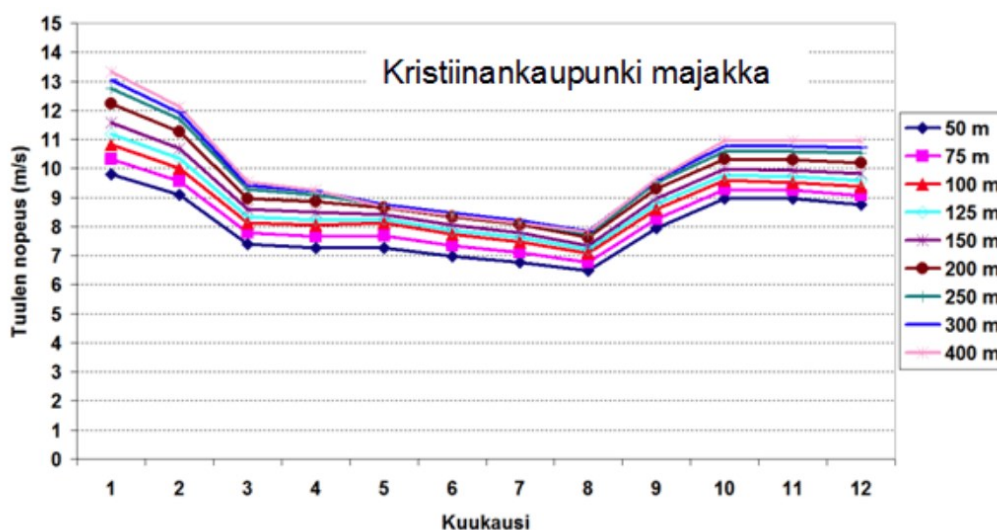
Verrattaessa vaaka- ja pystyakselisia pientuulivoimaloita, niin molemmilla on omia etuja. Pystyakselinen ei häiriinny turbulenttisesta tuulesta yhtä paljon kuin vaaka-akselinen tuulivoimala, mutta turbulenttisuus häiritsee molempia tuulivoimalatyyppejä. Pystyakselinen on silti parempi kuin vaaka-akselinen asennettaessa lähelle rakennuksia, sillä rakennukset aiheuttavat turbulenttisen ympäristön tuulivoimalalle. (Pientuulivoimala-yhteistyöryhmä) Vaaka-akselisten raaka-ainekustannukset ovat pienemmät, sillä sen pyyhkäisyypinta-alan täyttämiseksi, sen lapojen pitää peittää vain 2-3 % pyyhkäisyalasta, kun taas pystyakselisessa pyyhkäisyala pitää täyttää lähes kokonaan. (Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimaloiden rakenne.)

3 SOPIVAT PAIKAT TUULIVOIMAN RAKENTAMISELLE

Tuulivoimala voidaan käytännössä asentaa lähes minkälaiselle paikalle tahansa, mutta paikan valinnalla on suuri merkitys energian tuottoon. Tässä luvussa käydään läpi seikkoja, jotka vaikuttavat tuulisuuteen.

3.1 Yleisesti

Koska tuulivoimalan tuottama teho kasvaa kuutiollisesti kaavan 2 mukaisesti tuulen nopeuden kasvaessa, tuulivoimala kannattaa sijoittaa tuulisille paikoille. Tuulisuus kasvaa nopeasti mittauspaikan korkeuden kasvaessa, joten tuulivoimalat kannattaa yleensä asentaa mahdollisimman korkealle. Kuva 2 esittää Kristiinankaupungin majakan tuulisuuden mittauksien tuloksia ja niiden pohjalta tehtyjä mallinuksia eri korkeuksien tuulisuudesta.



KUVA 2. Kristiinankaupungin majakan tuulisuus eri korkeuksissa (Suomen tuuliatlas)

Tuulisuuden kasvu mittauspaikan kasvaessa voidaan selittää tuulen esteiden poistumisella. Jos tuuli joutuu kulkemaan lähellä puiden latvoja ja mäkiä, tuuli kohtaa jatkuvaa karheutta sen kulkiessa eteenpäin, joka hidastaa sen kulkua. Korkeammalla tuulen kohtaamat esteet vähenevät merkittävästi. Tuuli pääsee

vapaasti jatkamaan eteenpäin ilman hidasteita. Kuvasta nähdään myös, että Suomessa tuulisuus laskee kesäisin. Syynä tähän on se, että talvikuukausina Suomen päällä on enemmän matalapainekeskuksia, jotka luovat kovempia tuulia kuin korkeapaineet. Loka – maaliskuun aikana tuotetaan keskimäärin 60% tuulivoimaloiden vuosittain tuottamasta sähköstä. (Tuulivoimayhdistys. Talvella tuulee eniten.) Tuotannon kasvua talvisin auttaa myös ilman lämpötilan alenemisesta seuraava tiheyden kasvu, joka johtaa ilmavirtauksen tehon kasvuun. Tehon riippuvuus tiheydestä on lineaarinen, kuten kaavassa 2 on esitetty.

3.2 Tuulivoima merellä

Merellä ei ole maapinnan korkeuseroja, eikä puiden latvoja hidastamassa tuulen etenemistä. Voidaankin siis yleistää, että merellä tuulee enemmän kuin mantereella. Merelle kannattaa asentaa tuulivoimaloita niiden tehon tuoton ollessa parempi kuin maalle asennettaessa. Lisähaasteena tulee tuotetun sähkön siirto kulutuskohteille merenpohjaa pitkin, jonka kustannukset ovat selvästi suuremmat kuin maalle asennettaessa. Tuulivoimala tai tuulivoimalapuisto kannattaa olla lähellä maata, jotta tuotettu teho voidaan syöttää kulutuskohteelle tai kantaverkkoon. Jos haluaa viedä tuulivoimaa pidemmälle rannikosta, siellä pitää olla myös kulutusta. Tästä hyvä esimerkki on Norjassa sijaitseva öljynporauslautta, joka sijaitsee 140 km rannikosta. (Patel S. 2019.) Sen tarvitseman tehon tuottaa kelluva tuulivoimalapuisto. Näin ollen kulutuskohde on todella lähellä tuulivoimalaa.

3.3 Tuulivoima maalla

Maalle tuulivoimalaa suunnitellessa asennuspaikan tuulisuus kannattaa mitata huolellisesti, sillä tuulisuuden vaihtelu on todella suurta mantereella. Suuren kokuokan tuulivoimahankkeissa tuulisuusmittausten tulee kestää vähintään vuoden ajan, sillä tuulivoimalavalmistajat eivät suostu antamaan tuottavuustakuita voimaloilleen, ellei tuulen mittausta ole esittänyt vuoden ajalta. Paras paikka on rannikolla, jolloin maan pinnan rosoisuus ei ole vielä ehtinyt hidastaa tuulen liikettä. Myös kulutuskohde kannattaa olla lähellä, esimerkiksi tehdas. Tästä esimerkkinä Reposaaren tuulipuisto, jossa on kymmenen yksittäistä tuulivoimalaa.

Niiden rakentaminen alkoi vuonna 1999 ja uusimmat kaksi tuulivoimalaa on rakennettu vuonna 2015. Tuulipuisto näkyy kuvassa 3. Uusien tuulivoimaloiden teho on kasvanut kolminkertaiseksi ensimmäisistä tuulivoimaloista. Tuulivoimaloiden nimellistehon kasvu selittyy osaksi sen napakorkeuden kasvulla ja tekniikan kehityksellä. Tehoa käyttää vieressä oleva teollisuusalue ja lähiseudun asukkaat. Tuulipuiston tuulen keskinopeus on 7,3 metriä sekunnissa, joka on todella hyvä verrattuna sisämaahan. (Hyötytuuli)



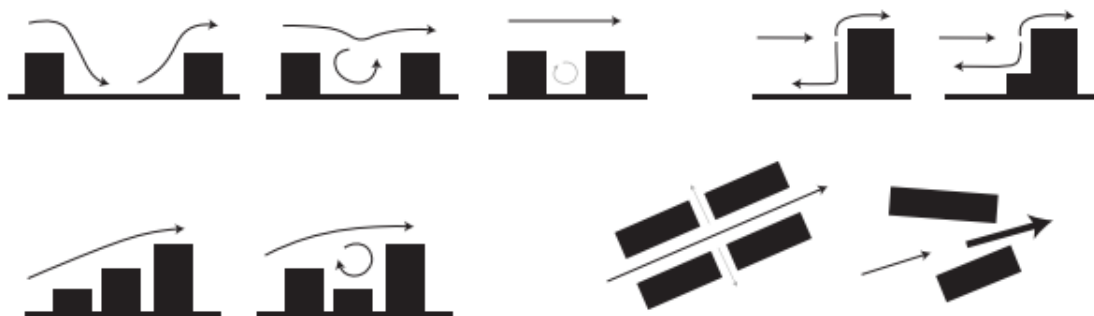
KUVA 3. Reposaaren tuulipuisto ja sen hetkellinen tehon tuotto 8.6.2020 (Kuvankaappaus, Hyötytuuli)

Mentäessä syvemmälle sisämaahan, tuulisia paikkoja ovat järvien rannat ja tunturit. Muoniossa on jo viisi rakennettua tuulivoimalaa, joiden tuottavuus on teoriassa hyvä, mutta niiden ulkonäkö rikkoo Lapille tärkeää luontoa, joten tuulivoimaloita ei haluta lisätä, vaikka olosuhteet olisivat hyvät. Maisemahaitta onkin yksi merkittävä tuulivoiman ongelma. Myös tuulivoimaloiden lapojen jäätyminen aiheuttaa hyötysuhteen alenemista ja ylimääräistä huoltoa. (Leukumaavaara J. 2012.)

3.4 Pientuulivoima kaupungissa

Tuulivoimaa sijoittaessa kaupunkiin etuina ovat valmis sähköverkko ja lähellä oleva sähkön kulutus. Rajoituksia ovat tuulivoimalan koko, ulkonäkö ja turvallisuus. Tuulivoimala ei saa olla suuri, sillä se tarvitsee tilaa, jota kaupungissa ei yleensä ole. Mitä suurempi tuulivoimala on, sitä helpommin se pistää silmään ja pilaa katukuvaa. Turvallisuuden kannalta on tärkeää varmistaa, että mikään ei pysty osumaan tuulivoiman alueelle ja ettei tuulivoimala kaadu kovalla tuulella.

