



Tuulivoiman hankealueiden uudet laskennalliset arviointimenetelmät

Juulianna Lähteinen

Opinnäytetyö, AMK

Tammikuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Lähteinen, Juulianna

Tuulivoiman hankealueiden uudet laskennalliset arviointimenetelmät.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tammikuu 2022, 55 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Hiilineutraalin tulevaisuuden vuoksi koko energia-ala käy läpi voimakasta uudistusta. Uudistuksen myötä fossiiliset polttoaineet tullaan korvaamaan vähäpäästöisellä, pääosin uusiutuvalla energialla. Maailmanlaajuisesti nopeimmin kasvavia puhtaan sähkön tuotantotapoja ovat tuuli- sekä aurinkovoima. Tällä hetkellä erityisesti uusia tuulivoiman hankealueita etsitään Suomessa jatkuvasti, minkä vuoksi myös toimeksiantaja halusi kehittää tuulivoimapalveluitaan.

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Numerola Oy. Toimeksiantona opinnäytetyölle oli luoda työkalu, jonka avulla systematisoidaan potentiaalisten tuulivoiman hankealueiden tunnistamista sekä mahdollistetaan eri hankealueiden keskinäinen vertailu. Opinnäytetyön tavoite oli työkalun kehittäminen, sen testaus ja toimivuuden arviointi. Työssä selvitettiin analyysimenetelmän ja työkalun kehittämisessä tarvittavaa tietoa tuulivoima-alan artikkeleita ja tutkimuksia hyödyntäen. Tavoitteena oli tunnistaa tuulivoimahankkeen mahdollistavat ja rajoittavat tekijät.

Työkalussa käytettäväksi laskentamenetelmäksi valittiin analyttinen hierarkiaprosessi (AHP), jota oli käytetty aiemmissa tutkimuksissa tuulivoiman hankealueiden arviointiin. Kehitettävään menetelmään haluttiin kuitenkin uutuusarvoa, mikä toteutettiin luomalla monipuolisempi kriteeristö ja automatisoimalla prosessia. Kriteeristön avulla hankealueiden potentiaalia tuulivoimatuotantoon voitiin arvioida mahdollisimman laajasti eri näkökulmista.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi vertailumenetelmä ja työkalu, joiden avulla hankealueet voidaan sijoittaa parhaimmasta huonoimpaan puhtaasti avoimesti saatavilla olevien paikkatietoaineistojen sekä laskennallisten menetelmien avulla. Laskentatyökalu vastasi sille asetettuihin tavoitteisiin, joten se voitiin todeta toimivaksi kokonaisuudessaan, vaikka kehityskohteitakin tunnistettiin. Toimeksiantaja voi jatkossa tarjota asiakkailleen uuden palvelukokonaisuuden, mikä mahdollistetaan työkalun avulla.

Avainsanat (asiasanat)

Tuulienergia, tuulivoimahanke, analyttinen hierarkiaprosessi

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Lähteinen, Juulianna

New computational assessment methods for wind power project areas.

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, January 2022, 55 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Aiming to the carbon-neutral future the entire energy sector is undergoing a major overhaul. Because of this reform, fossil fuels will be replaced mainly by low-emission renewable energy. Wind and solar power are the fastest growing clean electricity production methods worldwide. In Finland, especially new wind power areas are identified continuously. That's the reason why commissioner wanted to develop their own wind power services.

The thesis was commissioned by Numerola Oy. The assignment for the thesis was to create a tool to systematize the identification of potential wind power implementation areas and to enable comparison between them. The aim of the thesis was to develop the tool, test it and evaluate its functionality and useability in analyzing different cases. The work examined the information that is necessary to develop the assessment method and the tool by using articles and studies in the field of wind power. The aim was to identify the enabling and restrictive factors of the wind power project.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) was selected for the calculation method because it has been used in previous studies to assess wind power implementation areas. The commissioner wanted more novelty value for the assessment, so we decided to create a more versatile criterion for the AHP as well as to automate the assessment process. The criteria made it possible to assess the potential of the project areas for wind power production from the widest possible perspective.

As a result of the thesis, the new comparison method and the related tool was created. It makes possible to organize wind power implementation areas placed from the worst to the best. The tool uses only openly available spatial datasets and computational methods. The calculation tool responded to the objectives set for it. The calculation tool met its objectives, so it could be evaluated to be fully operational, although areas for improvement were identified. The tool enables a new service package which the thesis commissioner can offer to customers in future.

Keywords/tags (subjects)

Wind energy, wind power project, Analytic Hierarchy Process (AHP)

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto.....	7
1.1	Toimeksiantaja, aiheen tausta ja tavoitteet	8
1.2	Tutkimusasetelma	8
1.3	Luotettavuus ja eettisyys	9
2	Tuulivoimahankkeen eteneminen	10
3	Tuulivoimahankkeen arviointi	13
3.1	Toteutusta rajoittavat tekijät	13
3.1.1	Asutus	13
3.1.2	Luontoarvot.....	14
3.1.3	Maisema-arvot	15
3.1.4	Kulttuuriarvot.....	16
3.1.5	Lentoturvallisuus	16
3.1.6	Puolustusvoimat.....	19
3.1.7	Kaavoitus ja maanomistus	19
3.1.8	Sähköverkko	20
3.2	Teknistaloudelliset tekijät	21
3.2.1	Tuulisuus	21
3.2.2	Tiestö	21
3.2.3	Voimaloiden sijoittelu.....	22
3.2.4	Maaperä.....	22
4	Analytic Hierarchy Process = Analyttinen hierarkiaprosessi	23
4.1	Vaiheiden esittely	24
4.1.1	Hierarkian muodostaminen	24
4.1.2	Päätöksenteon elementtien parivertailu.....	25
4.1.3	Johdonmukaisuuden tarkastelu	30
5	Kriteeristö	33
5.1	Tuotantoarvio	34
5.2	Turbiinien lukumäärä.....	35
5.3	Asutus	36
5.4	Sähkölinja	37
5.5	Tiestö.....	38
5.6	Luonnonsuojelualueet	39
5.7	Maisema.....	40

5.8	Korkeusrajoite	41
5.9	Maanomistus.....	42
5.10	Kuljetus	43
6	Alueiden vertailu	44
6.1	Alue-ehdokkaiden esittely	44
6.2	Työkalun testaus.....	45
6.3	Työkalun toimivuuden arviointi	48
6.3.1	Vahvuudet	48
6.3.2	Kehityskohteet	48
7	Pohdinta	50
	Lähteet	52

Kuviot

Kuvio 1.	Tuulivoimahankkeen vaiheet (Aikio 2021, 7, muokattu).....	10
Kuvio 2.	Lentoasemien ympäristössä olevat rajoitusalueet Suomessa. Karttakuva sisältää Fintraffic lennonvarmistuksen 4/2018 aineistoa.	17
Kuvio 3.	Helsinki-Vantaa lentoaseman ympäristössä olevat korkeusrajoitteet. Karttakuva sisältää Fintraffic lennonvarmistuksen 4/2018 aineistoa.....	18
Kuvio 4.	Hierarkiapuu	25
Kuvio 5.	Sakko rakennuskorkeuden mukaan	41
Kuvio 6.	Alue-ehdokkaat kartalla.....	44
Kuvio 7.	Alue-ehdokkaat maakunnittain.....	45
Kuvio 8.	Alueiden luokitukset keskimääräisen sijoituksen mukaan	47

Taulukot

Taulukko 1.	Parivertailussa käytettävä asteikko (Saaty 1987, 163, muokattu)	26
Taulukko 2.	Vaihtoehtojen parivertailu	27
Taulukko 3.	Matriisin arvojen normalisointi	27
Taulukko 4.	Painoarvojen määrittäminen	28
Taulukko 5.	Kriteerien painoarvojen laskenta.....	29
Taulukko 6.	Vaihtoehtojen kokonaispainoarvojen määrittäminen.....	29
Taulukko 7.	Johdonmukaisuuden tarkastelu.....	31
Taulukko 8.	Satunnaisindeksi RI (Saaty 1987, 171)	31

Taulukko 9. Kohteissa käytetyt yleiset tuotantohäviöarviot.....	34
Taulukko 10. Kapasiteettikertoimen arvotaulukko	35
Taulukko 11. Turbiinien lukumäärä arvotaulukko	36
Taulukko 12. Asutuksen arvotaulukko	36
Taulukko 13. Sähkölinjan arvotaulukko	38
Taulukko 14. Tiekilometrien arvotaulukko.....	39
Taulukko 15. Painotettujen luonnonsuojelualueiden arvotaulukko	40
Taulukko 16. Maiseman arvotaulukko.....	40
Taulukko 17. Korkeusrajoitteen arvotaulukko	42
Taulukko 18. Kiinteistölukumäärän arvotaulukko	43
Taulukko 19. Kuljetuksen arvotaulukko	43
Taulukko 20. Alue-ehdokkaiden saamat pisteet	45
Taulukko 21. Kriteerien painoarvot	46

1 Johdanto

Energiasektori on valtavassa muutostilassa, sillä fossiilisista polttoaineista halutaan päästä mahdollisimman nopeasti eroon. Fossiilisia polttoaineita tullaan korvaamaan yhä enemmän ja enemmän uusiutuvalla energialla. Uusiutuvalla energialla on iso rooli hiilidioksidipäästöjen alentamisessa sekä ilmastomuutoksen hillinnässä. Globaalisti nopeimmin kasvavia puhtaan sähkön tuotantotapoja ovat tuulivoima sekä aurinkovoima. (Miksi tuulivoimaa n.d.) Erityisesti uusiin tuulivoimahankkeisiin investoidaan Suomessa kovalla vauhdilla.

Suomessa oli vuoden 2020 lopulla 821 toiminnassa olevaa tuulivoimalaa. Tuulivoimakapasiteetti oli 2586 megawattia (MW) ja sillä tuotettiin vuoden 2020 aikana yhteensä 7,8 terawattituntia (TWh) sähköä. Tuulivoimatuotanto kattoi tuolloin Suomen sähkönkulutuksesta 10 prosenttia ja 12 prosenttia sähköntuotannosta. (Tuulivoima Suomessa 2020.) Uusia meri- ja maatuulivoimahankkeita oli julkaistu vuoden 2021 alussa noin 21 300 megawatin edestä (Tuulivoimahankkeet Suomessa 2021). Mikäli kaikki hankkeet toteutuisivat, Suomen tuulivoimakapasiteetti moninkertaistuisi.

Uusia tuulivoima-alueita haetaan aktiivisesti ympäri Suomea. Tuulivoimahankkeen sijoittelussa tulee ottaa lukuisia eri asioita huomioon ja niistä tullaan kertomaan lisää opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksen osiossa. Opinnäytetyössä keskityttiin tuulivoimahankkeen rajoittaviin ja mahdollistaviin tekijöiden ja vertailtiin tuulivoimakohteita näiden tekijöiden suhteen. Opinnäytetyön toiminnallisessa osuudessa tunnistettiin mahdollisia tuulivoima-alueita, selvitettiin tarkemmin niiden yksityiskohtaisempia tietoja sekä vertailtiin eri hankealueita keskenään.

Opinnäytetyössä käytetty tuulivoimakohteiden vertailumenetelmä perustui avoimesti saatavilla oleviin paikkatietoaineistoihin. Paikkatiedot on lisensoitu Creative Commons Nimeä 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>. Opinnäytetyö sisältää Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan, Suomen Ympäristökeskuksen (SYKE) ja BirdLife Suomi Ry:n 11/2021 aineistoja sekä Fintraffic lennonvarmistuksen 4/2018 aineistoa.

1.1 Toimeksiantaja, aiheen tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Numerola Oy, joka on perustettu vuonna 1998. Numerolan kotipaikkakunta on Jyväskylä. Yritys on Suomen johtava simulointipalvelujen toimittaja. Numerola tuottaa palveluita tuuli- ja aurinkovoiman, teollisuuden, sähköverkkojen sekä kaupunkisuunnittelun osa-alueilla. Osaamisalueita ovat mallinnus, simulointi ja optimointi, tekninen laskenta sekä ohjelmistoteknologia. (Laskennallisten menetelmien kärkiasiantuntija n.d.) Numerola Oy on nykyään osa AFRY Finland Oy:tä.

Toimeksiantaja halusi kehittää tuulivoimapalveluitaan, sillä yrityksessä arvioitiin asiantuntija-arvoina potentiaalisia tuulipuistoalueita pääasiassa paikkatietoaineiston avulla. Alueita ei kyseisellä työskentelytavalla ollut mahdollista laittaa paremmuusjärjestykseen – ainakaan kovin selkeästi ja perustellusti. Toimeksiantaja halusi sujuvoittaa potentiaalisten tuulipuistoalueiden tunnistamista sekä mahdollistaa niiden keskinäisen vertailun jo hankealuetta valittaessa.

Toimeksiantajalla oli suunnitelmissa kehittää työkalu, jonka avulla voidaan vertailla systemaattisesti eri tuulipuistoalueita. Työkaluun haluttiin täysin paikkatietoaineistoihin ja laskennallisiin menetelmiin perustuva vertailumenetelmä. Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda tämä työkalu, testata sitä ja arvioida sen toimivuus. Työkalu halutaan tulevaisuudessa automatisoida mahdollisimman pitkälle, mikä tuli ottaa huomioon työkalun kehitysvaiheessa. Opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli selvittää tekijöitä, jotka vaikuttavat oleellisesti tuulivoiman hankealueen valinnassa.

1.2 Tutkimusasetelma

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena. Kehittämistutkimus on tutkimusmenetelmänä monitahoinen, joten sille ei voida esittää yksiselitteistä määritelmää. Kehittämistutkimuksessa käytäntö ja teoria vuorottelevat ja siinä on sekä tutkimuksen että kehittämistyön osuudet. Tutkimuksen tuotoksena syntyy opinnäytetyö ja kehittämistyön kohteena voi olla esimerkiksi palvelu, tuote tai prosessi. Kehittämistutkimuksessa tukeudutaan aina laadulliseen ja määrälliseen tutkimukseen, sillä kehittämistutkimuksella ei ole omia tutkimusmenetelmiään. Kanasen (2012) mukaan voidaan yleisesti todeta, ettei kehittämistyöstä saada tutkimusta ilman laadullista tutkimusta. (Kananen 2012, 45.)

Opinnäytetyölle asetettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Mitkä tekijät rajoittavat tuulivoiman hankealueiden valinnassa?
2. Mitkä tekijät mahdollistavat tuulivoimahankkeen alueelle?
3. Miten analyttistä hierarkiaprosessia voidaan soveltaa tuulivoiman hankealueiden valinnassa?

Tutkimuskysymysten avulla haluttiin kerätä työkalun kehittämisen kannalta oleellista tietoa. Tavoitteena oli hankkia syvällisempää ymmärrystä tuulivoimahankkeen arviointiin vaikuttavista tekijöistä. Teoriaosuudessa perehdyttiin tarkasti myös käytettävään prosessiin, jotta työkalun toimivuutta voitiin arvioida mahdollisimman laajasti ja luotettavasti.

Opinnäytetyön aineisto kerättiin sisältöanalyysinä. Sisältöanalyysin tavoitteena on tiivistää käsiteltävä aineisto ja antaa yleiskuvaus sen ydinasiasta. Aineiston informaatio ei kuitenkaan saa kadota. Sisältöanalyysissä aineisto pilkotaan pienempiin paloihin, jolloin eri komponentit voidaan luokitella niiden yhtäläisyyksien mukaan. Luokittelun avulla aineisto saadaan helpommin haltuun ja voidaan kategorisoida uudelleen tiiviimpään muotoon. (Kananen 2012, 116–117.)

Tuulivoima on aiheena niin laaja, että kirjallisuuskatsauksesta rajattiin pois perustieto tuulivoimasta. Mikäli lukija haluaa perehtyä tarkemmin tuulivoiman perusteisiin, suositellaan Aki Korpelan ”Tuulivoiman perusteet” -teosta. Lisätietoa tuulivoimahankkeen suunnittelusta löytyy myös ympäristöministeriön vuonna 2016 julkaisemasta ”Tuulivoimarakentamisen suunnittelu” -ohjeistuksesta, jota käytetään alalla laajasti. Edellä mainittuja teoksia on käytetty myös tässä opinnäytetyössä tietolähteenä.

