

Jonna-Riikka Alanen

## **SUUNNITTELUAUTOMAATION HYÖDYNTÄMINEN TUULIPUISTOJEN SUUNNITTELUSSA**

# **SUUNNITTELUAUTOMAATION HYÖDYNTÄMINEN TUULIPUISTOJEN SUUNNITTELUSSA**

Jonna-Riikka Alanen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2024  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, Yhdyskuntatekniikan suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä(t): Jonna-Riikka Alanen

Opinnäytetyön nimi: Suunnitteluautomaation hyödyntäminen tuulipuistojen suunnittelussa

Työn ohjaaja(t): Jussi Pajula, Sami Stenius

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: kevät 2024

Sivumäärä: 32

---

OPINNÄYTETYÖN YHTEYDESSÄ LAADITTU JULKAISEMATON SISÄLTÖ ON OLLUT OHJAAJIEN KÄYTÖSSÄ OPINNÄYTETYÖTÄ OHJATTAESSA.

Tuulipuistorakentaminen on ollut Suomessa viime vuosina nosteessa. Tuulipuistoja suunnitellaan osittain samanaikaisesti rakennusvaiheen kanssa, ja suunnittelun nopean reagointikyvyn turvaamiseksi ilmeni tarve tutkia erilaisten Ramboll Finland Oy:ssä kehitettyjen automaatiotyökalujen hyödyntämistä tuulipuistojen geo- ja infrasuunnittelussa. Automaatiotyökaluja hyödyntämällä suunnittelijan resurssit vapautuvat vaiheisiin, joissa niitä eniten tarvitaan. Suunnitteluautomaatio on vielä melko vähän tunnettu osa-alue suunnittelussa, mutta tekniikan hyödyntäminen kehittyy nopeasti. Suunnitteluautomaation kehittämiseksi tarvitaan ohjelmointiosaamisen lisäksi alan tuntemusta ja kokemusta suunnittelutyöstä. Tarpeet suunnitteluautomaation kehittämiseksi tulevat suoraan käytännöstä, kun suunnittelija huomaa esimerkiksi samanlaisena toistuvan työvaiheen tai työvaiheen, jossa virheen mahdollisuus on suuri.

Opinnäytetyön aiheena on suunnitteluautomaation hyödyntäminen tuulipuistojen suunnittelussa. Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää Ramboll Finland Oy:ssä kehitetyistä automaatiotyökaluista ne, jotka soveltuvat erityisesti tuulipuistojen geo- ja infrasuunnitteluun. Lisäksi tavoitteena oli löytää kehitystarpeita automaatiotyökaluille ja kartoittaa uusien automaatiotyökalujen tarvetta.

Suunnittelun automaatiotyökaluista kerättiin tietoa testaamalla niitä testiprojektien avulla. Testiprojekteina hyödynnettiin jo toteutettuja hankkeita. Automaatiotyökaluja testaamalla saatiin tietoa niiden kehitystarpeista ja käytettävyydestä tuulipuistosuunnittelun eri vaiheissa.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tietoa automaatiotyökaluista, jotka toimivat sellaisenaan ja jotka vaativat lisäkehitystä vastatakseen tarpeeseen suunnittelutyön optimoinnista. Lisäksi tuloksena havainnoitiin myös uusien automaatiotyökalujen tarvetta.

---

Asiasanat: Algoritmit, automaatio, geosuunnittelu, tuulipuistot, tuulivoima-alueet, tuulivoimalat

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Civil Engineering, Option of Municipal Engineering

---

Author(s): Jonna-Riikka Alanen

Title of thesis: Utilization of Computational Design Automation When Designing Wind Parks

Supervisor(s): Jussi Pajula, Sami Stenius

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024

Number of pages: 32

---

THE NON-PUBLISHABLE CONTENT PREPARED IN CONNECTION WITH THE THESIS HAS BEEN AVAILABLE FOR THE INSTRUCTORS DURING THE THESIS PROCESS.