Hyviä paikkoja olisivat teiden risteykset, talojen katot ja ranta-alueet. Kuvassa 4 näkyy tuulen käyttäytyminen kaupungissa. Tuulen saavuttaessa kaupungin, tuuli useasti heikkenee. Rakennusten muodostamissa tuulensolissa tuuli pakkautuu suuremmalta pinta-alalta kapeampaan aukkoon, kuten autotielle, joka saattaa jopa kasvattaa tuulen nopeutta. Tuulella on siis tapa puhalttaa teiden suuntaisesti. (Iisakkila 1977, sivu 110) Tuulivoimalalle saataisiin korkeutta katutasolta sijoittamalla tuulivoimala valaisinpylvään päälle. Kaupungissa olevat valaisinpylväät ovat n. kymmenen metriä korkeita, joissa valaisin toimii kulutuskohteena. (Tiehallinto, sivu 34)



KUVA 4. Kuva tuulen käyttäytymisestä rakennusten läheisyydessä. (Kangas S. 2018, sivu 7)

4 RISTEYSALUE TUULIVOIMALLE

Kaupungit ja taajamat luovat rakennettuja reittejä tuulelle, sillä tuuli kulkee lähes esteettömästi teitä pitkin. Tien pitää olla suora ja tasainen. Tuuli kulkee tien myötäisesti, jos tuulen suunta sattuu olemaan oikeasta suunnasta. Neljään suuntaan lähtevä risteys tarkoittaa sitä, että risteykseen voi tuulla neljästä eri suunnasta, joka parantaa tuulivoimalan kannattavuutta. Tällainen paikka on esimerkiksi liikenneympyröissä.

4.1 Risteyksen sähköntarve

Risteyksessä käytetään sähköä tien valaisuun, liikennevaloihin ja antureille. Suurin energian tarve on valaistuksella, joka on nykyaikaisella led-valolla noin 60 wattia per valaisin. Tehoa kuluu eniten talvisin aamu- ja iltapäiväruuhkien aikaan, kun aurinko ei paista, sillä liikenteen määrän vuoksi tiet pitää valaista kunnolla. Tehon tarve pienenee illan edetessä, kun liikennemäärä laskee. Näin ollen valaistusta voidaan tiputtaa portaattomasti led-valaisimien avulla siten, että tien valaistustaso jää määrätylle tasolle kuvan 5 mukaisesti. Kun valaistusta tiputetaan esimerkiksi 50% tasolle, niin oletetaan, että valaisimen käyttämä energia tippuu samassa suhteessa. Luminanssi tarkoittaa tiellä olevan valon määrää. M1-luokka tarkoittaa, että tiellä pitää olla kaksi kandela neliometriä kohden, kun sen määrätty luminanssi on 100%. (2 cd/m²) Opinnäytetyön laskuissa on oletettu valaistusluokan olevan M1.

		Kellonaika, alkava tunti																		
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Valaistusluokka	Muuttuvan valaistuksen valaistusluokat	Jäljelle jäävä keskimääräinen luminanssi %																		
M1 (AL1), C0 ja C1	M1 – M2 – M3 – M2 – M1	100	100	100	100	100	100	75	75	75	50	50	50	50	50	75	75	100	100	100
M2 (AL2), C2	M2 – M3 – M4 – M3 – M2	100	100	100	100	100	100	75	75	75	50	50	50	50	50	75	75	100	100	100
M3a (AL3), C3	M3 – M4 – M5 – M4 – M3	100	100	100	100	100	100	75	75	75	50	50	50	50	50	75	75	100	100	100
M3b (AL4a)	M3 – M4 – M5 – M4 – M3	100	100	100	100	100	100	75	75	75	50	50	50	50	50	75	75	100	100	100
M4 (AL4b), C4	M4 – M5 – M6 – M5 – M4	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	40	40	60	60	100	100	100
M5 (AL5), C5	M5 – M6 – P5 – M6 – M5	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	40	40	60	60	100	100	100
M6	M6 – P5 – P6 – P5 – M6	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	40	40	60	70	100	100	100
		Jäljelle jäävä keskimääräinen valaistusvoimakkuus %																		
P1 (K1)	P1 – P2 – P3 – P2 – P1	100	100	100	100	100	100	75	75	75	50	50	50	50	50	75	75	100	100	100
P2 (K2)	P2 – P3 – P4 – P3 – P2	100	100	100	100	100	100	75	75	75	50	50	50	50	50	75	75	100	100	100
P3 (K3)	P3 – P4 – P5 – P4 – P3	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	40	40	60	60	100	100	100
P4 (K4)	P4 – P5 – P6 – P5 – P4	100	100	100	100	100	100	60	60	40	40	40	40	40	40	60	60	100	100	100

KUVA 5. Teiden valojen himmennys öisin. (Liikennevirasto. Tien valaisimien laatuvaatimukset, 13.5.2016, liite 3.)

Kesällä teiden valoja ei tarvitse välttämättä olla päällä koko vuorokautta. Kesällä Tampereella 1.6.2020 aurinko laski klo 23:48 ja nousi jo 3:57. Katuja ei tarvitse siis valaista kuin noin viisi tuntia vuorokaudessa ja sekin valaisu tarvitaan pienen liikenteen aikaan yöllä, eli tarvittava luminanssi on 50% pienempi kuin päivällä. Talvella 1.1.2020 aurinko nousi 9:40 ja laski 15:15. (Nettikalenteri) Tarvittavia valaisutunteja on 21, joista 11 tuntia on täydellä teholla. Kun samalla tavalla laskeaan kaikkien kuukausien valaisutunnit ja niiden käyttämä energia yhteen, saadaan, että yksi valaisin käyttää energiaa vuodessa noin 179 kWh, valaistustuntien ollessa 3934 tuntia. Tästä saadaan oletus valaisimen vuosikulutuksesta, jota käytetään myöhemmin kannattavuuslaskelmissa. Valaisutunnit ovat lähellä todellista tutkimusta, Tampereen valaisimien valaisutunneista vuodessa, jonka Tampereen kaupunki on tehnyt. Tutkimuksessa todettiin yksittäisen valaisimen palavan vuodessa noin 3800 tuntia. (Tampereen kaupunki, sivu 16.)

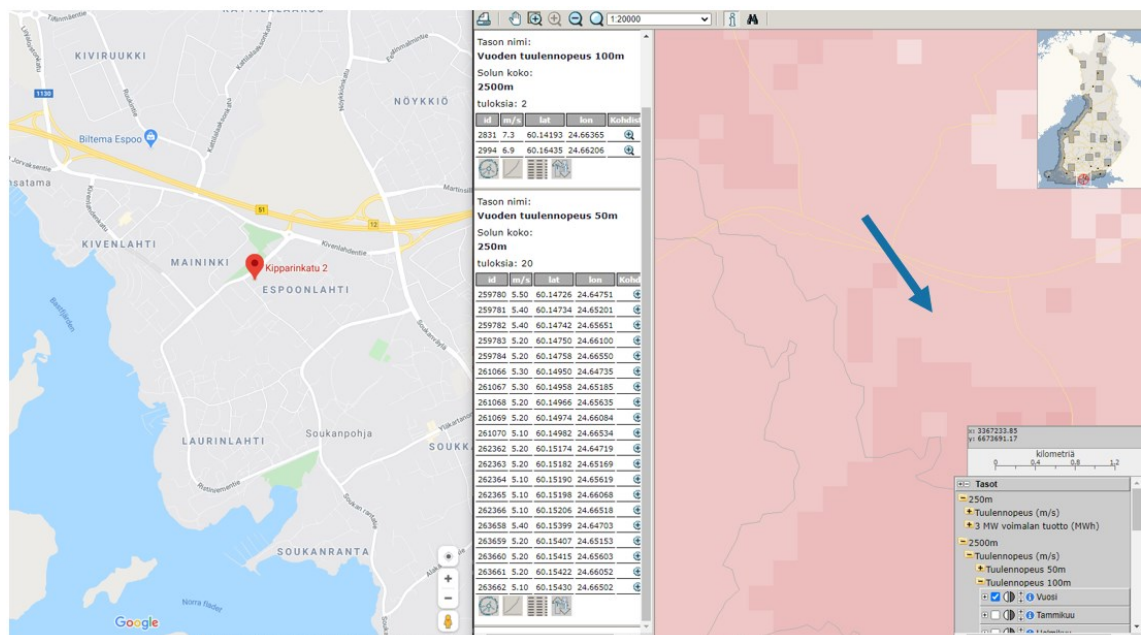
4.2 Risteyksen tuulisuus

Risteyksen tuulisuus arvioitiin Tuuliatlaksen avulla. (Tuuliatlas) Karttaliittymällä voidaan tarkistaa halutun paikan keskituulisuus tietyllä korkeudella. Tuuliatlaksesta saadut tiedot laitetaan kaavaan 3, josta saadaan arvio tarkastelupaikan tuulisuudesta 15 metrin korkeudesta.

$$W_{m15} = \frac{\frac{W_{m100}}{h_{100}} * \frac{W_{r15}}{h_{15}}}{\frac{W_{r100}}{h_{100}}} * h_{15} \quad (3)$$