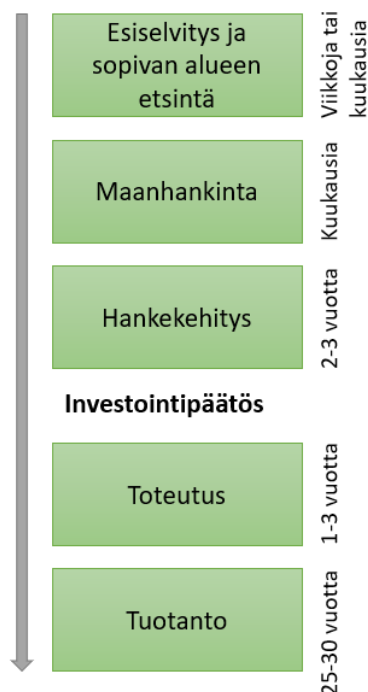
1.3 Luotettavuus ja eettisyys

Käytettävien aineistojen sekä lähtötietojen luotettavuus vaikuttavat suoraan opinnäytetyön luotettavuuteen. Tuulivoimasta sekä tuulivoimahankkeista on julkaistu useita eri tutkimuksia, artikkeleita sekä kirjallisuutta ja niitä hyödynnettiin mahdollisimman monipuolisesti opinnäytetyössä. Alkuperäislähteiden löytäminen oli merkittävässä osassa, jotta voitiin varmistua tiedon oikeellisuudesta ja luotettavuudesta. Tuulivoima-ala kehittyy koko ajan, minkä vuoksi lähteiden tuli olla mahdollisimman ajankohtaisia. Opinnäytetyön lähdeviitteet merkittiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun raportointiohjeen mukaisesti.

Opinnäytetyössä toimittiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettisten periaatteiden mukaisesti. Työssä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä. Opinnäytetyöllä ei ollut salassapitovelvoitetta, eikä se vaatinut tutkimuslupaa. Tutkimuslupa tulee hakea opinnäytetyölle, jossa käsitellään esimerkiksi rekisteriaineistoja liittyen henkilöstöön tai asiakkaisiin. Opinnäytetyön aihetta lähestyttiin objektiivisesti, sillä eettisten periaatteiden mukaisesti opinnäytetyön tekijän tulee olla puolueeton.

2 Tuulivoimahankkeen eteneminen

Tuulivoimahanke voi käynnistyä monelta eri taholta, kuten energiayhtiön, kunnan, tuulivoimahankkeisiin erikoistuneen yhtiön tai maanomistajien toimesta. Vuonna 2020 Suomen tuulivoimahankkeista 60 prosenttia oli suomalaisessa omistuksessa. Noin kymmenen voimalan tuulivoimahanke kestää esisuunnitteluvaiheesta tuotantoon keskimäärin 4–6 vuotta. Kuviossa 1 on esitetty tuulivoimahankkeen eri vaiheet. Hankkeen eteneminen ja kesto riippuu monista tekijöistä kuten hankekoosta, tarvittavien selvitysten määrästä sekä viranomaisista. (Tuulivoimahankkeen suunnittelu ja toteutus n.d.)



Kuvio 1. Tuulivoimahankkeen vaiheet (Aikio 2021, 7, muokattu)

Tuulivoimahankkeen ensimmäisenä vaiheena on löytää tuulivoimatuotannolle suotuinen alue. Potentiaalisen alueen ei pidä ainoastaan olla optimaalinen tuulienergian tuotannolle, vaan sen tulee täyttää myös useita eri ympäristölle asetettuja kriteereitä. (Baseer, Rehman, Meyer & Alam 2017, 1166.) Korpelan (2016) mukaan tuulivoimapuiston suunnittelua voidaan sanoa teknistaloudelliseksi optimointitehtäväksi, jonka tavoite on tuotetun sähköenergian hinnan minimointi. Tuulivoimaloista pyritään saamaan siis mahdollisimman kustannustehokkaita. (Korpela 2016, 66.)

Kun mahdollisia tuulivoima-alueita etsitään, selvitetään samalla alueen potentiaalia tuulivoimatuotantoon eri näkökulmista olemassa olevan tiedon perusteella. Huomioitavia tekijöitä ovat mm. asutus, ympäristön ominaisuudet sekä lentoliikenteen toiminta. Myös valtakunnallisesti merkittävien kulttuuriympäristöjen sekä luonnonperinnön arvojen säilyminen tulee varmistaa alueidenkäytössä. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 17–22.) Esiselvityksessä arvioidaan projektin teknistaloudelliset ja maankäytölliset toteutusmahdollisuudet. Esiselvitys on tehtävä huolella, sillä hankkeen epäonnistuminen on usein seurausta huonosti tehdystä esiselvityksestä. (Esiselvitys ja sopivan alueen etsintä n.d.) Esiselvitysvaiheessa arvioitavia tekijöitä on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.

Hyvin varhaisessa vaiheessa hankekehittäjän tulee selvittää kunnan tahtotila suunnitellulle hankkeelle sekä aloittaa neuvottelut maanomistajien kanssa. Maanomistajien kanssa tehdään tarvittavat vuokrasopimukset alueen vuokrauksesta. Joissakin tapauksissa maanomistajat ovat liittyneet yhteen helpottaakseen hankekehittäjän työtä. Näissä tapauksissa hankekehittäjän ei tarvitse neuvotella jokaisen tahon kanssa erikseen, mikä nopeuttaa hankkeen etenemistä. (Mikkonen & Paalatie 2019.)

Vuokrausneuvottelujen jälkeen hankekehittäjän tulee pyytää lausunto Puolustusvoimilta sekä selvitettävä sähköverkon kapasiteetti. Sähköverkon haltijan kanssa käydään alustavat neuvottelut liittymisvaihtoehdoista sekä liittymismaksuista. (Sähkösopimukset n.d.) Laajojen selvitysten jälkeen alueella aloitetaan tuulimittaukset, joilla varmistetaan alueen tuuliolosuhteet ja vähennetään tuulivoimaprojekteihin liittyvää taloudellista riskiä. Mittausten tulee kestää vähintään 12 kuukautta. (Tuulimittaus n.d.)

Tuulivoimahankkeen seuraavana vaiheena on alueen kaavoitus tuulivoimakäyttöön sekä mahdollinen ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA). Ympäristövaikutusten arviointimenettelyllä pyritään löytämään ratkaisu, jossa haitallisia ympäristövaikutuksia on vähiten tuulivoiman tuomiin hyötyihin verrattuna. Sen tavoitteena on selvittää, mitä suunniteltava hanke aiheuttaa ihmisille, luonnolle, maisemalle sekä luonnonvaroilta. Ympäristövaikutusten arviointimenettely on apuväline, jonka tulokset otetaan huomioon suunniteltavan hankkeen lupaharkinnassa. Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä määrittelee mille hankkeille YVA-menettelyä tulee soveltaa. YVA-menettely tulee tehdä, kun tuulivoimahanke sisältää vähintään 10 kappaletta yksittäisiä laitoja tai niiden kokonaisteho on vähintään 45 megawattia. Tuulivoimahankkeissa paikallisena yhteysviranomaisena toimii ELY-keskus, joka voi tarveharkinnassa päättää, sovelletaanko ympäristövaikutusten arviointia myös pienempään tuulivoimahankkeeseen. (Ympäristövaikutusten arviointi n.d.)

Kaavoituksen sekä mahdollisen YVA-menettelyn jälkeen hankkeelle tulee hakea tarvittavat luvat. Tuulivoimahanke tarvitsee aina rakennus- tai toimenpideluvan. Muita mahdollisia lupia ovat ympäristö-, vesi- tai lentoestelupa. Hankkeen viimeisinä vaiheina ovat muun muassa lopulliset neuvottelut verkonhaltijan kanssa, verkkoliityntäsopimuksen tekeminen, maanrakennustöiden aloittaminen, voimaloiden hankinta sekä rakentamisen aloittaminen. (Tuulivoimahankkeen suunnittelu ja toteutus n.d.)

3 Tuulivoimahankkeen arviointi

Tuulivoimahankkeen esiselvityksessä arvioidaan hankkeen toteutusmahdollisuudet sekä teknistaloudellisesta että maankäytöllisestä näkökulmasta. Maankäytölliset tekijät ovat hankkeen rajoittavia tekijöitä, sillä ne asettavat tuulivoima-alueen ja voimaloiden sijoittumiselle tietyt vaatimukset. Teknistaloudellisia tekijöitä tulee puolestaan tarkastella hankkeen kannattavuuden arvioinnissa. Seuraavissa kappaleissa on esitelty tuulivoimahankkeen arvioinnissa selvitettäviä tekijöitä, ja ne on jaettu tuulivoimahankkeen rajoittaviin sekä teknistaloudellisesta näkökulmasta mahdollistaviin tekijöihin.

3.1 Toteutusta rajoittavat tekijät

3.1.1 Asutus

Tuulivoiman hankealueiden yhtenä suurimpana rajoittavana tekijänä on asutus. Asutuksen sijoittuminen suhteessa hankealueeseen tulee ottaa aina huomioon suunnitteluvaiheessa. Suomen lainsäädännössä ei määritetä vähimmäisetäisyyttä tuulivoimaloiden ja asutuksen välillä. Lainsäädännön mukaan asutuksen ja tuulivoimaloiden sijoittumista toisiinsa nähden tulee tarkastella melu- ja välkevaikutusten perusteella, ja tästä syystä tuulivoimahankkeille toteutetaan aina tapauskohtaiset melu- ja välkemallinnukset. (Etäisyys asutukseen n.d.) Pelastusviranomaisten kumppanuusverkosto on antanut suosituksensa tuulivoimaloiden ja asutuksen välisestä etäisyydestä. Sen mukaan yli 1 MW:n tuulivoimalan etäisyys asutukseen tulisi olla vähintään 600 m, mikäli tuulivoimaloiden sijoittumiselle ei ole muuta vaatimusta. (Suuronen 2021, 9.)

Ääni on melua, mikäli se koetaan häiritseväksi ja epämiellyttäväksi. Keskeisin meluntorjuntakeino tuulivoimaloiden osalta on asettaa voimalat tarpeeksi etäälle asutuksesta. Tuulivoimaloiden aiheuttaman äänen voimakkuus riippuu tuulen nopeuden lisäksi tuulivoimaloiden lukumäärästä ja niiden etäisyyksistä toisiinsa nähden. Maaston pinnanmuodot ja kasvillisuus vaikuttavat tuulivoimaloiden äänen leviämiseen niiden ympäristössä. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 17–76.) Tuulivoimameluasetuksessa (1107/2015) on määritetty tuulivoimaloiden aiheuttaman ulkomelun ohjearvot. Asetuksessa viitataan Sosiaali- ja terveysministeriön säätämään asetukseen asu-
misterveyden sisämelutasoista (545/2015), sillä myös sisämelutasot tulee ottaa huomioon tuulivoimaloiden melumallinnuksessa. Laskennallisen melumallinnuksen avulla varmistetaan, ettei asetuksissa annetut ohjearvot ylitä. (Tuulivoimalan äänet 2021.)

Tuulivoimaloiden aiheuttamaa välkettä syntyy tilanteessa, jossa tuulivoimalan lapa pyörii ja aurinko paistaa sen takaa aiheuttaen valon ja varjon vilkkumista tuulivoimalan vastakkaiselle puolelle. Välkkeen esiintyminen ja ulottuminen ympäristöön riippuu tuulivoimaloiden koosta, sijainnista sekä vuorokauden ajasta. Välkemallinnuksen avulla saadaan tietoa välkkeen vaikutusalueesta, ajoittumisesta sekä kestosta. Suomessa välkevaikutuksella ei ole määritetty raja-arvoja. Välkevaikutuksen arvioinnissa on suositeltu käytettäväksi muiden maiden raja-arvoja. Tanskan raja-arvot ovat kymmenen tuntia vuodessa, kun taas Ruotsin vastaava arvo on enintään kahdeksan tuntia vuodessa ja 30 minuuttia päivässä. Mikäli välkemallinnuksessa nämä raja-arvot ylittyvät voidaan voimalat ohjelmoida pysähtymään välkkeen kannalta kriittisiksi ajoiksi. (Tuulivoimahankkeen suunnittelu 2016, 82–84.)

3.1.2 Luontoarvot

Tuulivoimahanketta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon luonnonsuojelulaki (1096/1996, LSL), jonka tavoitteena on ylläpitää luonnon monimuotoisuutta sekä maisema-arvoja. Luonnonsuojelulaki tulee sovellettavaksi MRL:n (Maankäyttö- ja rakennuslaki) kaava- sekä lupa-asioissa. Toteutettava tuulivoimahanke ei saa merkittävästi heikentää luonnonsuojelualueiden tai kansainvälisesti merkittävien IBA-alueiden (Important Bird and Biodiversity Areas) suojeluarvoa. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 17–48.)

IBA-alueet on tunnistettu koko maailman BirdLife-järjestöjen yhteisessä hankkeessa. Hanke on edistänyt eniten viime vuosikymmeninä luonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeiden alueiden suojelua maailmassa. Suomessa kansainvälisesti merkittäviä lintualueita on 100. Suomen ympäristökeskus, BirdLife Suomi sekä sen jäsenyhdistykset toteuttivat yhteistyönä 2000-luvun alussa FINIBA (Finnish Important Bird Areas) eli Suomen tärkeät lintualueet -hankkeen. FINIBA-alueita valittiin 411, joista osa on myös IBA-alueita. (Tärkeät lintualueet n.d.)

Natura 2000 -verkosto on Euroopan unionin keino pyrkiä säilyttämään luonnon monimuotoisuus. EU:n jäsenmaat voivat ehdottaa luontodirektiivin mukaisia SCI-alueitaan Natura 2000-verkostoon. Kun lopullinen päätös verkostoon hyväksymisestä on tehty Euroopan komission toimesta, jäsenmaa määrittelee verkostoon otetut alueet SAC-alueiksi eli erityisten suojelutoimien alueiksi. Verkostoon kuuluu myös lintudirektiivin mukaisia SPA-alueita (Special Protection Area), jotka jäsenmaat voivat valita itse ja ilmoittaa komissiolle. (Suomen Natura 2000 -alueet 2013.) Mikäli

tuulivoimahanketta suunnitellaan Natura 2000 -alueelle tai sen läheisyyteen, tulee hankkeelle tehdä Natura-arviointi. Natura-arvioinnissa selvitetään, heikentääkö tuulivoimarakentaminen merkittävästi alueen luontoarvoja. Vaikutukset ovat moninaisia, mutta erityisen kriittisiä luontotyypejä ovat lintujen elinympäristöt. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 49–50.)

Tuulivoimahankkeen linnustovaikutukset ovat vaihtelevia, sillä ne riippuvat muun muassa voimaloiden koosta, puiston ja turbiinien maantieteellisestä sijainnista sekä alueen lintulajistosta. Tuulivoimaloiden keskeisimmät vaikutukset linnustoon voidaan jakaa kolmeen eri osa-alueeseen: häirintä- ja estevaikutukset, elinympäristömuutokset sekä törmäysriski ja kuolleisuus. Keinoja linnustovaikutusten vähentämiseen ovat mm. hankealueen sijoittaminen arvokkaiden linnustoalueiden ulkopuolelle sekä lintujen käyttämien lentoreittien välttäminen, kun turbiinien sijaintia suunnitellaan. Tuulivoimahankkeilta vaaditaan riittävän kattavat linnustoselvitykset, jotta hankkeen vaikutukset linnustoon saadaan minimoitua. (Linnustovaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa 2016.)

3.1.3 Maisema-arvot

Tuulivoimapuistoa suunniteltaessa on huomioitava, että toteutuessaan se aiheuttaa muutoksia maisemaan. Maisemavaikutukset aiheutuvat tuulivoimaloista, uusista ja parannettavista tiehyteyksistä sekä sähkönsiirtoon liittyvistä rakenteista. Eri ympäristötekijöistä riippuen tuulivoimaloista aiheutuva muutos maisemassa voi olla vähäistä, kohtalaista tai merkittävää. Ihmisen muokkaama moderni ja rakennettu ympäristö, jossa on valmiiksi kookkaita elementtejä, kestää tuulivoimaloiden aiheuttaman muutoksen paremmin kuin pienipiirteinen kulttuurimaisema arvokkaine ominaispiirteineen. (Maisemavaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa 2016, 14–40.)