The topic of the thesis is the use of design automation in the design of wind parks. The aim of the thesis was to find those automation tools developed at Ramboll Finland Oy that are particularly suitable for geo and infrastructure planning of wind parks. In addition, the goal was to find development needs for automation tools and find the need for new automation tools.

Data was collected from design automation tools by testing them using test projects. As test projects, the projects already carried out were utilized. Testing of automation tools provided information on their development needs and usability at different stages of wind park design. The data was tabulated to ensure easy exploitation of the results.

The result of the thesis was information on automation tools that work in wind park design as such, and which require further development to meet the need for optimization of design work. Moreover, the need for new automation tools was also observed as a result.

---

Keywords: Algorithm, automation, geotechnical engineering, wind farm, wind power, wind power area

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	TUULIVOIMAHANKE YLEISESTI .....	7
2.1	Tuulivoimahankkeen vaiheet .....	8
2.2	Tuulipuiston kaavoitus ja ympäristövaikutusten arviointimenettely .....	9
2.3	Tuulivoimarakentamisen ilmastovaikutukset .....	10
3	TUULIPUISTOJEN GEO- JA INFRASUUNNITTELU .....	13
3.1	Tuulipuiston geosuunnittelu .....	13
3.1.1	Tuulipuiston maaperätutkimukset .....	15
3.1.2	Tuulivoimalan perustuksen geosuunnittelu .....	16
3.1.3	Tuulipuiston nostokenttien ja teiden geosuunnittelu .....	19
3.2	Tuulipuiston infrasuunnittelu .....	19
3.3	Tuulipuiston rakentamisen as built -vaihe .....	21
4	SUUNNITTELUAUTOMAATIO .....	22
4.1	Algoritminen suunnittelu .....	22
4.2	Suunnittelussa hyödynnettävät automaatiotyökalut .....	24
5	SUUNNITTELUAUTOMAATION HYÖDYNNETTÄVYYS TUULIPUISTOJEN SUUNNITTELUSSA .....	25
5.1	Testiprojektien esittely .....	25
5.2	Testatut automaatiotyökalut .....	26
6	YHTEENVETO .....	27
	LÄHTEET .....	29

# 1 JOHDANTO

Kiihtyvän ilmastomuutoksen seurauksena on erityisen tärkeää saada rakennettua ja kehitettyä energiantuotantomenetelmiä, jotka kompensoivat hiilipäästöjä ja edesauttavat vihreää siirtymää. Suomi on reagoinut tähän päivittämällä ilmastolakia vuonna 2022. Siinä on säädetty tavoite, jonka mukaan Suomen tulisi olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä (Ilmastolaki 423/2022), joten lakiinkin perustuen sähköntuotantomenetelmiä on syytä kehittää. Tuulipuistojen rakentaminen on yleistynyt viime vuosien aikana, ja vuonna 2023 Suomessa tuotetusta sähköstä 18,5 % olikin tuulivoimalla tuotettua (Suomen Tuulivoimayhdistys 2023). Ennusteiden mukaan tuulivoimalla katetaan Suomen energiantuotannosta kolmannes vuoteen 2026 mennessä ja vuoteen 2030 mennessä jopa yli puolet (Ympäristöministeriö 2024).