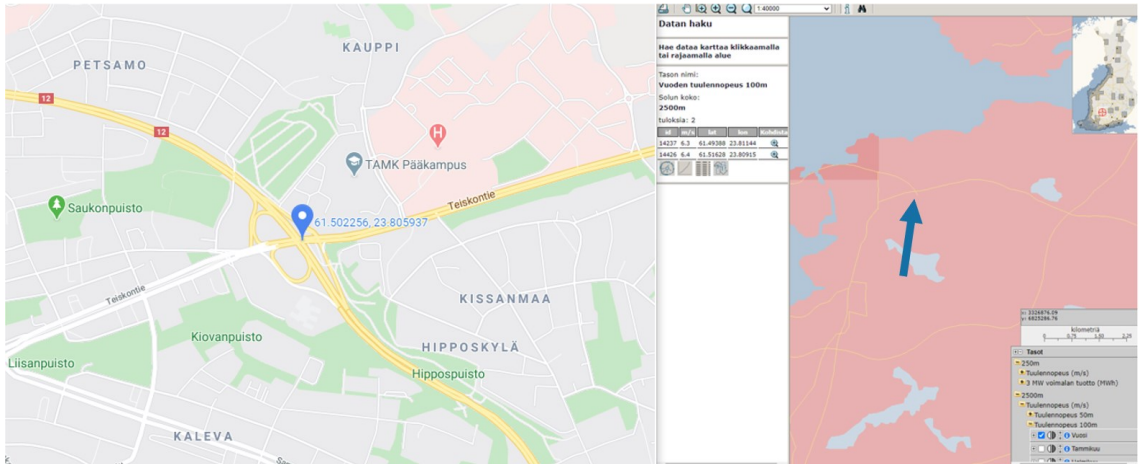
W_{m15}	tarkastelupaikan tuulisuus 15 metrin korkeudessa (m/s)
$\frac{W_{m100}}{h_{100}}$	tarkastelupaikan tuulen nopeuden suhde 100 metriä (1/s)
$\frac{W_{r15}}{h_{15}}$	referenssipaikan tuulen nopeuden suhde 15 metriä (1/s)
$\frac{W_{r100}}{h_{100}}$	referenssipaikan tuulen nopeuden suhde 100 metriä (1/s)
h_{15}	tarkastelupaikan korkeus 15 metriä (m)

Referenssinä käytettiin WSP:n tekemää raporttia Kipparinkatu 2, Espoo, koskevaa raporttia, jossa on mitattu tien reunan keskituulisuuden olevan n. 3 m/s 15 metrin korkeudella. (Kipparinkatu 2 – Ankkuri-hanke, Espoo: lausunto tuulisuuden vaikutuksista) Tuuliatlas esittää Kipparinkadun tuulisuudeksi 7,2 m/s sadan metrin korkeudessa. Kuvassa 6 on esitelty Kipparinkatu 2 sijainti ja Tuuliatlaksen näkymä.



KUVA 6. Kipparinkatu 2 Tuuliatlas. Nuoli osoittaa, mistä kohtaa mittausarvot ovat otettu.

Tarkastelupaikaksi valittiin Tampereen Teiskontien silta, koska sillalle on hyvät tuulireiitit. Sillalle ei ole tehty mittauksia, vaan arviot ovat tehty Tuuliatlaksella. Sillalla on kaksi eri korkeustasoa, mutta tässä raportissa oletetaan tuulisuuden mittaustapaikan olevan 15 metrin korkeudessa sillan kannesta. Kuvassa 7 on esitelty tarkastelupaikka.



KUVA 7. Teiskontien silta Tuuliatlas. Nuoli osoittaa, mistä kohtaa mittausarvot ovat otettu.

Tuuliatlas esittää Teiskontien sillan tuulisuudeksi 6,3 m/s sadan metrin korkeudessa. Kerätyistä tiedoista voidaan laskea Teiskontien sillan tuulisuus 15 metrin korkeudelle sijoittamalla arvot kaavaan 3.

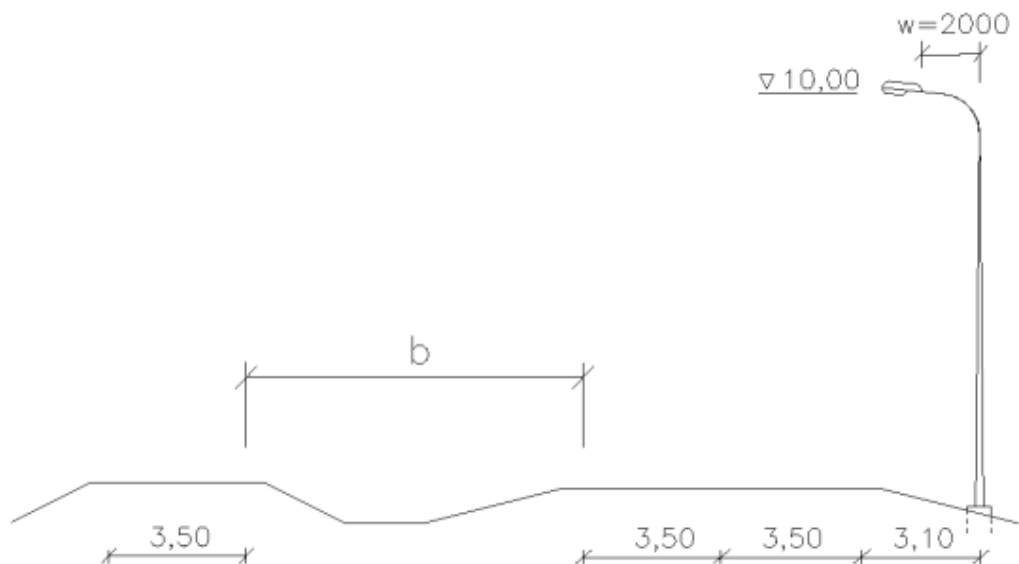
$$W_{m15} = \frac{\frac{6,3 \text{ m/s}}{100 \text{ m}} * \frac{3,0 \text{ m/s}}{15 \text{ m}}}{\frac{7,2}{100} * \frac{\text{m/s}}{\text{s}}} * 15 \text{ m}$$

Teiskontie silta tuulisuus 15 metrin korkeudessa = 2,625 m/s ≈ 2,63 m/s

Risteysalueilla tuulen nopeus vaihtelee ja ne ovat myös turbulenttisia. Turbulenttisuus kasvaa, jos risteyksen lähellä on paljon rakennuksia tai muita tuuliesteitä. Tuulella on kuitenkin useampi vapaa reitti kulkea risteysalueen läpi kuin tavallisella tiellä.

4.3 Valaisinpylväiden rakenne

Valaisinpylväät ovat taajamassa 8-10 metriä korkeita ja tyypillisesti vakiorakenteisia. Taajaman ulkopuolella valaisinpylväät ovat korkeampia, moottoritiellä jopa 18-metrisiä. (Liikenneviraston ohje) Niiden ainoa tehtävä on olla valaisemassa teitä. Ne asennetaan pystyyn betonijalkaan tien viereen ja tien päälle ulottuvan varren päässä on valaisin. Kuvassa 8 on esimerkki valaisintolpasta, jossa on pitkä varsi ajoradan päälle. Varsi voi olla tarvittaessa puolet lyhyempi. Kaduilla näkyy myös suunnilleen yhtä korkeita Y-haaraisia valaisinpylväitä, joita käytetään risteysalueilla liikenteen jakajan päälle asennettuina.



KUVA 8. Valaisinpylväs ajoradan vieressä. Valaisinpylväs on pitänyt rakentaa ajoradan toiselle puolelle, kauemmas jalkakäytävästä. (Liikenneviraston ohje, sivu 43)

Valaisimia asennetaan taajamassa noin 50 metrin välein, mutta risteysalueella tiheämmin. Vanha tapa oli yhdistää valaisimet ilmakaapelilla, mutta trendin mukaisesti kaikki kaapelit halutaan tulevaisuudessa maan alle. Kaupungissa on jo pidemmän aikaa asennettu kaikki kaapelit maan alle.

5 TARVITTAVAT KOMPONENTIT TUULIVOIMALLE

Tuulivoimalan komponenteilla on suuri merkitys tuulivoiman toiminnassa. Tuulivoimala voidaan tehdä halvoista osista, jopa kotitekoisesti, mutta silloin tuulivoimalan tuotto laskee. Kalliimpia osia käyttäessä tuotto nousee, mutta samalla kustannukset nousevat. Laatuun panostaessa tuulivoimalan elinikä kasvaa, joka parantaa tuottavuutta. Tässä luvussa on käyty muutamia lisäkomponentteja läpi, joita saatetaan tarvita tuulivoimalan tueksi sähkön siirtoon ja muokkaamiseen.

5.1 Siivekkeet

Tuulivoimalalla kannattaa olla mahdollisimman suuri pyyhkäisyala. Pyyhkäisyalan kasvulla saadaan lisää tuulta kiinni ja tehon tuotto kasvaa. Ongelmaksi tulee painon kasvu. Pientuulivoimaloissa olisi hyvä, jos sen pystyisi asentamaan jopa yksin, joten osien pitäisi olla modulaarisia ja tarpeeksi kevyitä.

Siivekkeet tehdään yleensä komposiittimateriaalista, kuten lasikuidusta tai hiilikuidusta. Myös puuta on käytetty polyesterin tai epoksin kanssa. (Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimaloiden rakenne) Nämä ovat kevyitä ja sileitä materiaaleja, jotka sopivat hyvin tuulivoimalan käyttötarkoitukseen.

5.2 Sähkökomponentit

Tuulivoimalan generaattorina toimii sähkömoottori. Sähkömoottoria ei pyöritetä sähköllä, vaan tuulen liike-energia pyörittää tuulivoimalan lapoja, jotka ovat kiinni sähkömoottorin akselissa. Sähköntuotanto perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jossa tuulen energialla pyörivä generaattorin roottori tuottaa ajan suhteen muuttuvan magneettikentän seurauksena jännitettä ja virtaa. Kustannustehokalle pystyakseliselle tuulivoimalalle sopisi generaattoriksi parhaiten joko kestopmagnetoitu vaihtosähkömoottori tai oikosulkumoottori. Kestomagnetoitu oikosulkukone on kalliimpi, mutta se ei tarvitse erillistä vaihteistoa ja on hyötysuhteeltaan erinomainen.

Ideaalitalanteessa tuulivoimalan tuottama teho saadaan käytettyä heti ilman väli-varastointia. Tällöin tarvittavat komponentit olisivat tuulivoimala ja kulutuskohte. Todellisuudessa aina ei tuule ja joskus tuulee, kun kulutusta ei ole. Tällöin olisi hyvä varastoida tuotettu energia odottamaan käyttöä akkuun. Tällöin tarvittavat komponentit olisivat tuulivoimala, lataussäädin, akku, invertteri ja kulutuskohte. Tällöin on tehty oletus, että kulutuskohte toimii 230 V vaihtojännitteellä. Jos kulutuskohte toimisi esim. 24 V akkujännitteellä, komponentteina olisi tuulivoimala, lataussäädin, akku ja kulutuskohte. Tämä ei kuitenkaan ole järkevää, sillä silloin valmiina olevat valaisimet pitäisi vaihtaa, joka tuo enemmän kustannuksia kuin pois jäävän invertterin hinta. Esimerkkikomponentit on listattu taulukkoon 1.