Tuulivoimarakentamisen suunnittelussa on tärkeä hyödyntää havainnollistavaa materiaalia, sillä sen avulla voidaan hahmottaa, miltä maisema tulee näyttämään kookkaiden tuulivoimaloiden toteuduttua. Tuulivoimaloiden näkymistä havainnollistetaan mm. valokuvasovitteilla, joissa yhdistyy kohteista otetut valokuvat sekä niihin mallinnetut tuulivoimalat. Valokuvasovitteiden avulla voidaan arvioida, kuinka suuret vaikutukset tuulivoimalat aiheuttavat maisemaan. (Maisemavaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa 2016, 43–46.) Tuulivoimaloiden lukumäärän sekä sijoittelun tarkalla suunnittelulla maisemavaikutukset arvokkailla maisema-alueilla voidaan minimoida (Tuulivoiman maisemavaikutukset n.d.).

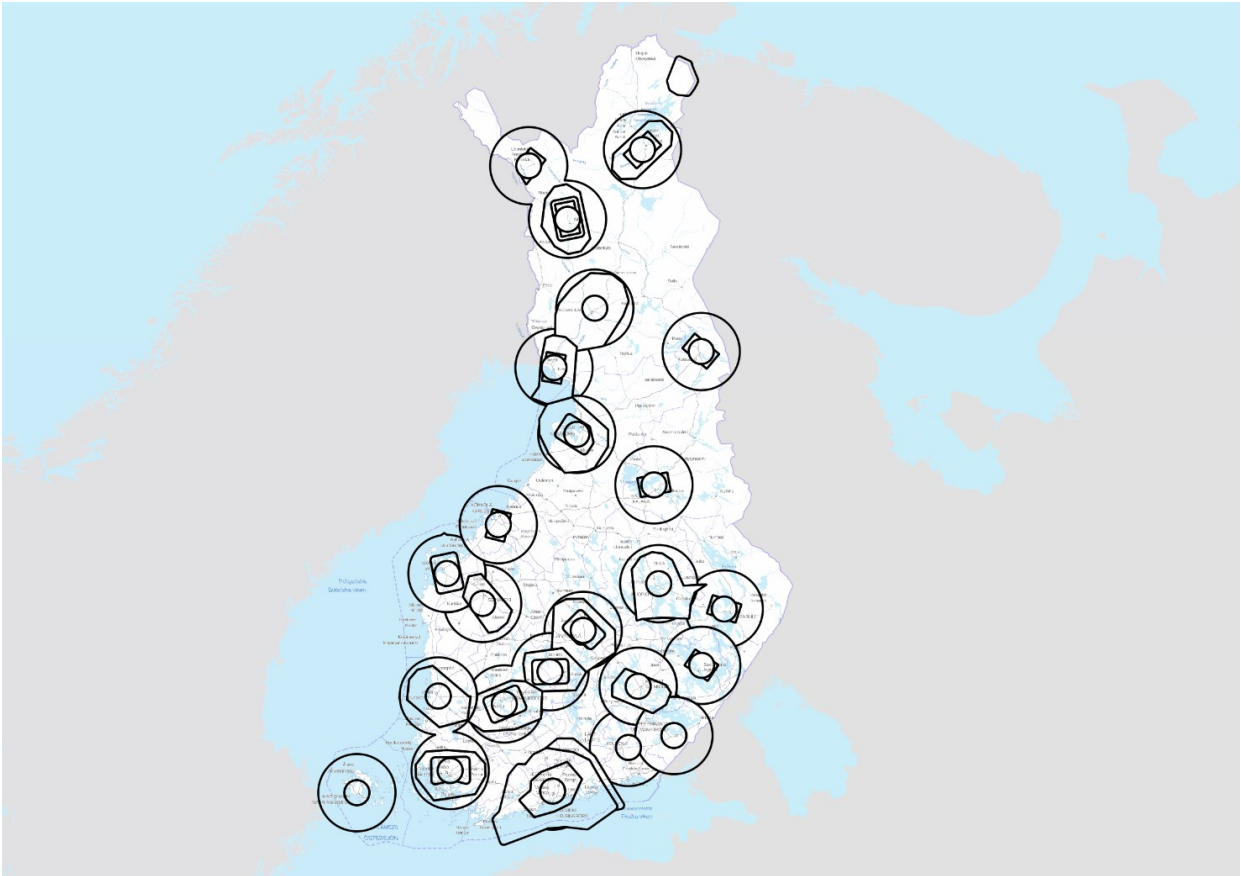
3.1.4 Kulttuuriarvot

Tietyille ryhmille jotkin alueet voivat olla tärkeitä esimerkiksi uskonnollisista tai historiallisista syistä. Paikalliset yhteisöt voivat katsoa tiettyjen alueiden olevan esteettisesti arvokkaita, tai alue voi olla luonnoneläinten elinympäristöä. Edellä mainitut asiat eivät välttämättä suoraan poissulje tuulivoimahanketta alueelle, mutta niistä on kuitenkin hyvä olla tietoinen hankealuetta valittaessa. Tällaisissa tilanteissa paikallinen vastustus voi lisääntyä, mikä puolestaan pitkittää hankekehitystä lisäten kustannuksia. (Brower 2012, 24.)

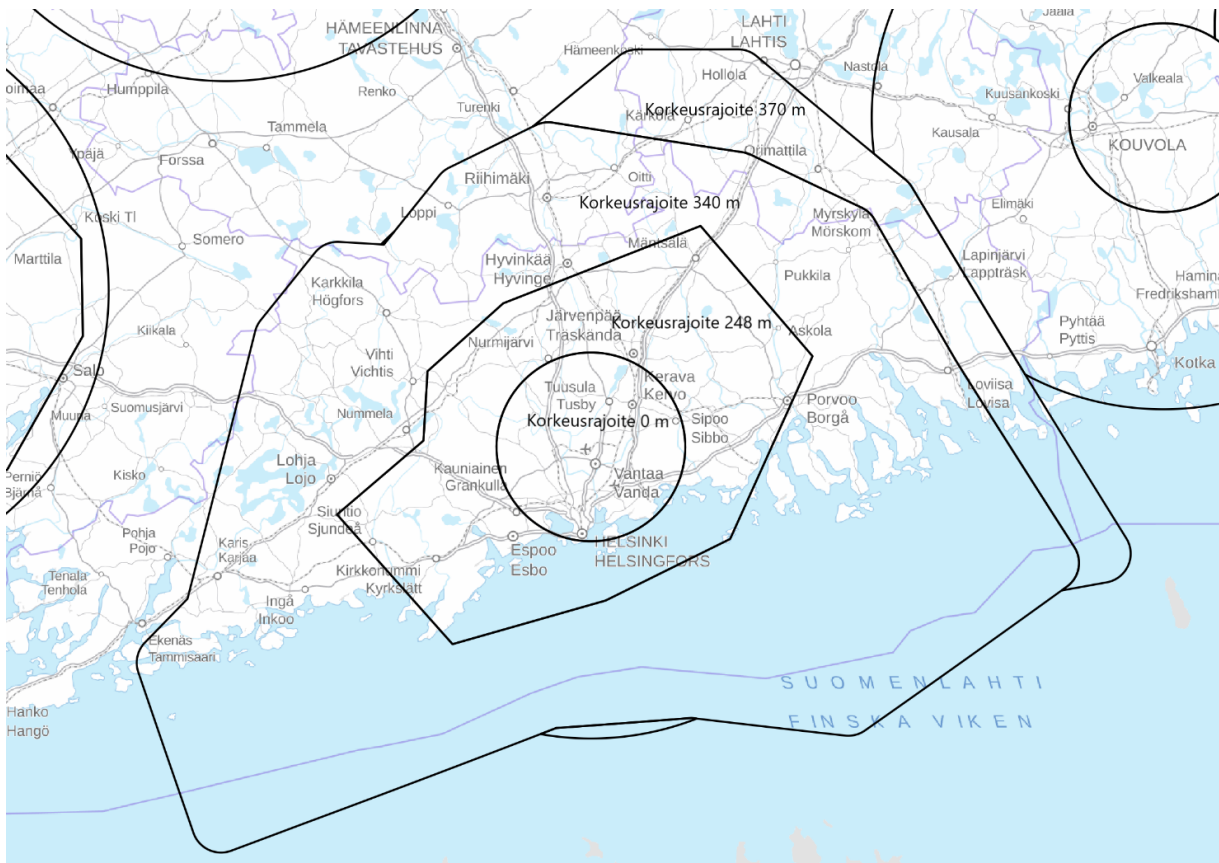
Suomessa kulttuuriarvojen huomioiminen ja turvaaminen tulee sovellettavaksi erityisesti saamelaisien kotiseutualueen alueidenkäytössä, sillä alkuperäiskansana saamelaisille kuuluu oikeus ylläpitää ja kehittää omaa kulttuuriaan. Myös poronhoidon vaatimat edellytykset tulee turvata tuulivoimahanketta suunniteltaessa poronhoitoalueelle tai sen läheisyyteen. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 22.)

3.1.5 Lentoturvallisuus

Lentoasemalla tarkoitetaan aluetta, jossa ilmaliikennepalvelu on pysyvästi järjestettyä. Lentoasemien ympärillä on esterajoituspinnat, joiden tarkoituksena on suojata mm. lentokoneiden lentoon lähtöä ja laskeutumista. Esterajoituspinnat ovat lentoasemien kiitotien suunnassa 15 kilometrin etäisyydellä ja kiitotien sivulla kuuden kilometrin etäisyydellä. Lentoliikenteen turvallisuus varmistetaan esterajoituspintojen avulla, joten näiden pintojen sisälle korkeiden rakennelmien kuten tuulivoimaloiden rakentaminen ei ole mahdollista. Lentoliikenteen sujuvuutta turvataan lisäksi lentoasemien ympärillä olevilla laajemmilla vyöhykkeillä, joille on määritetty suurimmat sallitut rakennuskorkeudet merenpinnasta. Tuulivoimaloiden rakentaminen näille vyöhykkeille on sallittua, mutta niiden kokonaiskorkeutta voidaan joutua rajaamaan. (Piispanen, Laitinen & Hertteli 2011 3–8.)



Kuvio 2. Lentoasemien ympäristössä olevat rajoitusalueet Suomessa. Karttakuva sisältää Fintraffic lennonvarmistuksen 4/2018 aineistoa.



Kuvio 3. Helsinki-Vantaa lentoaseman ympäristössä olevat korkeusrajoitteet. Karttakuva sisältää Fintraffic lennonvarmistuksen 4/2018 aineistoa.

Kuviossa (Kuvio 2) on esitelty Suomessa sijaitsevien lentoasemien ympäristössä olevat esterajoituspinnat sekä korkeusrajoitus vyöhykkeet. Kuviossa (Kuvio 3) on esitelty tarkemmin Helsinki-Vantaa lentoaseman ympäristössä olevat korkeusrajoitealueet. Korkeusrajoite määrää suunniteltujen tuulivoimaloiden kokonaiskorkeuden. Mikäli maanpinnankorkeus turbiinipaikalla on 100 m ja korkeusrajoite 340 m, niin suurin sallittu tuulivoimalan kokonaiskorkeus on 240 m. Korkeusrajoitteen ollessa 0 m alue on esterajoituspinnalla, eikä sinne ole tällöin mahdollista sijoittaa tuulivoimaloita.

Suomen ilmailulaissa (864/2014) teolliset tuulivoimalat määritetään lentoesteiksi niiden korkeuden vuoksi. Teollisen kokoluokan tuulivoimaloiden kokonaiskorkeudet ovat nykyään noin 200–260 metriä, joten lentoturvallisuuden takaamiseksi tuulivoimalat tulee varustaa aina lentoestevaloilla. (Milloin tarvitaan lentoestelupa 2021.) Tuulivoimaloiden suuren kokonaiskorkeuden vuoksi niiden

rakentamiseen vaaditaan yleensä lentoestelupa riippumatta tuulivoimaloiden sijainnista. Lentoluvan lisäksi tarvitaan lentoestelausunto Fintraffic Oy:ltä, joka sisältää arvion tuulivoimaloiden vaikutuksista lentoliikenteen turvallisuuteen. (Hietanen 2021.)

3.1.6 Puolustusvoimat

Jotta tuulivoimahanke voi edetä, edellytyksenä on Puolustusvoimien myönteinen lausunto rakennuslupaprosessiin. Tuulivoimalat voivat aiheuttaa haittaa Puolustusvoimien ilma- ja meritutkille, minkä vuoksi lausunto on välttämätön. Varjostaminen ja ei-toivotut heijastukset tutkajärjestelmissä ovat tyypillisiä tuulivoimaloiden aiheuttamia häiriöitä (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 96).

Lausuntomenettelystä ei ole merkintää lainsäädännössä, mutta Puolustusvoimien velvollisuuteen kuuluu lainsäädännön mukaan aluevalvonnan turvaaminen. Aluevalvonnan sekä tuulivoimaloiden yhteensovittaminen on koettu haasteelliseksi erityisesti Suomenlahden merialueille sekä Kaakkois-Suomessa. Tuulivoimarakentaminen on edennyt hitaasti koko Itä-Suomen alueella yhteensovittamisen haasteiden vuoksi, vaikka Puolustusvoimat ovat antaneet sinne myönteisiä lausuntoja yli tuhannelle voimalalle. (Hujanen, Joensuu, Leino & Viljanen 2021.) Vuodesta 2011 vuoden 2021 elokuuhun mennessä Puolustusvoimilta oli pyydetty yli 14 000 lausuntoa liittyen eri tuulivoimahankkeisiin, ja niistä 85 % oli hyväksyttyjä (Puolletut hankkeet 2021).

3.1.7 Kaavoitus ja maanomistus

Tuulivoimahankkeisiin sovelletaan pääasiassa samoja säännöksiä kuin muuhun rakentamiseen. Tuulivoimalan rakentamiseen tarvitaan aina rakennus- tai toimenpidelupa. Tuulivoimarakentamiseen soveltuvat alueet on määritetty maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999, MRL). Kaavoituksesta vastaa kunta. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 16.) Mikäli kunta ei hyväksy tuulivoimaa alueelleen, ei tuulivoimaloita ole sinne mahdollista rakentaa. Useat kunnat ja erityisesti pienet kunnat suhtautuvat tuulivoimaan kuitenkin positiivisesti muun muassa sen tuomien kiinteistöverotulojen ja työpaikkojen ansiosta. (Miksi kunnan kannattaa kiinnostua tuulivoimasta n.d.)

Suomessa maanomistus voi olla hyvinkin pirstaloitunutta, minkä vuoksi vuokraneuvottelut vievät aikaa. Korvauksia maksetaan tuulivoimalan sijaintikohdan maanomistajan lisäksi laajemmalle maa-alueen omistajajoukolle. Kyseisen käytännön avulla pyritään tasaamaan maanomistajien asemaa, sillä tuulivoimaloita ei voi sijoittaa liian lähelle toisiaan. (Mikkonen & Paalatie 2019.) Tuulivoimalat eivät kokonaan poissulje muuta toimintaa alueella, minkä vuoksi useat maanomistajat suhtautuvat tuulivoiman rakentamiseen positiivisesti niiden tuomien lisätulojen vuoksi. Maanomistajat voivat kuitenkin olla esteenä hankkeen toteutumiselle, mikäli he eivät halua vuokrata maitaan tuulivoimapuistoa varten.