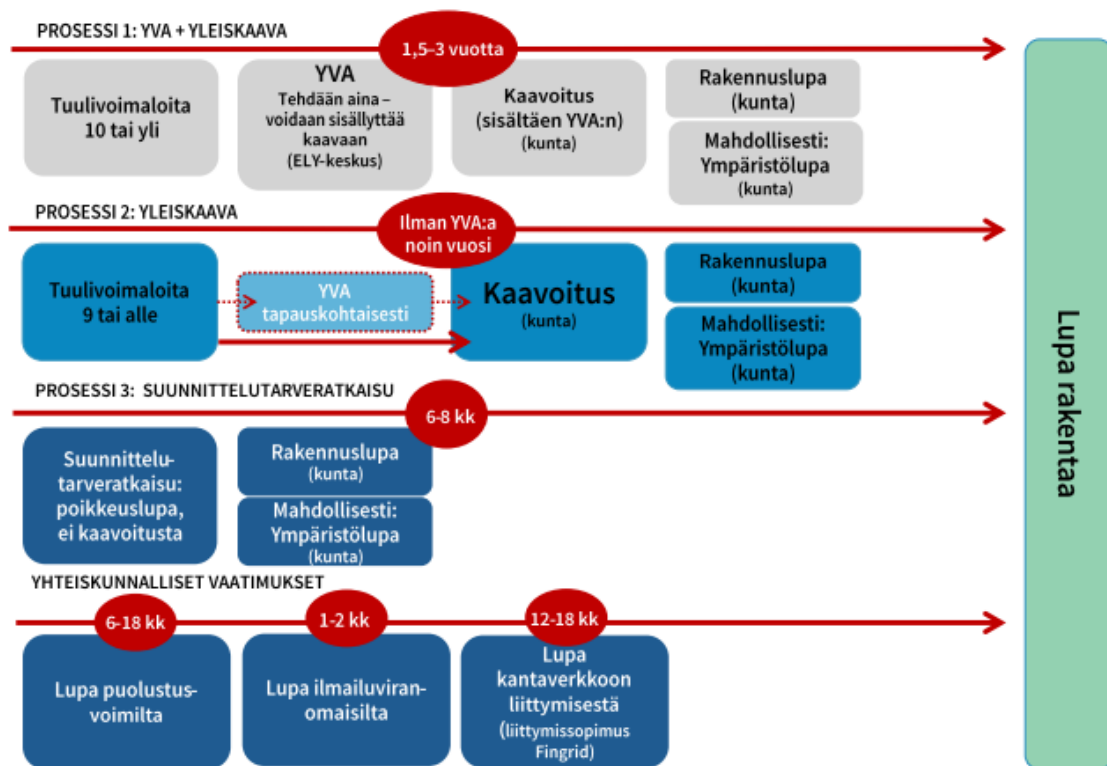
Tuulipuistojen toteutussuunnittelu on useimmiten hyvin laaja ja nopeasti etenevä prosessi, joka etenee työmaan edistymisen tahdissa. Muutoksia suunnitelmiin tehdään usein rakentamisolosuhteiden mukaan, ja tällöin suunnittelun reagoitakykyyn on oltava tehokasta, jolloin aineiston tuottaminen vaatii suunnittelijan resursseja. Automaatiotyökalujen avulla voidaan nopeuttaa ja tehostaa reagoitua työmaan tarpeiden mukaan sekä ohjata suunnittelun resurssit työvaiheisiin, joissa tarvitaan erityisesti vaihtoehtojen vertailuja ja asiantuntijatyötä. (Pajula 2023.)

Automaatiotyökalujen hyödyntämispotentiaalista tuulivoimahankkeiden geo- ja infrasuunnittelussa on vielä varsin vähän kokemusta. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää ja tutkia erilaisten suunnittelussa käytettävien, Ramboll Finland Oy:ssä kehitettyjen automaatiotyökalujen toimivuutta ja käytettävyyttä tuulipuistojen geo- ja infrasuunnittelussa. Opinnäytetyössä selvitetään käyttökokemuksia automaatiotyökaluista erilaisten testiprojektien avulla samalla havainnoiden kehityskohteita ja mahdollisia tarpeita uusille automaatiotyökaluille. Lisäksi työkalujen käytöstä kerätään tietoa haastattelemalla automaatiotyökaluja työssään käyttäneitä asiantuntijoita.

Opinnäytetyön tilaajana on Ramboll Finland Oy, joka on osa vuonna 1945 Tanskassa perustettua Ramboll-konsernia. Ramboll on kansainvälinen suunnittelu- ja konsulttialan yritys, jonka tavoitteena on löytää kestäviä ratkaisuja yhteiskunnan rakentamiseksi ja kehittämiseksi yhdessä asiakkaan kanssa. Ramboll toimii muun muassa energian, infrastruktuurin, kaupunkien, liikenteen, rakennusten ja ympäristön suunnittelussa, rakentamisessa, rakennuttamisessa ja ylläpidossa. (Ramboll 2023.)