TAULUKKO 1. Tarvittavia komponentteja pientuulivoimalalle

Tuulivoimala	Tuottaa sähköä tuulesta. https://www.windside.com/fi/asiakkaat_markkinat/mokkilaiset	4000 euroa (arvio)
Lataussäädin	Säätää tuulivoimalan tuottamaa jännitettä akuille sopivaksi. Lisäksi toimii tarvittaessa jarruna. https://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/product/174/tuulivoimalan-hybridi-lataussaadin-800w-1224-volt	200 euroa
Akku	Varastoi sähkön odottamaan oikeaa käyttöhetkeä. Nimelliskapasiteetiltaan 13,5 kWh. https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall	7650 euroa
Normaali invertteri	Muuntaa akulta saadun 24V DC → 230 V AC. Tällöin kulutuskohte voi käyttää verkkovirtaa. https://www.jussinmaki.net/autosahko/tuote/invertteri-24v-230v-1000w-new/G-24-100/	140 euroa
Synkroninen invertteri	Osaa suunnata ja tahdistaa tuulivoimalalta tulevan sähkön verkkoa vastaavaksi sähköksi. https://sites.google.com/site/kodinvihreaenergia/verkkoinvertterit	1500 euroa

6 LASKENTAMALLI

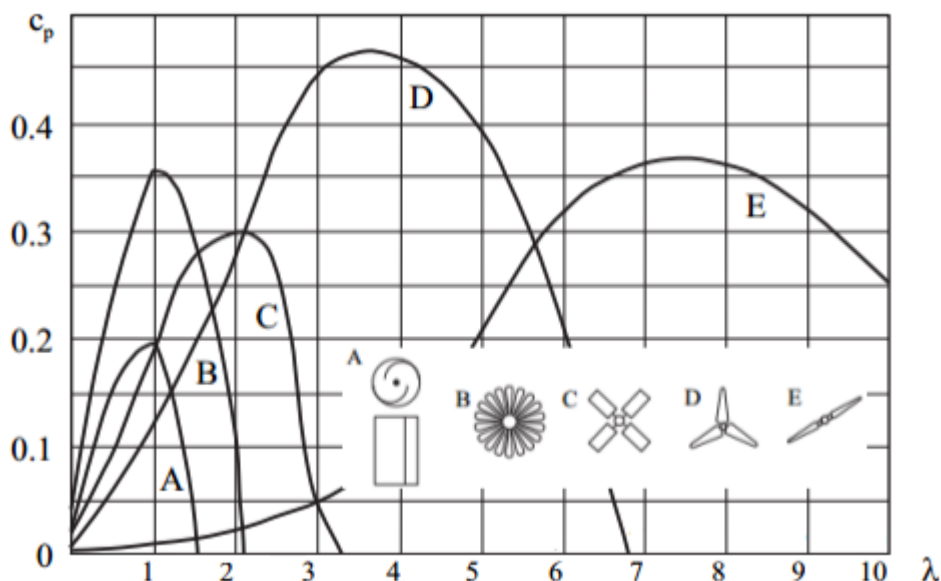
Laskentamalli tehtiin pienen pysty akselisen tuulivoimalan tuoton arvioimiseen erilaisissa tilanteissa. Pientuulivoimalan tuottolaskelmat tehtiin Excelillä. Seuraavissa kappaleissa selitetään, kuinka laskentamalli laskee pientuulivoimalan energian vuosituoton kaavalla 4.

$$W_a = \frac{5}{27} * \frac{\rho}{2} * A * T * \left(\int_y^{28} (\beta * h_a * x^3) dx \right) \quad (4)$$

W_a	energian tuotto vuodessa (Wh)
$\frac{5}{27}$	hyötysuhde
ρ	ilman tiheys (kg/m ³)
A	tuulivoimalan pinta-ala (m ²)
T	tuulivoimaloiden määrä
y	tuulivoimalan käynnistystuulisuus (1-5 m/s)
x	tuulen nopeus (m/s)
β	tuulen todennäköisyys
h_a	vuoden tunnit (h)

6.1 Pysty akselisen hyötysuhde

Tuottolaskelmassa piti ottaa huomioon pysty akselisen tuulivoimalan huono hyötysuhde tuulesta saatavasta kokonaistehosta, kuten Kalle Suoniemi kirjoittaa diplomityössään ”Pientuulivoiman suunnittelu ja tuotannon ennustus kuluttajan näkökulmasta”. Kokonaisteho on Betzin lain mukaisesti 59 %, mutta pysty akselinen pystyy hyödyntämään vain n. 19 % kuvan 9 mukaisesti. Tässä työssä käytettiin hyötysuhdetta 18,5 %, joka vastaa kaavan 4 kerrointa 5/27.



KUVA 9. Pysty akselisen hyötysuhde. (Vihriälä, 2002, sivu 14.)

Kuvassa vaaka-akselilla on kärjennopeussuhde λ , jota ei tässä työssä käsitellä tarkemmin. Oletetaan tuulivoimalan toimivan lähellä kärjen nopeussuhteen optima.

6.2 Weibull

Kun tarkastelupaikan vuoden keskituulisuus on arvioitu Tuuliatlaksen avulla, keskituulelle tehdään Weibull-jakauma. Weibull kertoo, millä todennäköisyydellä tuulee milläkin tuulen voimakkuudella. Todennäköisyys merkitään β :llä. Tuulivoimalan energiantuottoa arvioidessa pelkästään tuulen keskiarvolla, tuottoarviosta tulee liian pessimistinen, sillä voimakkaiden tuulien suuri vaikutus jäisi huomiotta. Kaavassa 5 on esitelty tarvittavat arvot, jotta voidaan laskea määräkerroin, jota käytetään Weibullin laskemisessa. Määräkerroimen laskemiseen täytyy tuntea tarkastelupaikan vuoden keskituulisuus. Määräkerroin on Weibullin vakio, joka tulee olemaan oma kunkin vuoden keskituulisuuden arvolla. Weibull-toiminto löytyy Excelistä suoraan komentona, johon syötetään tarvittavat arvot.

$$C = \frac{V_{ka}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (5)$$

- C määräkerroin
- V_{ka} tuulen keskiarvo vuodessa (m/s)
- Γ gammafunktio
- k muotokerroin

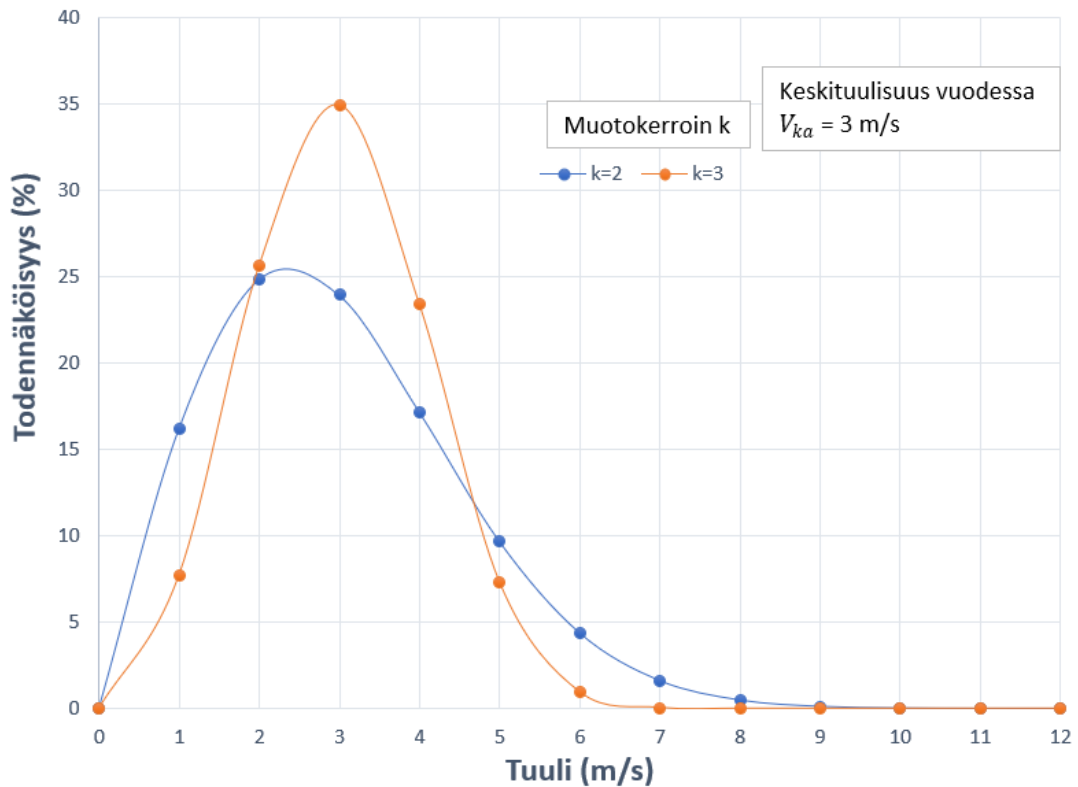
Kun määräkerroin on laskettu, se sijoitetaan Weibullin kaavaan 6.

$$\beta(x, k, C) = \frac{k}{C^k} * x^{k-1} * e^{-\left(\frac{x}{C}\right)^k} \quad (6)$$

- β tuulen todennäköisyys
- C määräkerroin
- x tuulen voimakkuus (m/s)
- k muotokerroin

Kaavoissa 5 ja 6 oleva muotokerroin k kertoo, kuinka jyrkkä Weibull-jakaumasta muodostuu. Sisämaassa ollessa muotokerroin on 2 ja rannikolla muotokerroin on 3. (REUK) Kuvassa 10 näkyy muotokertoimen merkitys. Vaaka-akselilla on tuulen voimakkuus ja pystyakselilla on kunkin tuulen voimakkuuden esiintymistodennäköisyys. Sisämaassa on siis enemmän hajontaa tyypillisillä tuulilla rannikkoon verrattuna. Tuulen nopeuden arvot kannattaa lukea kokonaisluvun välein, jotta energialaskennan numeerinen integrointi pysyy mahdollisimman yksinkertaisena yhteenlaskuna.