3.1.8 Sähköverkko

Sähköverkon paikallinen saatavuus sekä kapasiteetti on selvitettävä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, sillä tuulivoimahankkeen toteutumisen edellytyksenä on, että se voidaan liittää sähkönsiirron alue- ja kantaverkkoon. Mahdolliseen liityntään vaikuttavat tuulivoimahankkeen koko sekä liittymispisteen etäisyys hankkeesta. Mitä suurempi hanke on kyseessä, sitä pidempi etäisyys on vielä taloudellisesti kannattava. Hankekehittäjän on oltava yhteydessä paikallisiin alueverkkoyhtiöihin sekä kantaverkkoyhtiö Fingridiin, joilta saadaan lisätietoa liittymispisteistä, paikallisesta verkkokapasiteetista sekä liittymiskustannuksista alueella. (Etelä-Pohjanmaan, Keski-Pohjanmaan ja Pohjanmaan tuulivoimaselvitys 2021, 18.)

Suhteellisen pieniä tuulivoimapuistoja voidaan vielä liittää jakeluverkkoon, mutta suuret tuulivoima-alueet vaativat teknisiltä ominaisuuksiltaan liittymistä suurjännitteiseen jakelu- tai kantaverkkoon. Lähtökohtaisesti yli 250 megawatin tuulivoimapuisto liitetään 400 kilovoltin jännitteeseen verkkoon ja alle 250 megawatin tuulivoimapuisto puolestaan 110 kilovoltin jännitteeseen verkkoon. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 59.)

Fingridin velvollisuutena on liittää kaikki uudet tuulipuistot verkkoon. Suunnitelluista tuulivoimahankkeista on hankalaa arvioida, mitkä tulevat lopulta toteutumaan ja mitkä eivät, mikä puolestaan aiheuttaa verkon suunnittelun ja rakentamisen näkökulmasta haasteita. Kantaverkkoa tulee vahvistaa tuulivoiman vuoksi laajasti eri puolella Suomea. Sähkön kulutus painottuu eteläiseen Suomeen, kun taas tuulivoimatuotanto keskittyy pohjoiseen Suomeen. Uusia sähköasemia ja voimajohtoyhteyksiä tarvitaan, jotta uusien tuulivoimapuistojen tuottama sähkönsiirto on toteutettavissa. (Remes 2019.)

Uuden sähköntuottajan, jonka tuotantolaitos on yli 2 MW, on katettava kustannukset verkon vahvistamisesta, mikäli verkkoa vahvistetaan pelkän tuotantolaitoksen takia. Kyseisiä kustannuksia ei yleisesti pidetä esteenä suurien tuulivoimapuistojen tapauksissa, mutta kustannusten osuus keski-kokoisissa (10–20 MW) hankkeissa voivat olla merkittävän suuria. (Sähkö Sopimukset n.d.)

3.2 Teknistaloudelliset tekijät

3.2.1 Tuulisuus

Yksi tärkeimmistä teknistaloudellisista tekijöistä tuulivoimahankkeessa on alueen tuulisuus. Tuulisuudella on suora vaikutus tuulienergian tuotantoon, sillä mitä enemmän tuulee, sen enemmän voidaan tuottaa tuulienergiaa. Mikäli alueen tuulisuus ei siis ole riittävä, ei hanketta ole taloudellisesti kannattavaa toteuttaa. Pelkkä tuulisuus ei kuitenkaan takaa kannattavaa hanketta, vaan hanketta suunniteltaessa tulee ottaa myös muita asioita huomioon. Esimerkiksi alueen koko ja sijainti suhteessa rakennettuun infrastruktuuriin vaikuttavat merkittävästi hankkeen kannattavuuteen, vaikka alue olisikin optimaalinen tuuliolosuhteiden näkökulmasta. (Brower 2012, 24.)

3.2.2 Tiestö

Olemassa olevan tieverkoston kantavuutta ja saavutettavuutta tulee tarkastella jo tuulivoimahankkeen suunnitteluvaiheessa, sillä teollisen kokoluokan tuuliturbiinien osat, kuten roottorien siivet ja tornielementit kuljetetaan erikoiskuljetuskalustolla. Mikäli tuulivoimahanketta suunnitellaan esimerkiksi vuoristoalueelle, tiessä esiintyvät tiukat mutkat tai käännökset voivat estää komponenttien kuljetuksen alueelle. Tällöin on tärkeää selvittää, onko komponentteja mahdollista kuljettaa toisia reittejä pitkin. (Wind Projects – Initial Site Selection 2016.) Tuulivoimapuiston rakennusvaiheessa tieyhteyttä joudutaan usein parantamaan tai rakentamaan kokonaan uusia tielinjoja, jolloin myös hankkeen kustannukset nousevat.

3.2.3 Voimaloiden sijoittelu

Energiaa ei voida luoda eikä kuluttaa, mutta sitä voidaan muuntaa muodosta toiseen. Tuulivoimassa ilman liike-energia muunnetaan turbiineilla sähköenergiaksi. Turbiinista lähtevän tuulen energiasisältö on alhaisempi kuin turbiiniin tulevan tuulen, sillä osa energiasta pyörittää turbiinin lapoja. Tuulen nopeus turbiinin roottorin takana alenee, mikä alentaa taakse jääviin turbiineihin kohdistuvaa liike-energiaa. Tätä kutsutaan tuulivoimaloiden vanahäviöksi. Vanahäviöiden minimoimiseksi tuulivoimalat tulee sijoittaa tarpeeksi etäälle toisistaan, jotta tuulella on tarpeeksi tilaa kiihtyä uudelleen. Voimaloiden sijoituessa liian lähelle toisiaan ne aiheuttavat toistensa lapoihin ylimääräistä mekaanista rasitusta, joka puolestaan aiheuttaa ennenaikaisia rikkoutumisia. Tuulivoima-alueen viereiset tuulipuistot tulee ottaa huomioon hankkeen suunnitteluvaiheessa, sillä ne aiheuttavat vanahäviöitä sijoituessaan tarpeeksi lähelle. (Wake Effect 2003.)

Voimaloiden väliseen etäisyyteen vaikuttavat mm. voimaloiden määrä, roottorin halkaisija sekä napakorkeus. Turbiinivalmistajien yleinen suositus voimaloiden välisestä etäisyydestä on ollut viisi roottorin halkaisijaa vallitsevassa tuulensuunnassa ja sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa kolme roottorin halkaisijaa. Turbiinien hyvin suunnitellulla sijoittelulla saadaan mahdollisimman hyvä tuotto sekä tekninen käyttöikä koko tuulipuistolle.

3.2.4 Maaperä

Tuulivoimaloiden perustamistapa riippuu yksittäisen voimalapaikan maaperän rakenteesta. Tuulivoimalat voidaan perustaa maavaraisesti silloin, kun maalajeina ovat eri moreenit ja hiekkalajit sekä luonnonsora. Nämä maalajit ovat tarpeeksi kantavia tuulivoimalan turbiineille ja sen rakenteille. Teräsbetoniperustukset voidaan vaihtoehtoisesti tehdä paalujen varaan, kallioon ankkuroimalla tai maapohjaa parantavalla massanvaihdoilla. (Etelä-Pohjanmaan, Keski-Pohjanmaan ja Pohjanmaan tuulivoimaselvitys 2021, 24.) Maaperän ominaisuudet vaikuttavat tuulivoimahankkeessa, sillä esimerkiksi soille on lähtökohtaisesti kalliimpaa rakentaa tuulivoimaloita kuin metsäiseen maastoon.

4 Analytic Hierarchy Process = Analyttinen hierarkiaprosessi

Thomas L. Saaty kehitti 1970-luvulla AHP:n eli analyttisen hierarkiaprosessin (Analytic Hierarchy Process). Analyttinen hierarkiaprosessi on yksi suosituimmista päätöksenteon avustavista malleista, jossa otetaan huomioon kaikki oleellimmat päätöksentekoon vaikuttavat kriteerit. Se soveltaa monikriteerisen päätöksenteon (MCDM = Multi-Criteria Decision Making) tekniikoita. Analyttinen hierarkiaprosessi soveltuu monimutkaisten päätöksenteko-ongelmien analysointiin, ja sitä pidetään suhteellisen helppokäyttöisenä (Aziz, Sorooshian & Mahmud 2016, 7217–7219.)

Ongelmanratkaisu itsessään on prosessi, jossa päätetään ongelman tärkeimmistä elementeistä. Ongelmanratkaisussa selvitetään, miten elementit korjataan, vaihdetaan, testataan ja arvioidaan parhaiten. Koko prosessia tarkastellaan niin kauan, kunnes ollaan vakuuttuneita siitä, että on käsitelty kaikki tärkeät ominaisuudet ongelman esittämiseen ja ratkaisemiseen. Analyttisen hierarkiaprosessin ideana on systematisoida tätä edellä mainittua ongelmanratkaisuprosessia. (Saaty & Kearns 2014, 19.)

Analyttinen hierarkiaprosessi on menettely, jonka avulla voidaan esittää minkä tahansa ongelman elementit hierarkian muodossa. Se organisoii rationaalisesti ongelman elementit pienempiin paloihin ja haastaa päätöksentekijää parivertailun avulla ilmaisemaan elementtien vaikutusten suhteellista voimakkuutta hierarkiassa. Analyttisen hierarkiaprosessin menettelyjä ja periaatteita käytetään monien arvioiden yhteensovittamiseen, kriteerien tärkeyden ja myöhemmin vaihtoehtojen ratkaisujen määrittämiseen. (Saaty & Kearns 2014, 19.)

Analyttista hierarkiaprosessia voidaan hyödyntää monilla eri aloilla kuten teollisuudessa, liiketaloudessa sekä terveydenhoidossa. Menetelmä mahdollistaa myös johdonmukaisuuden arvioinnin, jonka avulla vähennetään mielipiteiden ja arvioiden epäjohdonmukaisuutta. Menetelmä keskittyy valintakriteerien priorisointiin ja erottaa tärkeimmät kriteerit vähemmän tärkeistä. (Aziz ym. 2016, 7217.)

4.1 Vaiheiden esittely

4.1.1 Hierarkian muodostaminen

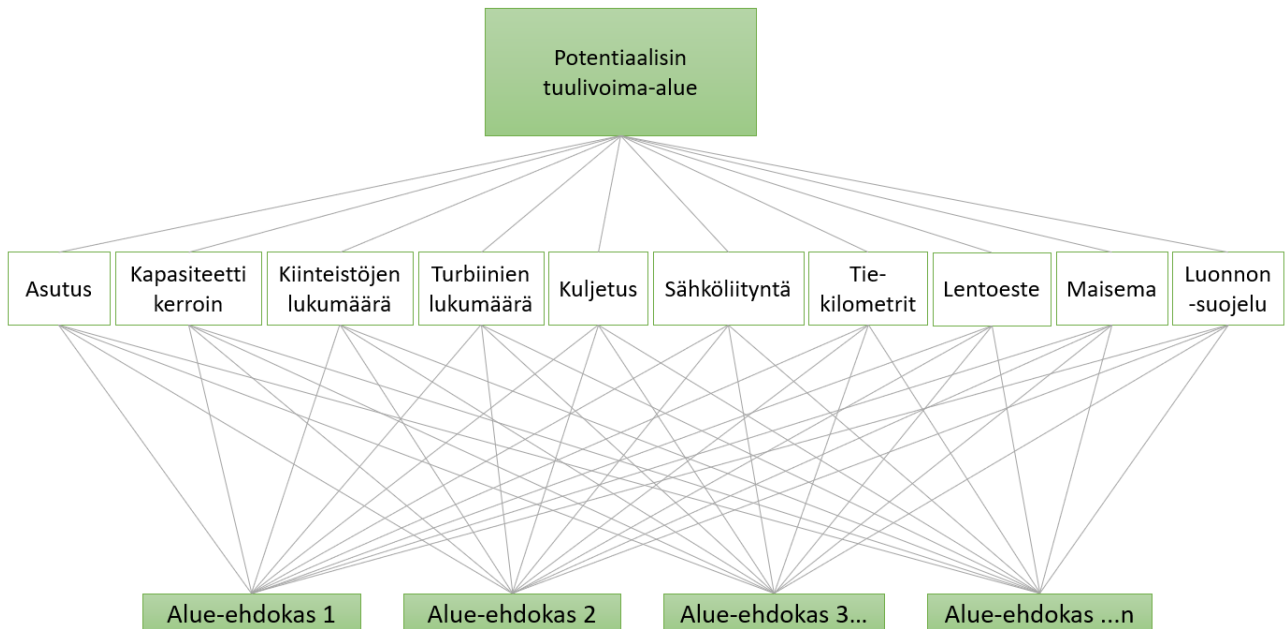
Analyyttisen hierarkiaproessin ensimmäisenä vaiheena on hierarkian muodostaminen. Pääperiaatteena hierarkian muodostamisessa on ihmisen kyky havainnoida, tunnistaa ja kommunikoida havaintonsa muille. Hierarkia mahdollistaa yksityiskohtaisen tarkastelun ja selkeyttää monimutkaisen ja paljon informaatiota sisältävän asian esittämisen ulkopuolisille. (Haapalinna & Korpela 1995, 141.) Hierarkia muodostetaan yksinkertaistettuna niin, että ylimmälle tasolle asetetaan päätöksenteon tavoite, seuraavalle riville päätöksenteossa oleellisesti vaikuttavat kriteerit ja mahdolliset alakriteerit sekä alimmalle tasolle vertailukohteena olevat vaihtoehdot. Hierarkia tulee määrittää niin, että se pystyy mahdollisimman monipuolisesti analysoimaan käsiteltävää asiaa. Hierarkiasta ei kuitenkaan saa tehdä liian monimutkaista, jotta se olisi mahdollisimman herkkä muutoksille. (Saaty 1987, 161–163.)

Hierarkiaan listattavat vaihtoehdot tarkoittavat potentiaalisia vaihtoehtoja, joita päätöksentekoprosessissa halutaan tarkastella. Vaihtoehtojen määrälle ei ole yleistä ohjeistusta. Käytännönläheisissä tarkasteluissa vaihtoehtoja on helpompi karsia jo ennen analyttisen hierarkiaproessin käyttöönottoa, mutta joskus tämä ei ole mahdollista ja vaihtoehtoja tulee suurempi määrä.

Analyttisen hierarkiaproessin päämääränä on antaa päätöksenteon kohteena olevista vaihtoehdoista perusteltu valinta. Tämä vuoksi hierarkiassa esiteltävät kriteerit tulee määrittää niin, että ne vaikuttavat oleellisesti päätöksenteossa. Kriteereille määritetään arvotaulukot, joissa tietty arvo saa tietyn verran pisteitä. Thomas L. Saaty on määrittänyt parivertailussa käytettävän perusteikon 1–9, mikäli kriteerille ei voida määrittää varsinaista arvotaulukkoa. Tällöin tarkastelu tehdään vahvemmin tekijän mielipiteiden ja intuition pohjalta. (Saaty 1987, 163.)

Hierarkian muodostamisen ainoana sääntönä on, että alemman tason elementtejä pitää pystyä vertaamaan pareittain ylemmän tason elementin kanssa. Yksinkertaistettuna päätöksentekijän on siis kyettävä esimerkiksi antamaan vastaus kysymykseen ”toteuttaako vaihtoehto A ylemmän tason kriteerin paremmin kuin vaihtoehto B tai C”. (Saaty & Kearns 2014, 19.) Kun taas itse kriteereitä aletaan vertailemaan päätöksenteon tavoitteen kanssa, on päätöksentekijän pystyttävä vertailemaan kriteereiden keskinäistä tärkeyttä. Kuviossa (Kuvio 4) on esitetty opinnäytetyössä luotu

hierarkia hierarkiapuun muodossa. Hierarkiapuun kriteerit on esitelty myöhemmin kappaleessa 5 sekä perusteltu, miksi ne on valittu työkaluun.



Kuvio 4. Hierarkiapuun

4.1.2 Päätöksenteon elementtien parivertailu

Analyttisen hierarkiaproessin olennaisin vaihe on elementtien parivertailu, jossa tietyn tason elementtejä vertaillaan pareittain toisiinsa ylemmän tason elementin suhteen. Parivertailussa määritetään kriteerien painoarvot sekä vertailtavien vaihtoehtojen painoarvot eli toteutumat kunkin kriteerin kohdalla. Parivertailussa hyödynnetään matriisien ominaisarvoihin perustuvaa menetelmää. Menetelmän avulla vaihtoehtoilta sekä kriteereille saadaan numeeriset arvot, joiden pohjalta lopullinen päätös tehdään. (Saaty 1987, 163.)