Weibull-jakauma



KUVA 10, Weibull-jakauman muodot muotokertoimilla $k=2$ ja $k=3$

Esimerkiksi tuulen keskiarvolla vuodessa 3 m/s ja muotokertoimella $k=2$: todennäköisyys 2 m/s tuulelle on 24,6 % ja 4 m/s tuulelle on 17,3 %. Kun kaikkien tuulien voimakkuuksien lasketut todennäköisyydet kerrotaan erikseen vuoden tunneilla 8760 h, saadaan vuoden ajalta jokaisen eri tuulisuuden tuntimäärä, esimerkiksi 2 m/s tuuli esiintyy vuodessa 2157 tuntia ja 4 m/s tuuli esiintyy vuodessa 1514 tuntia. Esimerkkiluvut ovat myöhemmin merkattu Excelissä keltaisella pohjalla kuvaan 11.

6.3 Excelin laskentatapa

Tarkoituksena on laskea vuodessa tuotetun energian määrää ja verrata sitä valaisimen tarvitsemaan energiaan vuodessa. Energia lasketaan kertomalla teho ajalla. Kun kaikki tuulen nopeudet ovat selvillä tunteina, niin tuulien nopeudet korotetaan kolmanteen potenssiin. Näin saadaan tuulen kuutio mukaan laskentaan. Kerrotaan vielä jokaisen tuulivoimakkuuden kuutio sen esiintymistunneilla.

Kaikki tuulivoimakkuuksien kuutiotunnit integroidaan yhteen. Exceliin lisätään mukaan vielä ilman tiheys ρ , tuulivoimalan pinta-ala A ja tuulivoimaloiden määrä T . Lisänä laskennassa otettiin huomioon tuulivoimalan käynnistystuulisuus, joka tässä työssä oli 2 m/s. Käynnistystuulisuus sijoitetaan kaavassa 4 y :n paikalle. Tuloksena tulee tuotettu energia vuodessa kilowattitunteina. Lisäksi Excel kertoo tuulivoimalan hetkellisen tehon tuoton keskittuulen arvolla. Kuvassa 11 on kuvakaappaus Excelistä.

A	B	C	D	E	F	G	H
13	Tuulen nopeus x (m/s)	weibull todennäköisyys β	β * Tunnit vuodessa (h)	Tuulen korotus x^3 ((m/s) ³)	β * Tunnit vuodessa * Tuulisuus korotettuna (h*(m/s) ³)	Pientuulivoimalan hyötysuhde:	0,185
14	0	0	0	0	0	Ilman tiheys ρ (kg/m ³):	1,225
15	1	0,159947709	1401,141933	1	1401,141933	Pinta-ala A (m ²):	5
16	2	0,246212439	2156,820967	8	17254,56774	Pientuulivoimaloiden määrä T :	1
17	3	0,238728645	2091,262934	27	56464,09922	Käynnistystuulisuus (1-5) m/s	2
18	4	0,172801643	1513,742396	64	96879,51333	Menetetty tuulisuustunnit vuodessa y	18655,70967
19	5	0,098483572	862,7160923	125	107839,5115		
20	6	0,045253509	396,4207422	216	85626,88031	Tuotettu energia vuodessa (Wh):	245603,5484
21	7	0,016978823	148,7344935	343	51015,93127	Tuotettu energia vuodessa (kWh):	245,603548
22	8	0,005240942	45,91065601	512	23506,25588	Tuotettu energia vuodessa (MWh):	0,245603548
23	9	0,001337436	11,7159413	729	8540,921207	Hetkellinen tuotettu teho keskittuulella (W):	15,3
24	10	0,000283102	2,47997417	1000	2479,97417		
25	11	4,98253E-05	0,436469234	1331	580,9405503		
26	12	7,30387E-06	0,063981925	1728	110,5607669		
27	13	8,92959E-07	0,007822325	2197	17,18564706		
28	14	9,11453E-08	0,000798433	2744	2,190898998		
29	15	7,7735E-09	6,80958E-05	3375	0,229823428		
30	16	5,54326E-10	4,8559E-06	4096	0,019889761		
31	17	3,30686E-11	2,89681E-07	4913	0,001423203		
32	18	1,65106E-12	1,44633E-08	5832	8,43498E-05		
33	19	6,90189E-14	6,04606E-10	6859	4,14699E-06		
34	20	2,41641E-15	2,11677E-11	8000	1,69342E-07		
35	21	7,08739E-17	6,20855E-13	9261	5,74974E-09		
36	22	1,74188E-18	1,52589E-14	10648	1,62476E-10		
37	23	3,588E-20	3,14309E-16	12167	3,8242E-12		
38	24	6,19537E-22	5,42714E-18	13824	7,50248E-14		
39	25	8,96867E-24	7,85655E-20	15625	1,22759E-15		
40	26	1,08867E-25	9,53672E-22	17576	1,67617E-17		
41	27	1,1082E-27	9,70787E-24	19683	1,9108E-19		
42	28	9,46129E-30	8,28809E-26	21952	1,8194E-21		
43		0,985325945			451719,9257		
44		Kokonais todennäköisyys			Integroitu: β * Tunnit vuodessa * Tuulisuus korotettuna (h*(m/s)³)		
45							
46							

$$W_a = \frac{5}{27} * \frac{\rho}{2} * A * T * \left(\int_y^{\beta * h_a * x^3} dx \right)$$

$$=H13*(H14/2)*H15*H16*(E44-H19)$$

KUVA 11. Kuvakaappaus Excelistä. Pientuulivoimalan energiantuotto vuodessa 3 m/s keskittuulella, joka on tässä esimerkissä 245 kWh.

Saadut kilowattitunnit vuodessa voidaan kertoa sähkön hinnalla, johon on lisätty sähkönsiirtomaksut ja verot. Yhteensä sähkön hinnaksi tulee 19 senttiä/kilowattitunti, jota on käytetty tässä työssä. (Energiateollisuus) Tuotettu energia, jota ei tarvitse ostaa sähköverkosta, on tuulivoimalan tekemä taloudellinen tuotto.

7 KANNATTAVUUSLASKELMA

Kannattavuuslaskelma tehtiin käyttämällä Exceliä. Excelille syötettiin erilaisia olosuhteita, joiden mukaan laskentamalli antoi tuloksen. Kaikissa laskuissa oletuksena oli, että valaisin on nimellisteholtaan 68,5 W, tuulivoima alkaa tuottaa energiaa 2 m/s tuulella, tuulivoimalan ottama energia tuulesta on 18,5 % tuulen maksimienergiasta ja ilman tiheys on 1,225 kg/m³.

7.1 Käyttökohde 230 V AC-valaisin

Kun halutaan nimellisteholtaan 68,5 W valaisimen toimivan lähes aina, kun sähkön kulutusta tarvitaan, tuulivoimalan koko ja tuulisuus pitäisi olla taulukon 2 mukaisesti. Jos varavoimalähdettä ei ole, kuten akkua tai verkkovirtaa, niin tuulisuuden pitäisi olla taulukossa ilmoitetun valaisimen tarvitseman tehon mukainen aina, kun valoa tarvitaan. Jos tuulivoimalan tuottama energia voidaan välivarastoida akkuun, vuoden tuulen keskiarvo tuottaa tarpeeksi energiaa vuoden kulukselle. Valaisimen vuosikulutus on 179 kWh, joka myös vaaditaan tuulivoimalan tuotoksi vuodessa, jos käytetään akkua. Vaadittu tuottomäärä on saatu kertomalla valaisimen teho (68,5 W) vuoden käyttötunneilla (3934 h) ja mukaan on otettu kappaleessa 4.1 esitetty valaisimen säädetty teho.

TAULUKKO 2. Tuulen nopeuden minimikeskiarvot akulla ja ilman akkua, jotta vaatimus valaisimen tarvitsemasta 179 kWh:n vuosituotannosta täyttyy.

tuulivoimala pinta-ala (m ²)	tuulen keskiarvo (m/s) (akku välivarastona)	valaisimen tarvitseva teho tuulena (m/s)
5	2,72	4,94
3,5	3,04	5,57
2	3,63	6,71

Taulukosta huomataan, että mitä suurempi tuulivoimala on, sitä vähemmän se tarvitsee tuulta täyttääkseen vaaditun energiantuoton. Akku on myös lähes aina

välttämätön, sillä jatkuvat 5 m/s tuulet ovat harvinaisia Suomessa. Sitä pienemmät tuulet eivät riitä tuottamaan valaisimen tarvitsemaa 68,5 W tehoa aina, kun valaisua tarvitaan.

Tuulivoimalan yksinkertaistettu takaisinmaksuaika lasketaan kaavalla 7.

$$a_{maksu} = \frac{t}{W * c} \quad (7)$$

- a_{maksu} takaisinmaksuaika vuosina (a)
 t tuulivoimalan hinta (€)
 W tuotettu sähkö (kWh)
 c sähkön hinta + siirtomaksu + vero (€)

Sähkön hinnan, siirtomaksun ja verojen ollessa yhteenlaskettuna 19 senttiä/kilowattitunti ja vaaditun tuulivoimalan tuotto vuodessa 179 kWh saadaan taulukon 3 mukainen takaisinmaksuaika erilaisilla tuulivoimalan hankintahinnoilla. Laskennassa on oletettu, että kaikki tuotettu energia on käytetty.

TAULUKKO 3. Tuulivoimalan takaisinmaksuaika

tuulivoimalan ostohinta (€)	1000	4000	10000	15000
takaisinmaksuaika akulla (a)	29	118	294	441

Takaisinmaksuaika on liian pitkä jopa halvimmallalla hankintahinnalla, kun tavoitteena on saada taloudellisesti kannattava tuulivoimala. Hyvä takaisinmaksuaika olisi alle kymmenen vuotta. Lisäongelmana on epäluotettavuus, sillä tuulisuuden tulisi olla riittävän suuri aina, kun valaisimen pitäisi valaista.

7.2 Käyttökohde kymmenen 230 V AC-valaisinta akulla

Jos kymmenen 68,5 W valaisimen ryhmälle tehtäisiin jokaiselle oma tuulivoimala, sekä yksi akku varavirtalähteeksi, niin tuulivoimalan koon ja tuulen nopeuden keskiarvo tulisi olla taulukon 4 mukainen. Laskelmissa on oletettu, että valot voisivat olla päällä täydellä teholla 20 tuntia pelkästään täyden akun avulla. Akun kapasiteetti olisi tuolloin noin 14 kWh. Jotta akussa olisi tarpeeksi varausta aina

tarvittaessa, niin vaadittu tuotto on laskettu kaksinkertaiseksi kulutukseen nähden, eli tuottovaatimus on 358 kWh vuodessa. Asennuksen hinta nousee laske-
tusta, sillä pientuulivoimaloiden välimatkat ovat pitkät ja ne kaikki on oletetusti
kytketty yhteen akkuun, jolloin kaapelivetojen pituudet ovat kasvaneet. Toisaalta
tällöin kytkentä ei tarvitsisi olla mukana sähköverkossa. Pienin tarvittava tuulen
keskiarvo esitellään taulukossa 4 ja takaisinmaksuaika taulukossa 5.

TAULUKKO 4. Kymmenen tuulivoimalaa + akku syöttämässä kymmentä valai-
sinta. Tuulen keskiarvo kertoo pienimmän tarvittavan tuulen keskiarvon vuoden
ajalta.

Tuulivoimala koko (m ²)	Tuulen keskiarvo (m/s)
5	3,38
3,5	3,80
2	4,57

Taulukosta huomataan, että tuulen keskiarvo nousi hieman verrattuna tauluk-
koon 3, koska myös energian tuottovaatimusta nostettiin kaksinkertaiseksi. 0,5
m/s tuulen nopeuden kasvu riittää saavuttamaan korotetun energian tuottovaati-
muksen.

Tuulivoimalan takaisinmaksuaika akun kanssa lasketaan kaavalla 8.

$$a_{maksu} = \frac{t + b + b_{lisä}}{W * c} \quad (8)$$

b akku (€)

$b_{lisä}$ muut lisäosat (€)

TAULUKKO 5. Kymmenen tuulivoimalan takaisinmaksuaika, kun ostohintaan on lisätty akun ja muiden lisäosien ostohinnat.

akun ostohinta (€)	7500			
muut lisäosat ostohinta (€)	340			
yhden tuulivoimalan ostohinta (€)	1000	4000	10000	15000
takaisinmaksuaika (a)	26	70	159	232

Kulutuksen pysyessä vakiona taulukossa 4 ja siinä vaaditun keskituulisuuden arvon toteutuessa, jokaisen tuulivoimalan koon takaisinmaksuaika on sama taulukossa 5. Taulukosta 5 huomataan, että takaisinmaksuaika ja tarvittava tuulisuus pienenevät verrattuna taulukkoon 3, kun akku ja muut lisäosat lisättiin kytkentään ja tuulivoimaloiden määrää lisättiin kymmeneen. Takaisinmaksuajan pieneneminen syntyy siitä, kun tuulisuuden ja kulutuksen ei tarvitse olla samanaikaisia. Kovalla tuulella, mutta valoisalla voidaan ottaa talteen energiaa ja käyttää sitä myöhemmin tyynellä ja pimeällä hetkellä. Takaisinmaksuaika on silti liian pitkä.

7.3 Kannattava pystyakselinen tuulivoimala

Taloudellisesti kannattavana voidaan pitää esimerkin omaisesti kymmenen vuoden takaisinmaksuaikaa. Tähän pystyvät nykyaikaiset suuret vaaka-akseliset tuulivoimalat ilman tariffimaksuja. (Alkio J. 2018.)

7.3.1 Pystyakselinen ilman akkua

Tarkastellessa pelkästään yksittäistä pientä pystyakselistä tuulivoimalaa, joka on kytkettynä suoraan kulutuskohteeseen (68,5 W), saadaan taulukon 6 mukaisia keskituulisuuden tuloksia kymmenen vuoden takaisinmaksuajalla. Oletuksena on se, että ylimääräinen energia saadaan myytyä kantaverkkoon ja sieltä saadaan tarvittaessa energiaa, jos tuulta ei ole kulutuksen aikana. Tämän takia tarvitaan invertteri, joka osaa suunnata tuulivoimalalta tulevan sähkön verkon sähkötä vastaan. Tällainen invertteri maksaa n. 1500 euroa. Oletetaan, että ylimääräinen

energia myydään samalla hinnalla kuin ostettaessa. Tämä oletus pitää tehdä sen takia, koska ei pystytä laskemaan ylimääräisen energian määrää. Käytännössä todellinen myyntihinta on noin yksi kolmasosa ostohinnasta, koska myyntihinnassa ei hyvitetä siirtomaksua eikä veroa. Tulokset antavat siis optimistisen tuloksen, eli käytännössä keskituulisuus tulisi olla suurempi.

TAULUKKO 6. Tuulivoimalan ilman akkua tarvitseva keskituulisuus (m/s) kymmenen vuoden takaisinmakuajalla. Tulokset merkitty harmaalla taustalla.

tuulivoimalan pinta-ala (m ²)	tuulivoimalan hinta (€)			
	1000	4000	10000	15000
5	5,18	6,73	8,62	9,78
3,5	5,83	7,58	9,76	11,21
2	7,03	9,17	12,24	15,35

Taulukosta nähdään, että keskituulisuus tulisi olla todella suuri, jotta päästäisiin kymmenen vuoden takaisinmaksuajkaan.

7.3.2 Pystyakselinen akun kanssa

Jos tarkastelua muutetaan siten, että siinä on mukana kymmenen pientuulivoimalaa, akku ja muut tarvittavat komponentit, saadaan taulukon 7 mukaiset tulokset kymmenen vuoden takaisinmaksuajalle.

TAULUKKO 7. Kymmenen tuulivoimalan, akun (7500 e) ja muiden osien (340 e) kanssa tarvitseva keskituulisuus kymmenen vuoden takaisinmakuajalla. Tulokset merkitty harmaalla taustalla (m/s).

tuulivoimalan pinta-ala (m ²)	tuulivoimalan hinta (€)			
	1000	4000	10000	15000
5	4,63	6,43	8,44	9,62
3,5	5,22	7,24	9,54	11,00
2	5,83	8,10	10,81	12,83

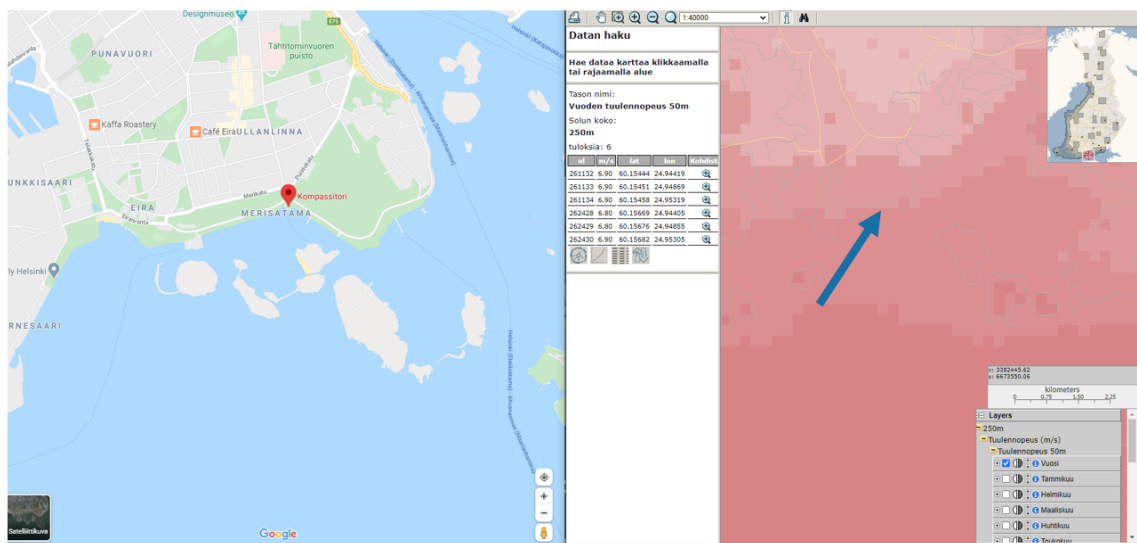
Tuloksista nähdään, että kymmenen vuoden takaisinmaksuajkaan ei tarvita niin suurta keskituulisuutta vuodessa, kuin taulukossa 6. Keskituulisuuden lasku tulee

siitä, että akun tuoma energian varastointimahdollisuus tasoittaa energian tuoton- ja kulutuksen välistä eroa. Haasteeksi tulee asentamisen vaikeus, sillä on vaikeampaa löytää sopiva paikka kymmenelle lähekkäin olevalle pientuulivoimalle kuin yhdelle.

8 KOHDETARKASTELU

Tässä luvussa esitellään mahdollisesti sopivia paikkoja, joita voisi tarkistaa erillisellä tuulenmittauksella. Suuntaa antavat tuulisuusarviot ovat tehty samalla tavalla kuin neljännessä luvussa.

Ensimmäinen paikka on Helsingin rannalla sijaitseva Kompassitori. Alueella on paljon rantabulevardia, jossa yhdistyisivät useat valaisinpylväät, tuulisuus ja valaisun tarve. Kuvissa 12 ja 13 on kuvattu paikan sijainti ja näkymä.



KUVA 12. Kompassitori, Helsinki ja Tuuliatlaksen näkymä. Nuoli osoittaa, mistä kohtaa mittausarvot ovat otettu.