Kriteerien parivertailussa hyödynnetään Saaty ennalta määrittämää taulukkoa (Taulukko 1), jossa käytetään asteikkoa 1–9. Kriteerien parivertailussa määritetään kunkin kriteerien tärkeys päätöksenteossa. Päätöksentekijän on siis kyettävä vertailemaan jokaista kriteeriä keskenään ja arvioimaan, kumpaa kriteeriä hän pitää tärkeämpänä päätöksentekoprosessissa. (Saaty 1987, 163.)

Taulukko 1. Parivertailussa käytettävä asteikko (Saaty 1987, 163, muokattu)

Suhteellinen tärkeys	Määritelmä	Tulkinta
1	Yhtä tärkeitä	Tekijät vaikuttavat yhtä paljon päätöksenteossa
3	Toinen tekijöistä lievästi tärkeämpi	Kokemus ja arviot viittaavat toisen tekijän suurempaan merkitykseen
5	Toinen tekijöistä tärkeämpi	Kokemus ja arviot osoittavat toisen tekijän suhteellisen merkityksen tärkeämmäksi
7	Toinen tekijöistä selvästi tärkeämpi	Käytäntö on selvästi osoittanut tekijän tärkeyden suhteessa toiseen elementtiin
9	Toinen tekijöistä huomattavasti tärkeämpi	Käytännön kokemus ja empiiriset havainnot osoittavat tekijän suuremman merkityksen
2, 4, 6, 8	Väliarvot vertailuille	Kompromissiin päätyessä

Vaihtoehtojen parivertailuissa käytetään usein päätöksentekijöiden ennalta määrittämiä arvotaulukoita, joiden avulla vaihtoehdot pisteytetään ja parivertailu toteutetaan. Analyttisessä hierarkiaprosessissa pisteet ovat positiivisia pisteitä. Arvotaulukot tulee määrittää siis niin, että vaihtoehto saa enemmän pisteitä, kun se toteuttaa kriteerin paremmin. Mikäli arvotaulukoita ei ole mahdollista määrittää, voidaan soveltaa kriteerien parivertailuun käytettävää taulukkoa (Taulukko 1). Näissä tilanteissa päätöksentekijän tulee arvioida subjektiivisesti vaihtoehtojen toteutumaa kunkin ylemmän tason kriteerin kohdalla.

Parivertailu aloitetaan valitsemalla yksi ylemmän tason elementti eli kriteeri tarkasteluun ja asettamalla matriisin otsikoiksi vaihtoehdot vaaka- sekä pystyriveille. Matriisin lävistäjälle asetetaan arvot 1, sillä mikään alue ei toteuta tarkasteltavaa kriteeriä itseään paremmin tai huonommin. Vaihtoehdot pisteytetään päätöksenteon kriteerien arvotaulukoiden tai Saatyn ennalta määrittämän taulukon (Taulukko 1) mukaan. Matriisi käydään alkio alkiolta läpi lävistäjän yläpuolella. Mikäli rivin vaihtoehto toteuttaa käsiteltävän kriteerin paremmin kuin sarakkeen vaihtoehto, asetetaan alkioon arvo, joka on suurempi kuin yksi. Mikäli sarakkeen vaihtoehto toteuttaa käsiteltävän

kriteerin paremmin kuin rivin vaihtoehto, alkioon asetetaan arvo, joka on pienempi kuin 1. Lävistäjän alapuolelle asetetaan lukujen käänteisluvut. Parivertailun ensimmäistä vaihetta on havainnollistettu taulukossa (Taulukko 2).

Taulukko 2. Vaihtoehtojen parivertailu

Kriteeri 1	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Vaihtoehto 1	1	3/2	3
Vaihtoehto 2	2/3	1	2
Vaihtoehto 3	1/3	1/2	1

Kun kaikki solut on käyty läpi, alkioden arvot normalisoidaan. Normalisointi tapahtuu laskemalla sarakkeiden summa, jolla jaetaan sarakkeen jokainen alkio. Normalisoidun matriisin sarakkeiden summa tulee olla 1. Normalisointia on kuvattu alla olevassa taulukossa.

Taulukko 3. Matriisin arvojen normalisointi

Kriteeri 1	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Vaihtoehto 1	1	3/2	3
Vaihtoehto 2	2/3	1	2
Vaihtoehto 3	1/3	1/2	1
Summa	2	3	6
Normalisoitu	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Vaihtoehto 1	0,5	0,5	0,5
Vaihtoehto 2	0,333	0,333	0,333
Vaihtoehto 3	0,167	0,167	0,167
Summa	1	1	1

Normalisoidusta matriisista määritetään vaihtoehtojen painoarvot. Painoarvojen määrittäminen tapahtuu laskemalla normalisoidun taulukon jokaiselta riviltä keskiarvo. Laskentaa on havainnollistettu taulukossa (Taulukko 4). Taulukon esimerkistä voidaan todeta, että vaihtoehto 1 toteuttaa käsiteltävän kriteerin parhaiten, sillä sen painoarvo on suurin. Parivertailun tuloksena saadaan siis vaihtoehtojen toteutuma kriteerin kohdalla, joten edellä mainittu proseduuri tehdään jokaiselle ylemmän tason kriteerille erikseen.

Taulukko 4. Painoarvojen määrittäminen

Normalisoitu	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3	Painoarvo
Vaihtoehto 1	0,5	0,5	0,5	0,5
Vaihtoehto 2	0,333	0,333	0,333	0,33
Vaihtoehto 3	0,167	0,167	0,167	0,17
Summa	1	1	1	1

Kriteerien painoarvot määritetään laskennallisesti samalla tavalla kuin vaihtoehtojen painoarvot. Matriisin vaaka- sekä pystyriveille asetetaan kriteerit, ja niiden keskinäistä tärkeyttä päätöksenteossa vertaillaan Saatyn määrittämän taulukon (Taulukko 1) mukaan. Lävistäjän yläpuoli käydään alkio alkioita läpi. Mikäli vaakarivin kriteeriä pidetään tärkeämpänä kuin pystysarakkeen kriteeriä, asetetaan alkioon arvo, joka on suurempi kuin yksi. Jos taas pystysarakkeen kriteeriä pidetään tärkeämpänä kuin vaakarivin kriteeriä, asetetaan alkioon arvo, joka on pienempi kuin yksi. Laskennan lopputuloksena saadaan jokaiselle kriteerille painoarvo, joka määrittää kuinka paljon milläkin kriteerillä on painoarvoa päätöksenteossa. Kriteerien painoarvoja hyödynnetään vaihtoehtojen kokonaispainoarvojen laskennassa. (Saaty 1987, 165.)

Taulukko 5. Kriteerien painoarvojen laskenta

	Kriteeri 1	Kriteeri 2	Kriteeri 3	
Kriteeri 1	1	5	1/2	
Kriteeri 2	1/5	1	1/7	
Kriteeri 3	2	7	1	
Summa	3,2	13	1,6	
Normalisoitu	Kriteeri 1	Kriteeri 2	Kriteeri 3	Painoarvo
Kriteeri 1	0,3125	0,385	0,304	0,334
Kriteeri 2	0,0625	0,077	0,087	0,075
Kriteeri 3	0,625	0,538	0,609	0,591
Summa	1	1	1	1

Kokonaispainoarvojen määrittämisessä otetaan huomioon parivertailujen tulokset eli jokaisen vaihtoehdon toteutuma kunkin kriteerin kohdalla sekä kriteereille määritetyt painoarvot. Laskentaa on kuvattu alla.

Taulukko 6. Vaihtoehtojen kokonaispainoarvojen määrittäminen

Toteutuma	Kriteeri 1	Kriteeri 2	Kriteeri 3	Kriteerien painoarvot	
Vaihtoehto 1	0,5	0,15	0,027	Kriteeri 1	0,334
Vaihtoehto 2	0,33	0,1	0,014	Kriteeri 2	0,075
Vaihtoehto 3	0,17	0,05	0,083	Kriteeri 3	0,591

	Kokonaispainoarvo	
Vaihtoehto 1	$0,5 \cdot 0,334 + 0,15 \cdot 0,075 + 0,027 \cdot 0,591$	0,194
Vaihtoehto 2	$0,33 \cdot 0,334 + 0,1 \cdot 0,075 + 0,014 \cdot 0,591$	0,126
Vaihtoehto 3	$0,17 \cdot 0,334 + 0,05 \cdot 0,075 + 0,083 \cdot 0,591$	0,110

Lopputuloksena saadaan vaihtoehtojen kokonaispainoarvot, jotka määrittävät, mikä vaihtoehtoista on paras tehdyn tarkastelun mukaan. Suurin kokonaispainoarvo kertoo, että vaihtoehto on päätöksenteossa paras vaihtoehto. Pienimmän kokonaispainoarvon saanut vaihtoehto on puolestaan huonoin. Esimerkilaskennasta voidaan todeta, että vaihtoehto 1 olisi tehdyn tarkastelun mukaan paras vaihtoehto – vaihtoehto 3 puolestaan huonoin.

4.1.3 Johdonmukaisuuden tarkastelu

Useiden hierarkkisten tasojen vuoksi päätöksentekijän on vaikea saavuttaa täysin johdonmukaista parivertailua. Tästä syystä Saaty on kehittänyt analyttiseen hierarkiaprosessiin vaiheen, jossa tarkastellaan päätöksentekijän johdonmukaisuutta. Saaty (1987) mukaan tietyn verran epäjohdonmukaisuutta tarvitaan, jotta AHP-mallista saadaan käyttökelpoisia tuloksia. Parivertailu ei kuitenkaan saa mennä täysin ristiin. Tämän vuoksi analyttisessä hierarkiaprosessissa määritetään johdonmukaisuusindeksi, jonka avulla varmistetaan riittävä johdonmukaisuus. (Saaty 1987, 172.)

Johdonmukaisuuden tarkastelu tehdään jokaisen parivertailun yhteydessä. Mikäli parivertailussa ei ole epäjohdonmukaisuutta, ominaisarvo on yhtä suuri kuin elementtien lukumäärä. Laskennassa käytetään alla esiteltyjä kaavoja 1 ja 2.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

missä CI (Consistency Index) = johdonmukaisuusindeksi

λ_{max} = vertailumatriisin suurin ominaisarvo

n = elementtien lukumäärä

$$CR = \frac{CI}{RI} \times 100 \% \quad (2)$$

missä CR (Consistency ratio) = johdonmukaisuussuhde

CI (Consistency Index) = johdonmukaisuusindeksi

RI (Random consistency index) = satunnaisindeksi

Johdonmukaisuuden tarkastelu aloitetaan kertomalla normalisoimattoman vertailumatriisin jokainen alkio painoarvoilla, jotka saatiin normalisoidusta vertailumatriisista. Taulukossa (Taulukko 7) on havainnollistettu edellä mainittua laskentaa.

Taulukko 7. Johdonmukaisuuden tarkastelu

		Tulos
Kriteeri 1	$1 * 0.334 + 5 * 0.075 + 0.5 * 0.591$	1.006
Kriteeri 2	$0.2 * 0.334 + 1 * 0.075 + 0.143 * 0.591$	0.227
Kriteeri 3	$2 * 0.334 + 7 * 0.075 + 1 * 0.591$	1.787

Vertailumatriisin suurin ominaisarvo (λ_{max}) saadaan jakamalla yllä olevan taulukon sarakkeen ”Tulos” arvot kriteerien painoarvoilla, summaamalla osamäärät yhteen ja jakamalla ne muuttujien lukumäärällä, joita esimerkissä on kolme.

$$\lambda_{max} = \frac{\frac{1.006}{0.334} + \frac{0.227}{0.075} + \frac{1.787}{0.591}}{3}$$

$$\lambda_{max} = 3,02$$

Kun maksimiominaisarvo on määritetty, voidaan käyttää aiemmin esiteltyjä kaavoja 1 ja 2, joiden avulla lasketaan johdonmukaisuusindeksi (CI) sekä johdonmukaisuussuhde (CR). Satunnaisindeksi (RI) saadaan Saatyn ennalta määrittämästä taulukosta (Taulukko 8). Se valitaan parivertailun muuttujien lukumäärän mukaan.

Taulukko 8. Satunnaisindeksi RI (Saaty 1987, 171)

Satunnaisindeksi RI										
Muuttujien määrä	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Satunnaisindeksi RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

$$CI = \frac{3,02 - 3}{3 - 1} = 0,01$$

$$CR = \frac{0,01}{0,58} \times 100 \% = 1,7 \%$$

Johdonmukaisuuden tarkastelussa pätee seuraavat ehdot:

$CR < 10 \% =$ epäjohdonmukaisuus hyväksytty

$CR \geq 10 \% =$ epäjohdonmukaisuus hylätty

Esimerkkilaskennan johdonmukaisuusindeksi on 0,01 ja johdonmukaisuussuhde 1,7 %. Epäjohdonmukaisuutta on siis hyväksyttävällä tasolla. Mikäli johdonmukaisuussuhde on suurempi tai yhtä suuri kuin 10 prosenttia tulee parivertailu tehdä uudelleen. Epäjohdonmukaisuus on tällöin liian suuri, ja päätöksentekijän tulee tarkastella sekä vertailla elementit uudelleen. (Aziz, Sorooshian & Mahmud 2016, 7219.)

5 Kriteeristö

Analyttistä hierarkiaproessia oli hyödynnetty jo aiemmin tuulivoimahankkeiden keskinäisessä vertailussa. Aiemmissa tutkimuksissa analyttisen hierarkiaproessin kriteeristöksi oli valittu pääasiassa etäisyysperusteisia tekijöitä, jotka eivät anna todellista kuvaa siitä, mikä alue on optimaalisin tuulivoimatuotannolle. Pelkkien etäisyyskriteerijoiden avulla ei voida arvioida kovin perustellusti hankkeen todellista potentiaalia tuulivoimatuotannolle.

Opinnäytetyössä käytettävä kriteeristö määritettiin yhdessä toimeksiantajan asiantuntijoiden kanssa. Siihen haluttiin sellaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat oleellisesti tuulivoimahankkeen toteuttavuuteen ja kannattavuuteen. Kriteeristön tekijät tuli olla määritettävissä avoimien paikkatietojen avulla, sillä alueiden arviointi tehdään jo ennen mitään neuvotteluja, sopimuksia, selvityksiä tai kohdevierailuja. Tarkastelussa ei voitu myöskään huomioida mm. puolustusvoimien, viranomaisten tai kunnan kantaa hankkeeseen, minkä vuoksi edellä mainitut tekijät jätettiin pois kriteeristöstä.

Opinnäytetyössä käytetyt paikkatietoaineistot ovat Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan, Suomen Ympäristökeskuksen (SYKE) ja BirdLife Suomi Ry:n 11/2021 aineistoja sekä Fintraffic lennonvarmistuksen 4/2018 aineistoa. Paikkatieto on nimensä mukaisesti tietoa kohteesta, jonka sijainti tunnetaan. Se viittaa aina johonkin tiettyyn paikkaan, alueeseen tai kohteeseen. (Paikkatieto n.d.) Paikkatietojärjestelmän (GIS = Geographical Information System) avulla paikkatietoa voidaan luoda, muokata, analysoida ja visualisoida (Lloyd 2010). Paikkatietojärjestelmänä opinnäytetyössä käytettiin QGIS-ohjelmaa.

Seuraavissa kappaleissa on esitelty tarkemmin valitut kriteerit, miten tulokset on saatu, ja miksi kyseinen kriteeri on valittu tarkasteluun. Jokaiselle kriteerille määritettiin arvotaulukko, joka esittää kunkin kriteerin yhteydessä. Arvotaulukoita käytettiin työkalun testausvaiheessa.

5.1 Tuotantoarvio

Tuotantoarviota määrittäessä jokaiselle alue-ehdokkaalle haettiin koko Suomen kattavista tuulisi-muloinneista sopiva virtaustulos, joka valittiin mahdollisimman läheltä alueen keskipistettä. Toi-meksiantaja oli tehnyt tuulisimuloinnit aiemmin. Tuulisuusarvion pohjalta toteutettiin voimalala-donta alueille. Voimalaladonnassa tuulivoimalat sijoitetaan alustavasti kohdealueelle niin, että tuotanto saadaan maksimoitua. Voimalaladonta tehtiin toimeksiantajan valmiiksi kehittämällä las-kentamenetelmällä. Tuotantoarviossa käytettiin Suomessa yleisesti käytettävää turbiinityyppiä realistisella napakorkeudella. Voimaloiden napakorkeus oli 200 m ja nimellisteho 6,2 MW.

Kun voimalaladonta oli toteutettu, laskettiin sijoittelua vastaava tuotanto kohteen tuulisuusarvion perusteella. Vuoden odotusarvoinen tuotantoarvio laskettiin toimeksiantajan valmiiksi kehittä-mällä laskentamenetelmällä. Tuotantoarviossa huomioitiin kohdekohtaiset tuotantohäviötekijät, jotka alentavat tuotantoja. Kohdekohtaiset tuotantohäviötekijät (Taulukko 9) ovat esiselvitysvai-heessa pääasiassa yleisiä suunnitteluarvoja, mutta esimerkiksi jäätämishäviöt riippuvat paikasta. Paikallinen jäätämishäviö haettiin jokaiselle alueelle Ilmatieteenlaitoksen tuuliatlaksesta: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliatlas>. Jäätämishäviön arvio saatiin määritettyä, kun alueen paikka tunnettiin. Alueiden jäätämishäviöt vaihtelivat 5,8–9 % välillä. Kohdekohtaiset häviötekijät vaihtelivat kokonaisuudessaan 12,1–15,3 % välillä.

Taulukko 9. Kohteissa käytetyt yleiset tuotantohäviöarvot

Yleiset tuotantohäviöarvot	
Käytettävyys	3,0 %
Sähköhäviöt	2,0 %
Turbiinin toiminta	1,3 %
Yhteensä	6,3 %

Lopullisen tuotantoarvion avulla laskettiin tuulivoimapuiston huipunkäyttöaika. Tuulivoimaloiden huipunkäyttöaika kertoo sen ajan pituuden, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala olisi toiminut koko ajan nimellistehollaan. Kapasiteettikerroin (CF = Capacity Factor) on puolestaan huipunkäyttöajan prosentuaalinen esitystapa, joka saadaan jakamalla huipunkäyttöaika vuoden tunneilla. (Tuulivoimasuunnitelma n.d.) Lopullinen tulos tuotantoarvion laskennasta oli siis kapasiteettikerroin, jonka mukaan alue-ehdokkaat pisteytettiin. Kriteerin avulla voitiin ottaa huomioon alueen tuulisuus, turbiinien aiheuttamat vanahäviöt sekä sijaintiriippuvainen jäätämishäviö.

Taulukko 10. Kapasiteettikerroin arviolukko

Pisteet	Kapasiteettikerroin (%)
7	> 40
6	38–40
5	36–38
4	34–36
3	32–34
2	30–32
1	< 30

5.2 Turbiinien lukumäärä

Turbiinien lukumäärä alueella saatiin tuotantoarvion yhteydessä tehdystä alustavasta tuulivoimaloiden sijoittelusta. Turbiinien määrä valittiin yhdeksi kriteeriksi, jotta alueiden vertailussa voitiin ottaa huomioon pelkästään alueen koko. Kun hankealueita etsitään paikkatietojen avulla, alueen sekä rajoitustekijöiden, kuten asutus ja luonnonsuojelualueet, välille asetetaan tietty vähimmäisetäisyys. Pinta-alaltaan ja sitä kautta turbiinimäärältään suurempaa aluetta voidaan pitää suotuisampana vaihtoehtona kuin pientä, sillä suuremmasta alueesta hankekehittäjän on mahdollista lohkaista pienempi alue, jolloin haitat ympäristöön ovat merkittävästi pienempiä. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimaloiden haitat aiheutuvat pääasiassa tuulipuistoalueen reunaturbiineista.

Taulukko 11. Turbiinien lukumäärä arvotaulukko

Pisteet	Turbiinien lukumäärä
9	> 45
8	41–45
7	36–40
6	31–35
5	26–30
4	21–25
3	16–20
2	11–15
1	6–10
0	≤ 5

5.3 Asutus

Alue-ehdokkaiden ympäristöön sijoittuvat asuin- sekä lomarakennukset haettiin viideltä eri vyöhykkeeltä: 0–1 km, 1–2 km, 2–3 km, 3–5 km sekä 5–7 km. Eri vyöhykkeet painotettiin niin, että kerroin puolittui siirryttäessä kauempaan asutusvyöhykkeeseen. Painotukset olivat seuraavat: 4, 2, 1, 0,5 ja 0,25. Painotettu asuntolukumäärä jaettiin vielä alueen turbiinimäärällä, jolloin ympäröivä asutus saatiin suhteutettua alueelle suunniteltujen turbiinien määrään.

Taulukko 12. Asutuksen arvotaulukko

Pisteet	Asutus / turbiini
9	< 10
8	10–30
7	30–50
6	50–70
5	70–90
4	90–110
3	110–130
2	130–150
1	> 150

5.4 Sähkölinja

Korkeajännitelinjojen ja -asemien etäisyydet alue-ehdokkaan keskipisteeseen määritettiin QGIS-paikkatietojärjestelmää hyödyntäen. Tarkastelussa ei otettu huomioon, onko linjoissa tai asemissa kapasiteettia, sillä tietoa ei ollut saatavilla ilman merkittävää kohdekohtaista selvitystyötä. Kriteeriin määritettiin sääntö, jonka mukaan alueille laskettiin vertailuarvo:

$$\frac{\min(D_{linja} + sakko, D_{asema})}{CF} \quad (3)$$

missä D_{linja} = etäisyys lähimpään korkeajännitelinjaan alueen keskipisteestä

D_{asema} = etäisyys lähimpään sähköasemaan alueen keskipisteestä

sakko = 10 km

CF = alueen kapasiteettikerroin

Kriteeristön avulla saatiin arvioitua oman liityntäaseman mahdollisia kustannuksia. Mikäli sähkölinja oli kymmenen kilometriä lähempänä kuin liityntäasema, tarvittiin oma liityntäasema, mikä lisää kustannuksia. Sakkoetäisyydeksi arvioitiin 10 kilometriä. Kapasiteettikerroin esiintyy kaavassa, sillä alueen parempi tuulisuus ja sen myötä isompi tuotanto antavat paremmat taloudelliset edellytykset isommille sähköliitynnän kustannuksille.

Taulukko 13. Sähkölinjan arvotaulukko

Pisteet	Sähkölinja
9	0
8	0–0,2
7	0,2–0,4
6	0,4–0,6
5	0,6–0,8
4	0,8–1
3	1–1,2
2	1,2–1,4
1	> 1,4

5.5 Tiestö

Tiekilometrit haettiin kohdealueelta ja kolmen kilometrin säteeltä sen ympäristöstä. Maastotietokannan tielinjoista rajattiin tarkasteluun kohdeluokaltaan seuraavat tiet: 12111, 12112, 12121, 12122, 12131 ja 12132. Nämä tiet ovat määritetty autoteiksi, joiden leveys on vähintään 5 m. Tiet rajattiin isompiin teihin, joiden kautta olisi teoriassa mahdollista kuljettaa suuret turbiinikomponentit.

Kriteerin tarkoituksena oli arvioida alueelle johtavaa tiestöä. Mitä enemmän tiekilometrejä alueen ympäristössä on, sen pienempiä rakennuskustannuksia tiestön osalta voidaan odottaa. Mitä suurempi alue on kyseessä, sitä enemmän tiekilometrejä tarvitaan turbiinikuljetuksiin. Tästä syystä tiekilometrit jaettiin vielä alue-ehdokkaan pinta-alalla, jolloin vertailuyksiköksi saatiin km/km².

Taulukko 14. Tiekilometrien arvotaulukko

Pisteet	km/km ²
7	> 6
6	5–6
5	4–5
4	3–4
3	2–3
2	1–2
1	< 1

5.6 Luonnonsuojelualueet

Luonnonsuojelualueiden pinta-alat haettiin viiden kilometrin säteeltä alue-ehdokkaasta. Luonnonsuojelualueet jaettiin kolmeen eri painotusluokkaan: FINIBA ja SPA, Natura 2000 sekä muut luonnonsuojelualueet. Muihin luonnonsuojelualueisiin kuului mm. yksityiset sekä kunnan omistuksessa olevat luonnonsuojelualueet, joiden käyttöä on rajoitettu luonnon monimuotoisuuden turvaamiseksi. Toimeksiantajan asiantuntijat arvioivat, että FINIBA- ja SPA-alueita tulisi painottaa viisi kertaa enemmän kuin Natura 2000 - tai muita luonnonsuojelualueita. FINIBA- ja SPA-alueet ovat linnuston suojeluun tarkoitettuja alueita, joihin turbiineilla on suuremmat vaikutukset kuin alueisiin, joissa suojellaan esimerkiksi kasveja tai metsäekosysteemiä.

Lopullinen vertailuarvo saatiin, kun eri luonnonsuojelualueiden pinta-alat oli painotettu ja laskettu yhteen sekä jaettu alueelle suunniteltujen turbiinien lukumäärällä. Kriteerin tarkoituksena oli kuvata, kuinka paljon ympärillä on luonnonsuojelualueita suhteessa suunniteltuihin turbiineihin. Suhdeluku laskettiin, jotta voitiin tasapainottaa tuulivoimapuiston hyödyt ja haittavaikutukset.

Taulukko 15. Painotettujen luonnonsuojelualueiden arvotaulukko

Pisteet	ha / turbiini
7	0
6	0–25
5	25–75
4	75–175
3	175–375
2	375–775
1	> 775

5.7 Maisema

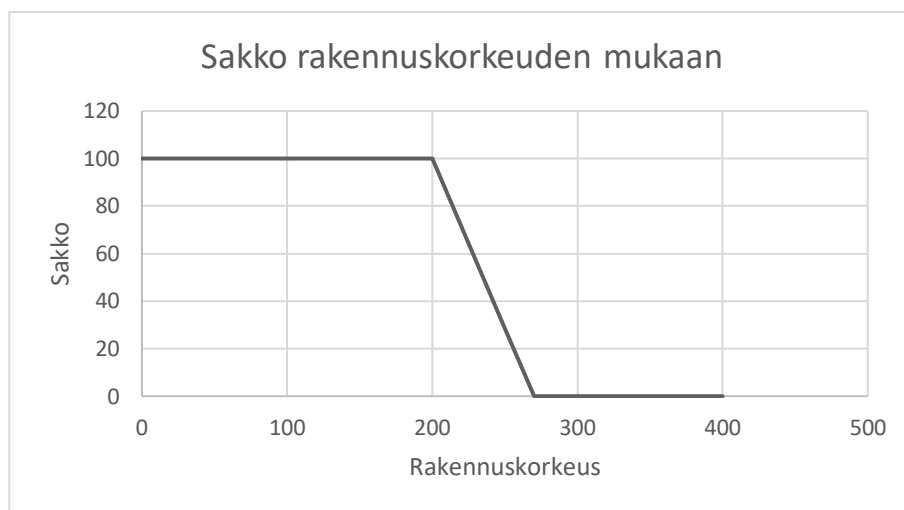
Alue-ehdokkaiden ympäristöstä haettiin kymmenen kilometrin säteeltä maisema-alueiden pinta-alat. Maisema-alueisiin lukeutuivat valtakunnallisesti sekä maakunnallisesti arvokkaat maisema-alueet. Ympäristössä olevien maisema-alueiden pinta-ala jaettiin alueelle suunniteltujen turbiinien lukumäärällä. Kriteerin avulla voitiin arvioida, kuinka suuri vaikutus suunnitelluilla turbiineilla olisi arvokkaisiin maisema-alueisiin.

Taulukko 16. Maiseman arvotaulukko

Pisteet	ha / turbiini
7	0
6	0–25
5	25–75
4	75–175
3	175–375
2	375–775
1	> 775

5.8 Korkeusrajoite

Alueiden korkeusrajoitteet saatiin lentoliikenteen korkeusrajoite paikkatietoaineistosta. Jokaiselle turbiinille laskettiin suurin sallittu rakennuskorkeus, mikäli alue sijoittui lentokentän korkeusrajoitealueelle kokonaan tai osittain. Suurin sallittu rakennuskorkeus saatiin, kun korkeusrajoitteesta vähennettiin turbiinipaikan maanpinnankorkeus. Korkeusrajoitteelle määritettiin sakkofunktio (Kuvio 5). Turbiinipaikka sai sakon, kun se rakennuskorkeutta jouduttiin rajaamaan. Kaavassa 4 on esitelty, kuinka sakkofunktio on muodostettu.



Kuvio 5. Sakko rakennuskorkeuden mukaan

100, kun $RK < L_{lim}$

$$\frac{100 \times (U_{lim} - RK)}{(U_{lim} - L_{lim})}, \text{ kun } L_{lim} \leq RK \leq U_{lim} \quad (4)$$

0, kun $RK > U_{lim}$

missä RK = rakennuskorkeus turbiinipaikalla

L_{lim} = rakennuskorkeuden alaraja = 200 m

U_{lim} = rakennuskorkeuden yläraja = 270 m

Alueen turbiineille määritetyistä sakoista laskettiin keskiarvo. Keskiarvo kertoi koko puiston saaman sakon suuruuden ja sen perusteella alue-ehdokkaat pisteytettiin. Mikäli alueella ei ollut lentoesteitä, alueen sakon suuruus oli nolla, jolloin alue sai parhaimmat pisteet.

Taulukko 17. Korkeusrajoitteen arvotaulukko

Pisteet	Sakko
11	0
10	0–10
9	10–20
8	20–30
7	30–40
6	40–50
5	50–60
4	60–70
3	70–80
2	80–90
1	90–100

5.9 Maanomistus

Alueiden maanomistus saatiin Maanmittauslaitoksen avoimesta kiinteistörekisterikartta aineistosta. Kiinteistörajat määritettiin QGIS-paikkatietojärjestelmän avulla. Alueen maanomistajien lukumäärä jaettiin alueelle suunniteltujen turbiinien määrällä. Maanomistus otettiin yhdeksi kriteeriksi, sillä mitä enemmän maanomistajia alueella on, sen enemmän vuokraneuvotteluja tulee tehdä. Kriteerin vertailuluvut kertovat, kuinka moneen maanomistajaan on oltava yhteydessä per turbiini.

Taulukko 18. Kiinteistölukumäärän arvotaulukko

Pisteet	Maanomistajaa / turbiini
6	< 0,25
5	0,25–0,5
4	0,5–1
3	1–3
2	3–5
1	> 5

5.10 Kuljetus

Alueen ja lähimmän sataman suora etäisyys määritettiin QGIS-paikkatietojärjestelmän avulla. Mi-
hin on todellisuudessa mahdollista kuljettaa tuulivoimaloita, ei ole huomioitu tässä työssä. Tämän
vuoksi tarkasteluun otettiin kaikki Suomen tavaraliikenteen satamat, ja niistä valittiin kohdealuetta
lähin satama. Suora etäisyys antoi kuvan siitä, minkälaiset kuljetuskustannukset tuulivoimaloille
tulisi. Mitä pidempi etäisyys hankealueen ja sataman välillä oli, sen vähemmän pisteitä alue-ehdo-
kas sai.