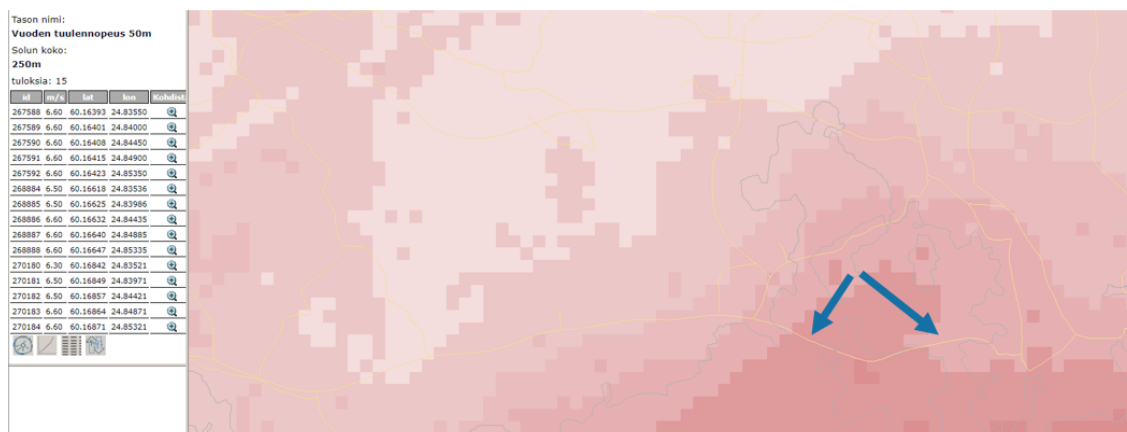
KUVA 13. Kompassitori, Helsinki. Katunäkymä. Ympyröitynä sopivat paikat pien-tuulivoimaloille valaisinpylväiden päälle.

Tuuliatlaksen mukaan alueen vuoden keskituulisuus 50 metrin korkeudessa on 6,9 m/s. Alueen vuoden keskituulisuus 15 metrin korkeudessa on 3,98 m/s. Tämä on Suomen tuulisuudelle hyvä lukema. Toisaalta valaisintolpat ovat lyhyemmät kuin autotiellä, joten tuulivoimalan napakorkeus jäisi alle kymmenen metriin, jolloin tuulivoimalan tuotto laskisi.

Toinen paikka on Helsingin Lauttasaaren sillat. Hyvä puolena on suuri asennuskorkeus valaisimien päälle, meren läheisyys ja valaisun tarve. Kuvissa 14 ja 15 näkyvät sillan sijainti ja näkymä, sekä Tuuliatlaksen näkymä.



KUVA 14. Helsinki, Lauttasaari. Nuolet näyttävät kuvien ottopaikan.

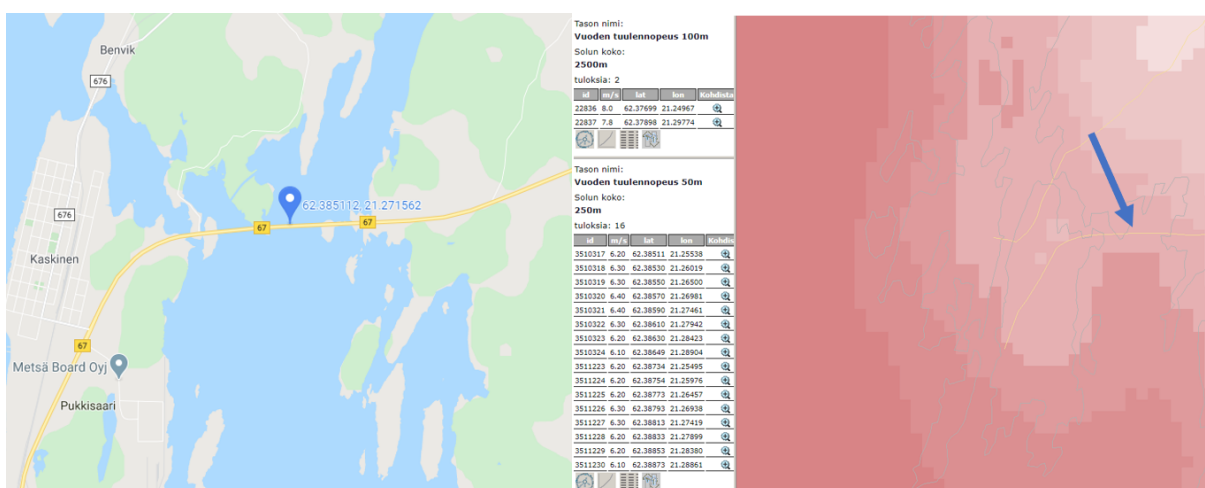


KUVA 15. Helsinki, Lauttasaari. Tuuliatlaksen näkymä. Nuolet osoittavat, mistä kohtaa mittausarvot ovat otettu.

Tuuliatlaksen mukaan alueen vuoden keskituulisuus 50 metrin korkeudessa on 6,5 m/s. Alueiden vuoden keskituulisuus 15 metrin korkeudessa on 3,75 m/s, joka on keskiverto lukema. Silta ja valaisinpylväät nostavat tuulivoimalan napakorkeuden n. 20 metriin, joka nostaa tuulisuusarviota hiukan ylöspäin.

Kolmas paikka on Länsi-Suomessa, Kantatie 67, Kaskinen. Tie on siitä erikoinen, että siellä ei ole katuvalaistusta. Paikka on lähellä merta, jolloin siihen voisi ehkä tehdä tien valaistuksen ilman, että liittäisi valaistusta sähköverkkoon.

Kuvissa 16 ja 17 näkyvät tien 67 sijainti ja näkymä, sekä Tuuliatlaksen näkymä.



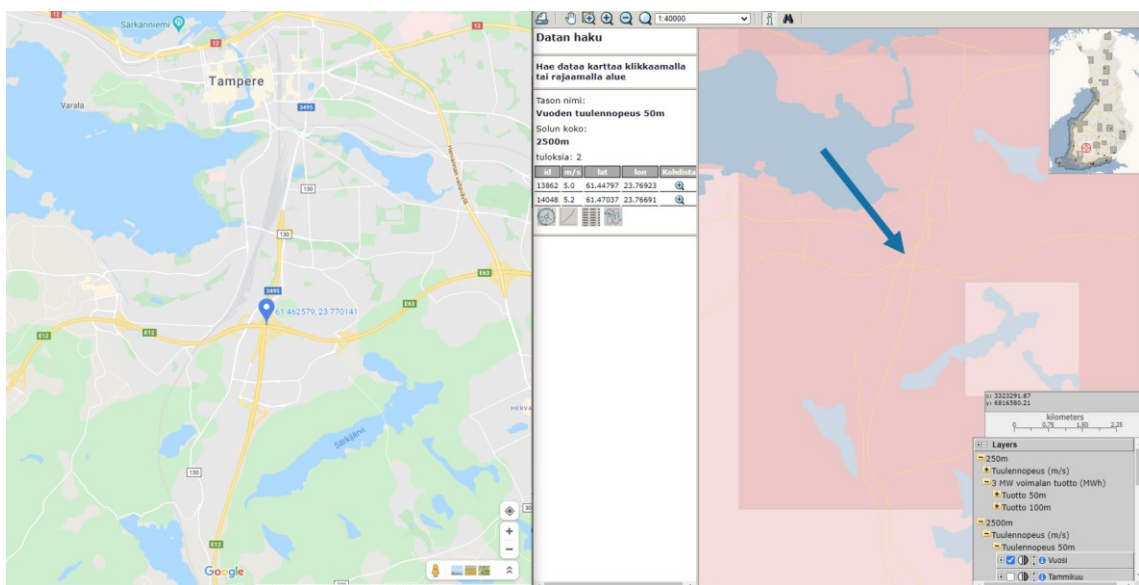
KUVA 16. Tie 67, Kaskinen ja Tuuliatlaksen näkymä. Nuoli osoittaa, mistä kohtaa mittausarvot ovat otettu.



KUVA 17. Kantatie 67, Kaskinen.

Tuuliatlaksen mukaan alueen vuoden keskituulisuus 50 metrin korkeudessa on 6,2 m/s. Alueiden vuoden keskituulisuus 15 metrin korkeudessa on 3,58 m/s, joka on minimituulisuuden rajalla.

Neljäs paikka on Tampereella sijaitseva Pyhäjärven ramppi. Rampin päällä olevien valaisinpylväiden korkeus nousee maasta mitattuna arviolta n. 35 metriin. Rampin ympäristö on samankaltainen kuin risteuksen: siellä on suuri tarve valaistukselle, sekä suorita teitä neljään suuntaan. Kuvissa 18 ja 19 Pyhäjärven rampin sijainti, sekä Tuuliatlaksen näkymä.



KUVA 18. Pyhäjärven ramppi sekä Tuuliatlaksen näkymä. Nuoli osoittaa, mistä kohtaa mittausarvot ovat otettu.



KUVA 19. Tampere, Pyhäjärven ramppi.

Tuuliatlaksen mukaan alueen vuoden keskituulisuus 50 metrin korkeudessa on 5,1 m/s. Alueiden vuoden keskituulisuus 15 metrin korkeudessa on 2,9 m/s, mutta koska tuulivoimalan napakorkeus tulisi olemaan n. 35 metrin korkeudessa, keskituulisuus nousee n. 4 m/s asti, joka riittäisi tuulivoimalalle.

9 TULOKSET

Pientuulivoimala valaisinpylvään päälle syöttämään sähköä valaisimelle ei ole taloudellisesti kannattava. Pientuulivoimala vaatisi todella tuulisen paikan, joka saattaa löytyä Suomen rannikolta, mutta silloinkin kannattavuus on epätodennäköistä. Kovempia tuulia kannattaisi etsiä esimerkiksi Britannian tai Norjan rannikolta. Suomen sisämaassa parhaita paikkoja ovat järvien rannoilla, moottoritien rampeilla ja mahdollisimman korkeilla paikoilla.

Tällä hetkellä pysty akselinen tuulivoimala maksaa noin. 5000 euroa, joka on liian kallis. (Windside. Pientuulivoimala mökkiläiselle tiedot.) Hintaan saisi varmasti alennusta suuremmilla tilauksilla, mutta sähköntuotto jää silti liian pieneksi. Kannattavuutta parantaisi sähkönhinnan nousu.