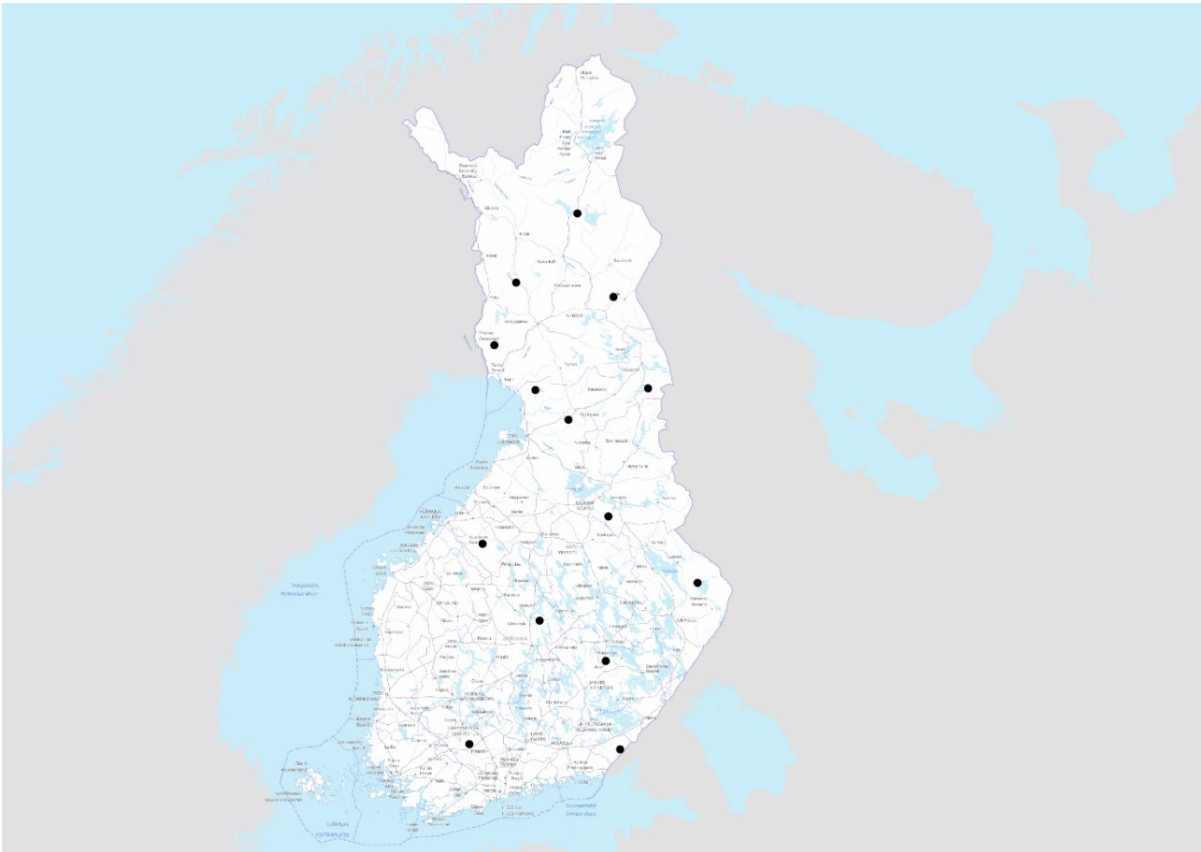
Taulukko 19. Kuljetuksen arvotaulukko

Pisteet	km
8	< 50
7	50–100
6	100–150
5	150–200
4	200–250
3	250–300
2	300–350
1	> 350

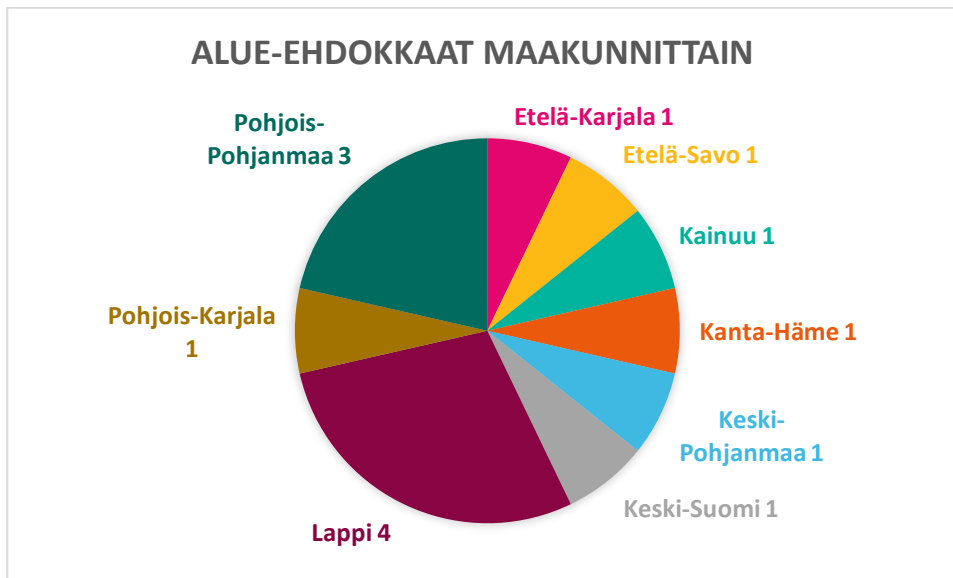
6 Alueiden vertailu

6.1 Alue-ehdokkaiden esittely

Työkalun testausvaiheeseen haluttiin mahdollisimman erilaisia alue-ehdokkaita, jotta työkalun toimivuutta voitiin arvioida monipuolisesti. Tätä varten oli tehty aiemmin paikkatietoanalyysyjä tällaisten alue-ehdokkaiden löytämiseksi. Lopullisiksi alue-ehdokkaiksi valikoitua 14 aluetta. Nämä alueet olivat eri puolelta Suomea, eri kokoisia, hyvä- ja huonotuulisia sekä niiden ympäristön luonnonsuojelu- ja maisema-alueissa sekä asutuksessa oli vaihtelevuutta. Alue-ehdokkaat on esitelty kartalla (Kuvio 6) sekä niiden jakautuminen maakunnittain kuviossa (Kuvio 7).



Kuvio 6. Alue-ehdokkaat kartalla



Kuvio 7. Alue-ehdokkaat maakunnittain

6.2 Työkalun testaus

Alue-ehdokkaille määritettiin kappaleessa 5 esiteltujen kymmenen kriteerin arvot, minkä jälkeen ne voitiin pisteyttää määritettyjen arvotaulukoiden mukaan. Alue-ehdokkaiden saamat pisteet kriteereistä on esitelty taulukossa (Taulukko 20). Kaikki analyyttisen hierarkiaproessin laskennat toteutettiin Excel-tilukkolaskentatyökalulla.

Taulukko 20. Alue-ehdokkaiden saamat pisteet

Alue	Kapasiteetti-kerroin	Turbiinien määrä	Asutus	Sähköliityntä	Tiekilometrit	Kuljetus	Luonnon-suojelalueet	Maisema	Korkeusrajoite	Maanomistus
1	5	2	6	7	6	7	5	7	10	2
2	6	1	7	7	4	5	5	4	8	3
3	6	6	9	8	2	5	3	4	11	4
4	7	2	4	7	3	7	4	2	11	3
5	6	2	9	5	2	7	2	2	11	6
6	7	2	2	8	7	4	5	4	11	4
7	4	9	9	6	1	3	4	5	11	6
8	4	9	9	7	2	4	6	6	11	4
9	4	9	9	7	1	8	6	7	11	3
10	2	9	9	6	1	6	5	5	11	3
11	7	4	9	6	3	2	2	7	11	5
12	5	4	8	7	3	7	3	3	11	3
13	6	9	8	7	2	7	4	6	11	3
14	6	4	9	4	3	4	2	5	11	4

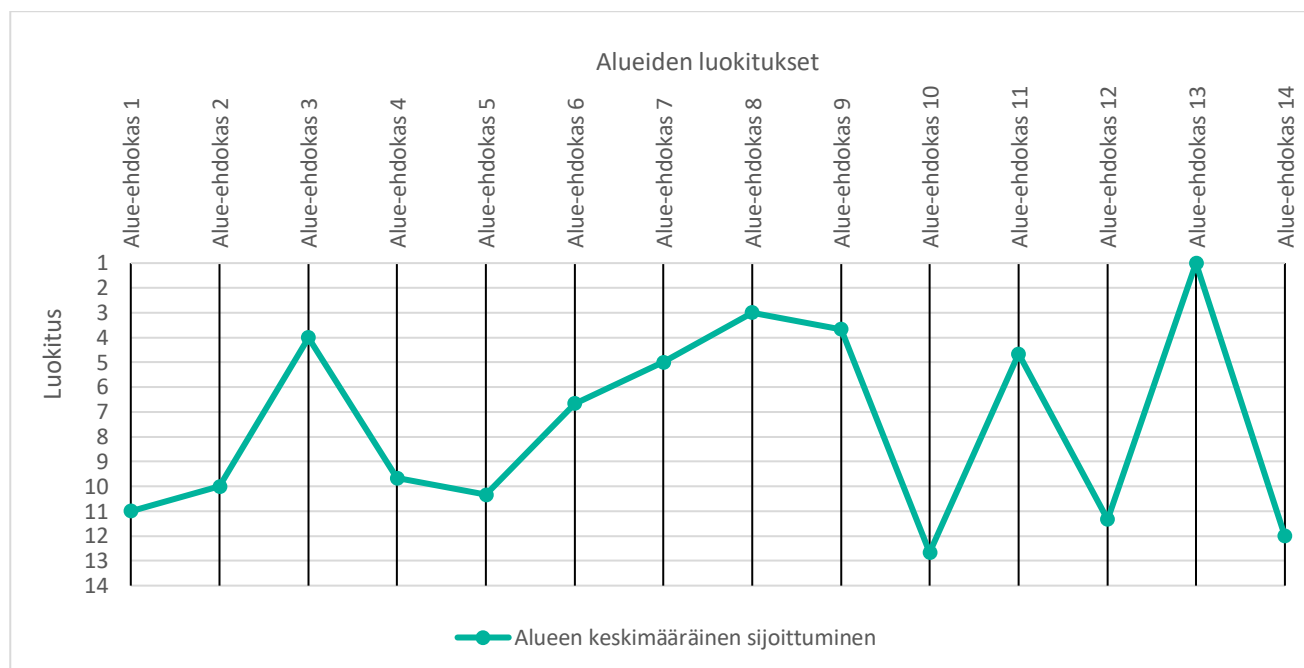
Alue-ehdokkaiden parivertailu voitiin tehdä suoraan saatujen pisteiden pohjalta, jolloin saatiin täysin johdonmukaiset vertailut. Kriteeristön parivertailuun käytettävä taulukko puolestaan toimitettiin kolmelle tuulivoima-asiantuntijalle. Heitä opastettiin vertailemaan jokaista kriteeriä keskenään ja määrittämään niiden keskinäiset painoarvot. Asiantuntijoille toimitettiin tarkempi kuvaus tarkasteltavista kriteereistä, jolloin heidän oli helpompi arvioida niiden keskinäistä tärkeyttä. Jokaisen asiantuntijan tekemiin parivertailuihin suoritettiin johdonmukaisuustarkastelu, eikä kenenkään tarvinnut uusia tekemäänsä parivertailua.

Taulukossa (Taulukko 21) on esitelty asiantuntijoiden taulukoiden pohjalta lasketut painoarvot jokaiselle kriteerille. Mitä suurempi painoarvo kriteerillä on, sen tärkeämpänä sitä on pidetty parivertailun perusteella. Asiantuntijoiden määrittämistä painoarvoista voidaan todeta, että erityisesti kapasiteettikerrointa pidetään tärkeänä potentiaalisten tuulivoima-alueiden tunnistamisessa.

Taulukko 21. Kriteerien painoarvot

	Asiantuntija 1	Asiantuntija 2	Asiantuntija 3
Kapasiteettikerroin	0,285	0,215	0,301
Turbiinien lukumäärä	0,095	0,138	0,106
Asutus	0,143	0,065	0,121
Sähköliityntä	0,071	0,230	0,169
Tiekilometrit	0,048	0,028	0,027
Kuljetus	0,032	0,032	0,021
Luonnonsuojelualueet	0,095	0,058	0,084
Maisema	0,048	0,016	0,042
Korkeusrajoite	0,041	0,153	0,031
Maanomistus	0,143	0,064	0,098

Alue-ehdokkaiden kokonaispainoarvot määritettiin jokaisen asiantuntijan painokertoimia hyödyntäen. Alue-ehdokkaat laitettiin paremmuusjärjestykseen 1–14 siten, että suurimman kokonaispainoarvon saanut alue asetettiin listassa sijalle 1. Alue-ehdokkaat asetettiin asiantuntijoiden listojen perusteella keskimääräisen sijoittumisen mukaan (Kuvio 8). Alue-ehdokkaat on nimetty 1–14.



Kuvio 8. Alueiden luokitukset keskimääräisen sijoituksen mukaan

Alue-ehdokkaille tehtiin siis kolme eri tarkastelua. Alue-ehdokasta 13 voidaan pitää erityisen potentiaalisena vaihtoehtona tuulivoimatuotantoon, sillä se nousi jokaisen asiantuntijan listassa ensimmäiseksi. Asiantuntijoiden määrittämät kriteerien painoarvot poikkesivat toisistaan, joten alue-ehdokkaat 13 on monesta eri näkökulmasta potentiaalinen tuulivoimatuotantoon. Alue sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla, jossa sijaitsee suurin osa Suomen tuulivoimakapasiteetista.

6.3 Työkalun toimivuuden arviointi

6.3.1 Vahvuudet

Työkalu palvelee sille asetettua tavoitetta eli mahdollistaa tuulivoiman hankealueiden keskinäisen vertailun sekä niiden järjestämisen parhaimmasta huonoimpaan. Kriteeristöksi valitut tekijät kuvaavat monipuolisesti alueen potentiaalia tuulivoimantuotantoon monesta eri näkökulmasta. Kriteeristö ottaa hyvin huomioon niin teknistaloudellisia tekijöitä kuin ympäristötekijöitä. Näitä tekijöitä on mahdollista painottaa eri tavalla riippuen päätöksentekijän omista preferensseistä.

Hierarkia on suhteellisen helposti muokattavissa. Mikäli tarkasteluun halutaan lisätä tai poistaa elementtejä, se onnistuu ilman suurempia työvaiheita. Laskenta on kokonaisuudessaan yksinkertaista sekä helposti ymmärrettävää. Analyttinen hierarkiaprosessi on todettu useissa tutkimuksissa toimivaksi monimutkaisissakin päätöksentekoprosesseissa, minkä vuoksi sitä voidaan pitää luotettavana myös tässä yhteydessä.

Kriteeristön arvot ovat määritettävissä eri paikkatietojen pohjalta, mikä mahdollistaa työkalun automatisoinnin. Kun toimeksiantaja saa työkalun automatisoitua, ihmistyö vähenee ja työkalun käytettävyys paranee. Työkalussa käytettiin ainoastaan avoimia paikkatietoja sekä laskennallisia menetelmiä, mikä mahdollistaa kohteiden vertailun ja arvioinnin puhtaasti työpöydän ääressä.

6.3.2 Kehityskohteet

Työkalun kehityskohteet syntyvät pääasiassa analyttisen hierarkiaprosessin epäkohdista. Arvotaulukoiden määrittämisessä ei ole yhtä oikeaa lopputulosta. Esimerkiksi jotkut hankekehittäjät voivat pitää pienempiä tuulivoima-alueita parempana vaihtoehtona, sillä resurssit eivät riitä suurempiin alueisiin. Toiset hankekehittäjät eivät puolestaan ole kiinnostuneita pienistä alueista, sillä suuremmat alueet antavat enemmän joustovaraa. Näissä tapauksissa sama alue saisi eri määrän pisteitä sen mukaan, kuka arvotaulukon on määrittänyt. Tällaiset tekijät aiheuttavat prosessiin epävarmuutta, sillä arvotaulukkojen painotukset ovat hankekehittäjästä riippuvia.

Jotta asiakkaan preferenssit voidaan ottaa paremmin huomioon, työkalun rinnalle olisi hyvä kehittää standardikysely. Kyselyssä olisi hyvä olla tarkentavia kysymyksiä epävarmuustekijöistä, joita arvotaulukoiden määrittämisessä voi syntyä. Kysely toimitettaisiin kriteerien parivertailun yhteydessä, ja sen avulla toimeksiantajan asiantuntijat saisivat paremman käsityksen jokaisen hankekehittäjän mieltymyksistä esimerkiksi hankealueen kokoa pisteyttäessä.

Haapalinna & Korpela (1995) tuovat esille AHP-menetelmän kiistanalaisen ominaisuuden, jossa vaihtoehtojen paremmuusjärjestys saattaa muuttua, kun analyysiin liitetään tai poistetaan uusia vaihtoehtoja (Haapalinna & Korpela 1995, 148.) Tässä työssä kehitetyn työkalun toimivuuden testaamiseksi vaihtoehtojen parivertailuista poistettiin yksi alue-ehdokka. Yhden alue-ehdokkaan poistaminen aiheutti alue-ehdokkaiden kokonaispainoarvojen muutoksen. Tämä johti siihen, että jokaisen asiantuntijan listassa saman alue-ehdokkaan sijoitus parani, vaikka poistettu alue oli aiemmissa listauksissa sen alapuolella. Tilanne aiheutui, koska sijoitusta parantaneen alue-ehdokkaan kokonaispainoarvo oli hyvin lähellä ylempänä olevan alue-ehdokkaan kokonaispainoarvoa. Menetelmän ominaisuus esiintyy erityisesti tilanteissa, joissa elementtien lukumäärä on merkittävä. Tarkastelun lopputulosta ei siis voida pitää täysin pysyvänä, vaikka edellä mainittua tilannetta ei aina synny.

Mikäli päätöksentekijä pitää parivertailussa esimerkiksi asutusta tärkeämpänä kuin maanomistajien lukumäärää, voivat ne olla lopullisissa painoarvoissa toisinpäin. Tämä aiheutuu päätöksentekijän epäjohdonmukaisuudesta, vaikka se olisikin hyväksytyllä tasolla. Sama tilanne voi esiintyä, kun kriteerejä lisätään parivertailuun vertailemalla ainoastaan lisättyä kriteeriä muihin kriteereihin tai poistetaan kriteereitä jo tehdystä parivertailusta. Tällöin kriteerien tärkeysjärjestys voi muuttua, sillä kriteerien keskeiset vertailuarvot muuttuvat.

7 Pohdinta

Työn tavoitteena oli kehittää toimeksiantajalle avoimiin paikkatietoihin sekä laskennallisiin menetelmiin perustuva työkalu, jonka avulla voidaan vertailla eri hankealueita keskenään. Potentiaalisia tuulivoima-alueita etsitään ja tunnistetaan jatkuvasti, mutta niiden keskinäinen vertailu ei ole ollut nopeaa, perusteltua eikä automatisoitua. Tästä syystä toimeksiantaja halusi kehittää työkalun, jonka avulla työskentelyä voidaan systematisoida.

Työn tavoitteen saavuttamiseksi opinnäytetyölle asetettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

1. Mitkä tekijät rajoittavat tuulivoiman hankealueiden valinnassa?
2. Mitkä tekijät mahdollistavat tuulivoimahankkeen alueelle?
3. Miten analyttistä hierarkiaproessia voidaan soveltaa tuulivoiman hankealueiden valinnassa?

Työn kirjallisuuskatsauksessa esitettiin tiiviisti, mutta informatiivisesti tuulivoimahankkeiden keskinäiseen arviointiin oleellisesti vaikuttavat tekijät. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena oli poimia sellaista tietoa tuulivoimahankkeen suunnittelusta, mitä voitiin hyödyntää työkalun kehittämisessä. Työn tuloksena voidaan todeta, että tutkimuskysymyksiin löydettiin laajasti vastauksia eri tutkimusten, artikkelien sekä kirjallisuuden avulla.

Tuulivoimahankkeen rajoittavat tekijät voidaan todeta merkittäväksi hankkeen toteutettavuuden kannalta. Kappaleessa 3.1 on esitetty nämä tuulivoimahankkeen rajoittavat tekijät, jotka tulee ottaa huomioon jo hankealuetta valittaessa. Mikäli esiteltyjä rajoitustekijöitä ei huomioida, on hankkeen toteutuminen jo lähtökohtaisesti epävarmalla pohjalla.

Toista tutkimuskysymystä lähestyttiin teknistaloudellisesta näkökulmasta (kappale 3.2), sillä työkalun kannalta oleellisessa osassa oli eri hankkeiden kannattavuuden arviointi. Tutkimuskysymystä analysoitiin hankekehittäjän näkökulmasta, jossa hankkeen kustannustekijät ovat merkittävässä osassa. Tutkimuskysymys ”Mitkä tekijät mahdollistavat tuulivoimahankkeen” on moninainen, ja se voidaan ymmärtää monella eri tapaa. Joitakin rajoitustekijöitä voidaan pitää myös tuulivoimahankkeen mahdollistavina tekijöinä kuten kuntaa sekä maanomistajia. Kunnan ja maanomistajien myönteinen suhtautuminen tuulivoimahankkeeseen mahdollistavat tuulivoimahankkeen alueelle.

Kolmannen tutkimuskysymyksen avulla löydettiin useita tutkimuksia, joissa analyttistä hierarkiaprosessia oli hyödynnetty tuulivoiman hankealueiden valinnassa. Tutkimukset olivat hyödyllisiä, sillä niiden avulla analyttinen hierarkiaprosessi voitiin todeta toimivaksi hankealueiden keskinäisessä vertailussa. Tutkimuksissa käytetyt kriteeristöt eivät kuitenkaan vastanneet täysin sitä, mitä toimeksiantaja halusi työkalulta. Tästä syystä kriteeristö luotiin monipuolisemmaksi. Monipuolisen kriteeristön ansiosta opinnäytetyössä kehitetty työkalu sai uutuusarvoa ja vastasi näin paremmin toimeksiantajan odotuksiin.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi työkalu, jossa tuulivoimakohteita arvioitiin ja vertailtiin keskenään käyttäen ainoastaan avoimia paikkatietoja sekä laskennallisia menetelmiä. Kehitetty työkalu mahdollistaa kohteiden vertailun ja arvioinnin puhtaasti työpöydän äärellä ennen tarvittavia neuvotte-luja, sopimuksia tai selvityksiä. Mikäli työkalu otetaan tulevaisuudessa käyttöön, se luo uuden palvelukokonaisuuden toimeksiantajalle. Hankekehittäjät voivat jatkossa toimittaa useita hankealueita tarkasteluun ja määrittää itse, mitä tekijöitä painotetaan potentiaalisen alueen valinnassa. Työkalu on myös suunniteltu niin, että se voidaan tulevaisuudessa automatisoida lähes täysin.

Opinnäytetyössä päästiin kokonaisuudessaan sille asetettuihin tavoitteisiin. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena oli ymmärtää ja dokumentoida tuulivoiman suunnittelun tärkeimmät tekijät. Analyttinen hierarkiaprosessi oli oleellisessa osassa työkalun kehityksessä, minkä vuoksi sen toimintaan perehdyttiin tarkasti eri tutkimusten avulla. Opinnäytetyön toiminnallinen osuus oli työkalun luominen ja sen testaaminen. Työkalun toimivuus arvioitiin opinnäytetyössä (Kappale 6.3) ja se todettiin kokonaisuudessaan toimivaksi, vaikka kehityskohteitakin löydettiin.

Työkalu luo toimeksiantajalle uuden palvelukokonaisuuden, jota voidaan tarjota jatkossa hankekehittäjille. Työkalun vahvuutena on se, että se perustuu avoimiin paikkatietoihin, se on lähes automatisoitavissa sekä alueita voidaan vertailla keskenään laskennallisten menetelmien avulla niin, että hankekehittäjän preferenssit otetaan huomioon.

Lähteet

- Aikio, J. 2021. Tuulivoimapuiston hankekehitys ja henkilöstön osaamiskartoitus. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Viitattu 05.01.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500148/Aikio_Jenna.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- Aziz N.F., Sorooshian S. & Mahmud F. 2016. MCDM-AHP method in decision makings. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 11, No. 11. 7217-7220.
- Baseer, M. A., Rehman, S., Meyer, J. P., & Alam, M.M. 2017. GIS-based site suitability analysis for wind farm development in Saudi Arabia. *Energy*, 141, 1166–1176. Viitattu 06.10.2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217316857>.
- Brower, M. 2012. Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc.
- Esiselvitys ja sopivan alueen etsintä. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 05.01.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/esiselvitys-ja-sopivan-alueen-etsinta>.
- Etelä-Pohjanmaan, Keski-Pohjanmaan ja Pohjanmaan tuulivoimaselvitys. 2021. FCG Finnish Consulting Group Oy. Pohjanmaan liitto, Etelä-Pohjanmaan liitto ja Keski-Pohjanmaan liitto. Raportti. Viitattu 16.12.2021. https://www.keski-pohjanmaa.fi/dl/935/b80057/Tuulivoimaselvitys_raportti.pdf.
- Etäisyys asutukseen. N.d. Suomen tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 05.10.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tuulivoimasta-kunnille/tuulivoima-ymparistossa/etaisyys-asutukseen>.
- Haapalinna, I. & Korpela, J. 1995. Analyttinen hierarkiaproessi ja sen käyttö puolustusvoimien suunnittelussa. Tiede ja ase. Vol. 53. s. 138–169. <https://journal.fi/ta/article/view/47776>.
- Hietanen M. 2021. Lentoeste – este tuulivoimahankkeelle? Tuulivoima ja yhteiskunta. Artikkelin Suomen Tuulivoimayhdistyksen julkaisemasta tuulivoimalehdestä. Viitattu 03.12.2021. <https://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/lentoeste-este-tuulivoimahankkeelle.html>.
- Hujanen A., Joensuu K., Leino L. & Viljanen J. 2021. Tuulivoimarakentamisen ja aluevalvonnan yhteensovittaminen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta. Viitattu 21.12.21. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163302/21-2021-Tuulivoimarakentamisen%20ja%20aluevalvonnan%20yhteensovittaminen.pdf?sequence=7&isAllowed=y>.

Kananen J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu -sarja.

Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet. Tampere: Tammertekniikka.

Laskennallisten menetelmien kärkeasiantuntija. N.d. Numerola Oy:n verkkosivut. Viitattu 28.09.2021. <https://www.numerola.fi/yritys/>.

Linnustovaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa. 2016. Julkaisu Valtioneuvoston verkkosivuilta. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. Viitattu 03.01.2022. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/75407>.

Lloyd, C. D. 2010. Spatial Data Analysis – An Introduction for GIS users – 1.1. Spatial Data Analysis. Oxford University Press. Knovel-tietokanta. Viitattu 30.09.2021. <https://app.knovel.com/hot-link/pdf/id:kt00BZ6PU2/spatial-data-analysis/introducti-spatial-data>.

Maisemavaikutusten arviointi tuulivoimarakentamisessa. 2016. Julkaisu Valtioneuvoston verkkosivuilta. Ympäristöministeriö. Rakennetun ympäristön osasto. Viitattu 22.11.2021. <https://valtioneuvosto.fi/julkaisut/julkaisu?pubid=URN:ISBN:978-952-11-4487-5>.

Mikkonen A. & Paalatie H. 2019. Korvaukset maanomistajille – kompensatiota myös ilmatilan käytöstä. Artikkelin Suomen Tuulivoimayhdistyksen julkaisemasta tuulivoimalehdestä. Viitattu 03.12.2021. <https://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/tuulivoima-ja-yhteiskunta/korvaukset-maanomistajille-kompensatiota-myois-ilmatilan-kaytosta.html?p64=3>.

Miksi kunnan kannattaa kiinnostua tuulivoimasta? N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 03.12.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimatuotanto-on-turvallista>.

Miksi tuulivoimaa. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 04.10.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/miksi-tuulivoimaa>.

Milloin tarvitaan lentoestelupa? 2021. Motivan verkkosivut. Viitattu 29.09.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/lupamenettelyt/milloin_tarvitaan_lentoestelupa.

Paikkatieto. N.d. Tilastokeskuksen verkkosivut. Tietoa tilastoista. Käsitteet. Viitattu 30.09.2021. <https://www.stat.fi/meta/kas/paikkatieto.html>.

Piispanen J., Laitinen J. & Hertteli P. 2011. Selvitys ilmailun asettamien rajoitusten vaikutuksesta tuulivoimahankkeiden toteuttamismahdollisuuksiin. Ramboll. Viitattu 03.01.2022. <https://docplayer.fi/2165503-Selvitys-ilmailun-asettamien-rajoitusten-vaikutuksesta-tuulivoimahankkeiden-toteuttamismahdollisuuksiin-paivamaara-6-9-2011.html>.

Puolletut hankkeet. 2021. Ohje Puolustusvoimien toiminnan huomioonottamiseksi tuulivoimarakentamisessa. Puolustusvoimien verkkosivut. Viitattu 03.12.2021. <https://puolustusvoimat.fi/tuulivoimaloiden-lausuntoprosessi>.

Remes, M. 2019. Tuulivoiman kasvu haastaa verkon suunnittelijat. Fingrid Oyj:n verkkosivut. Viitattu 05.01.2022. <https://www.fingridlehti.fi/tuulivoima-verkon-suunnittelijat/>.

Saaty, R.W. 1987. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9, 3–5, 161–176. Viitattu 24.09.2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738?via%3Dihub>.

Saaty, T. L., & Kearns, K. P. 2014. *Analytical planning: The organization of system* Vol. 7. Pergamon Press. Viitattu 29.11.2021. https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=fHfiBQAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Saaty,+T.+L.,+Kearns,+K.+P.+1985.+Analytical+Planning:+The+Organization+of+Systems.+Oxford.+Pergamon+Press.&ots=pbpYofLeAE&sig=hZK-VcJtn2HNHbz9I8zInZzYdVE&redir_esc=y#v=onepage&q=Saaty%2C%20T.%20L.%2C%20Kearns%2C%20K.%20P.%201985.%20Analytical%20Planning%3A%20The%20Organization%20of%20Systems.%20Oxford.%20Pergamon%20Press.&f=false.

Suomen Natura 2000 -alueet. 2013. Päivitetty 19.10.2020. Ympäristöhallinnon yhteiset verkkosivut. Viitattu 22.11.2021. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Luonto/Suojelualueet/Natura_2000_alueet?f=Lapin_ELYkeskus.

Suuronen, A. 2021. Keski-Suomen tuulivoimarakentaminen - lainsäädäntö ja muu tuulivoiman sijoittamista koskeva ohjaus maakunnan tuulivoimahankkeiden suunnittelussa. Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus. Viitattu 16.11.2021. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/182294/Keski-Suomen%20tuulivoimarakentaminen.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.

Sähkösopimukset. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 05.01.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/sahkosopimukset>.

Tuulimittaus. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 05.01.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/tuulimittaus>.

Tuulivoimahankkeen suunnittelu ja toteutus. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 05.01.2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/tuulivoimahankkeen-suunnittelu-ja-toteutus>.

Tuulivoimahankkeet Suomessa 2021. Julkaisu Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivuilla. Viitattu 30.09.2021. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/final-16.2.-julkaisuun-tuulivoimahankelista-1_2020.pdf.

Tuulivoimalan äänet. 2021. Motivan verkkosivut. Päivitetty 29.07.2021. Viitattu 05.10.2021. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoiman_ymparisto-ja_muut_vaikutukset/tuulivoimalan_aanet.

Tuulivoiman maisemavaikutukset. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 21.12.21. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-ymparistovaikutukset/tuulivoiman-maisemavaikutukset>.

Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5/2016. Julkaisu Valtioneuvoston verkkosivuilla. Viitattu 17.12.2021. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/79057>.

Tuulivoimasananastoa. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 23.11.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tuulivoimasananastoa>.

Tuulivoima Suomessa. 2020. Julkaisu Suomen Tuulivoimayhdistys verkkosivuilla. Viitattu 30.09.2021. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot_2020_julkaisuun-10.2.pdf.

Tärkeät lintualueet. N.d. BirdLife Suomen verkkosivut. Suojelu ja tutkimus. Viitattu 22.11.2021. <https://www.birdlife.fi/suojelu/alueet/>.

Wake Effect. 2003. Danish Wind Industry Association verkkosivut. 23.11.2021. <http://www.xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/wake.htm>.

Wind Projects – Initial Site Selection. 2016. Artikkel Energypedian verkkosivuilla. Viitattu 06.10.2021. https://energypedia.info/wiki/Wind_Projects_-_Initial_Site_Selection.

Ympäristövaikutusten arviointi. N.d. Suomen tuulivoimayhdistyksen verkkosivut. Viitattu 14.12.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-hanke/ymparistovaikutusten-arviointi>.