Akku on hyvä lisä järjestelmään, sillä se poistaa tuotannon ja kulutuksen eriaikaisuuteen liittyvän ongelman, mutta riittävän suuri akku tuo hintaa lisää. Toteutus tapa vaatii useamman tuulivoimalan ryhmän, jolloin etäisyydet kasvavat. Etäisyys kasvattaa häviöitä, jotka pienentävät hyötysuhdetta. Toisaalta akun käyttö pienentää tarvittavaa keskituulisuuden suuruutta, jonka takia kannattaa lisätä mieluummin useampi pientuulivoimala lähekkäin syöttämään energiaa akulle, kuin kytkeä pientuulivoimala syöttämään suoraan sähköä valaisimelle.

Työssä ei ole otettu huomioon asennuksen tai huollon hintaa. Asennustyöt kannattaisi tehdä samaan aikaan, kun vanhoja valaisimia vaihdetaan valaisinpylväisiin suurpainenaatriumista ledeihin ja kun ledejä joudutaan puhdistamaan.

10 POHDINTA

Opinnäytetyössä tarkasteltiin pientuulivoimalan käyttöä energian tuottamisessa valaisinpylväiden päällä. Työhön kuuluu pientuulivoimalan teoriaan perehtyminen, joka on samankaltainen kuin perinteisessä suuressa tuulivoimalassa, mutta hyötysuhde on pienempi.

Kaupunki olisi oivallinen paikka pientuulivoimalalle, koska energian kulutusta on lähellä, mutta käytännössä katutasolla tai edes valaisinpylvään päällä ei tuule tarpeeksi. Paras paikka kaupungissa on mahdollisimman korkea paikka. Kaupungin tuulisuutta tarkasteltiin Tuuliatlaksen avulla, joka on suuntaa antava, mutta ei tarkka. Tuuliatlas ei ota huomioon teiden tuomia tuulireittejä, vaan se painottaa enemmän asennuskorkeutta. Kun sopiva paikka löytyy Tuuliatlaksen avulla, kannattaa asentaa todellinen tuulimittaus paikanpäälle varmistukseksi.

Selvitettyä pylväsvalaisimen kulutuksen ja tuulivoimalan tuotto-odotuksen, pystyttiin tekemään laskentamalli. Laskentamallilla voi laskea tuulivoimalan energian tuoton vuodessa erilaisilla keskituulisuuksilla, pinta-aloilla, käynnistystuulella tai laskea, kuinka paljon pitäisi keskituulisuuden olla, jotta saavutettaisiin haluttu energian vuosituotto. Samalla laskentamalli ilmoittaa karkeasti tuulivoimalan takaisinmaksuajan vuosina. Laskentamallia käyttämällä pystytään toteamaan, että pääsääntöisesti ei ole kannattavaa asentaa tuulivoimaa katutason yläpuolelle Suomessa. Vaikka asennus olisi moottoritielle, jonka valaisinpylvään korkeus on jopa 18 metriä, niin tuotto jää pieneksi, koska moottoriteiden vieressä olevat puut kasvavat yhtä korkealle. Puiden latvat hidastavat tuulen kulkua merkittävästi. Moottoritien varrella olevia peltoaukeita kannattaa hyödyntää, sillä silloin tuulella on vapaampi reitti kulkea myös moottoritien yli.

Pientuulivoimalan ulkonäöllä on väliä, sillä se on jatkuvasti näkösällä. Pystyakselinen tuulivoimala olisi luonnollinen jatke valaisinpylväälle toisin kuin vaaka-akselinen tuulivoimala.

Työ tuotti laskentamallin, jolla voi etsiä mahdollisia paikkoja pientuulivoimalle teiden varressa. Mallista löytyvät karkeat lukemat minimituulisuudelle, tuulivoimalan koolle ja sen takaisinmaksuajalle.

LÄHTEET

Alkio J. 2018. Tuuli pärjää nyt ilman tukia - Takaisinmaksuaika ehkä vain kymmenen vuotta: Näin se käy. Tekniikka & Talous (8.9.2018)

<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tuuli-parjaa-nyt-ilman-tukia-takaisinmaksuaika-ehka-vain-kymmenen-vuotta-nain-se-kay/cb17659d-fc02-3a0e-8a76-56e2e78c4593>

Energiateollisuus. Sähkönsiirron hinnoittelu, 15.2.2017. PowerPoint esitys. Luettu 3.7.2020

https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkonsiirron_hinnoittelu.html#material-view

Hyötytuuli. Reposaaressa tuulipuisto. Luettu 8.6.2020

<https://hyotytuuli.fi/tuulipuistot/reposaaren-tuulipuisto/>

Jamie Bull & Gavin D. j. Harper, K. 2010. Small-scale wind power generation. Ramsbury, Marlborough: The Crowood Press Ltd.

Jussinmäki. Invertteri 24V-230V 1000W. Luettu 6.7.2020

<https://www.jussinmaki.net/autosahko/tuote/invertteri-24v-230v-1000w-new/G-24-100/>

Kangas S. 2018. TUULISUUS KAUPUNGIN ULKOKOTILOJEN SUUNNITTELUSSA. Maisema-arkkitehtuurin koulutusohjelma. Aalto Yliopisto. Kandidaatin työ.

https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/31859/bachelor_Kangas_Sofia_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Kankare M. 2019. "Suomessa pyörii kohta 300 tuulivoimalaa ilman veronmaksajien tukea" – Vireillä 103 voimalaa, edessä vielä miljardin investoinnit. Uusi Suomi (23.4.2019)

<https://www.uusisuomi.fi/uutiset/suomessa-pyorii-kohta-300-tuulivoimalaa-ilman-veronmaksajien-tukea-vireilla-103-voimalaa-edessa-viela-miljardin-investoinnit/4a265876-a1b3-38c2-af0b-6cb124de8514>

Kodin energia. Verkkoinvertterit. Luettu 6.7.2020

<https://sites.google.com/site/kodinvihreaenergia/verkkoinvertterit>

Leena Iisakkilä, K.1977. Perustietoa maisemaan vaikuttavista luonnontekijöistä.
Espoo: Otapaino

Leukumaavaara J. 2012. Tunturi-Lapissa tuulivoima väistyy matkailun tieltä.
Helsingin sanomat (25.10.2012)

<https://www.hs.fi/kotimaa/art-2000002574832.html>

Liikennevirasto. Maantie- ja rautatiealueiden valaistuksen suunnittelu,
13.5.2015.

Liikenneviraston ohje. Luettu 11.6.2020

https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2015-16_maantie_rautatiealueiden_web.pdf

Liikennevirasto. Tien valaisimien laatuvaatimukset, 13.5.2016. Liikenneviraston
ohje. Luettu 11.6.2020

https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/ohje_2016_tien_valaisimien_web.pdf

Nettikalenteri. Auringon nousu- ja laskuajat. Luettu 22.6.2020

<https://www.paivyri.fi/>

Nikkilä M. 2019. Tuulivoimaa rakennetaan jo ilman tukea, syöttötariffi kantaa
hedelmää Viinämäki Simon ja Kuivaniemen rajalla näyttää esimerkkiä. Lapin
Kansa (7.6.2019)

<https://www.lapinkansa.fi/tuulivoimaa-rakennetaan-jo-ilman-tukea-syottotariff/169215>

Patel S. 2019. First Floating Offshore Wind Farm to Power Oil and Gas Platforms Kicks Off. Powermag (31.10.2019)

<https://www.powermag.com/first-floating-offshore-wind-farm-to-power-oil-and-gas-platforms-kicks-off/>

Pientuulivoimala-yhteistyöryhmä. 2012. Omaa energiaa. LönnbergPrint Oy. Luettu 1.7.2020

https://www.motiva.fi/files/6107/Omaa_tuulienergiaa.pdf

Saaristotekniikka. Tuulivoimalan hybriidi lataussäädin 800W 12/24 volt. Luettu 6.7.2020

<https://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/product/174/tuulivoimalan-hybriidi-lataussaadin-800w-1224-volt>

Suomen tuuliatlas. Tuulisuus Suomessa. Luettu 10.6.2020

<http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>

Suoniemi K. 2011. PIENTUULIVOIMAN SUUNNITTELU JA TUOTANNON ENNUSTUS KULUTTAJAN NÄKÖKULMASTA. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22242/Suoniemi.pdf?sequence=3>

Tampereen kaupunki. Tampereen kaupungin energia- ja ilmastotoimien raportti 2012. Raportti. Luettu 2.7.2020. https://www.tampere.fi/liitteet/e/6H7oY-auNJ/Tampereen_energia-_ja_ilmastotoimien_raportti_2012.pdf

Tesla. Powerwall. Luettu 20.6.2020

https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall

Tiehallinto. Tievalaistuksen suunnittelu. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Sivut 31-46, 77-110. Luettu 10.6.2020

https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100034-v-06tievalaist_suunn.pdf

Tuuliatlas. Luettu 20.6.2020

<http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>

Tuulivoimayhdistys. Pientuulivoimalan tekniikka - Tietoja rakentajalle. Luettu 20.6.2020

<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima/pientuulivoimalan-tekniikka>

Tuulivoimayhdistys. Talvella tuulee eniten. Luettu 1.6.2020

<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatuotanto/tuotannon-vaihteluvuus/talvella-tuulee-eniten>

Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimaloiden rakenne. Luettu 3.6.2020

<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>

Tuulivoimayhdistys. Tuulivoimatekniikka. Luettu 1.6.2020

<https://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka>

Vattenfall. Tuulivoima. Luettu 1.6.2020

<https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/tuulivoima/>

Vihriälä H. 2002. Control of Variable Speed Wind Turbines. Sähkötekniikan osasto. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Väitöskirja.

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114091/vihriala.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

REUK. Weibull. Luettu 20.8.2020

<http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-speed-distribution-weibull/>

Windside. Pientuulivoimala mökkiläiselle tiedot. Luettu 3.7.2020

https://www.windside.com/fi/asiakkaat_markkinat/mokkilaiset

Windside. Tekniset tiedot. Luettu 25.6.2020

https://www.windside.com/fi/tekniset_tiedot

WSP. Kipparinkatu 2 – Ankkuri-hanke, Espoo: lausunto tuulisuuden vaikutuksista. Raportti. PDF-tiedosto. Luettu 10.6.2020.