## 2 TUULIVOIMAHANKE YLEISESTI

Tuulivoimahankkeen vaiheet ovat moninaiset ja ne kestävät useita vuosia. Tuulipuiston kaavoitusta ja rakentamista ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki, jonka tavoitteena on ohjata alueiden rakentamista ja suunnittelua siten, että turvataan sekä ihmisille että eliöille hyvä elinympäristö, ja samalla edistetään kestävää kehitystä (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999, 1:1 §). Säännöt ja ohjeistukset varmistavat hankkeen onnistumisen kaikkia osapuolia tyydyttävällä tavalla. Alueen soveltuvuutta tuulivoimarakentamiselle tarkastellaan erilaisten arviointien avulla. (Ympäristöministeriö 2024.) Kuvassa 1 on esitelty tuulipuiston lupaprosessin vaiheet.



KUVA 1. Tuulipuiston lupaprosessi (Suomen Tuulivoimayhdistys 2019)

Tuulivoiman lupaviranomaisena toimiva Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus eli ELY-keskus valvoo, että ilmastonmuutosta torjuvat hankkeet eivät kiihdytä luonnon monimuotoisuuden kaventumista eli että vihreä siirtymä toteutetaan ekologisesti kestäväällä tavalla. Globaalin tilanteen vuoksi vihreä siirtymä on tärkeää, jotta päästäisiin energiaomavaraisuuteen ja fossiilisista polttoaineista eroon. Tuulivoima-alueiden kaavoituksessa ja suunnittelussa huomioidaan, että ilmastolle ja ympäristölle aiheutuisi mahdollisimman vähän haittaa. (Kangas 2023.)

## 2.1 Tuulivoimahankkeen vaiheet

Tuulivoimahanketta voi lähteä kehittämään esimerkiksi hanketoimija, energiayhtiö, kunta tai maanomistaja. Tuulivoimahanke koostuu viidestä vaiheesta, joita ovat esiselvitys-, yhteistyö sidosryhmien kanssa-, hankekehitys-, rakentaminen ja käyttöönotto- sekä purkamisen ja kierrätysvaihe. Esiselvitysvaiheen aikana selvitetään tuulipuistolle sopivaa sijaintia, josta selvitetään, vertaillaan ja analysoidaan erilaisten mittausten ja arviointien avulla soveltuvuutta tuulivoima-alueeksi. Tässä vaiheessa tehdään alustava arvio projektin teknistaloudellisista ja maankäytöllisistä edellytyksistä. Sopivan alueen valintaan vaikuttaa esimerkiksi alueen kaavoitusilanne, tuuliolosuhteet, etäisyys sähkö- ja tieverkosta sekä asutuksesta, luonto-olosuhteet, ilmailurajoitukset sekä maanomistussuhteet. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, 3.) Tuulivoimarakentamiselle ei sovellu alue, joka on valtakunnallisesti arvokas maisema-alue tai kulttuuriympäristö, luonnonsuojelu-, erämaa- tai kansainvälisesti merkittävä lintualue (Ympäristöministeriö 2016, 17).

Hankekehitysvaihe alkaa, kun sidosryhmien kanssa on päästy yhteisymmärrykseen alueesta ja muista tarpeellisista asioista. Siihen kuuluu tuulipuiston maa-alan hankinta, tuulimittaukset, melu- ja välkemallinnukset sekä kaavoitus. Hankekehitysvaiheen näkyvin osa on kaava- ja lupamenettely, jossa selvitetään maankäytölliset edellytykset tuulivoima-alueen sijoittamiselle ja rakentamiselle. Hankkeen kulkua ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, 3; Märijärvi 2023.)

Rakentamisen ja käyttöönoton vaiheessa tehdään investointipäätökset ja sopimukset toimituksista ja verkkoliittymistä. Tähän vaiheeseen kuuluu oleellisesti tuulipuiston maaperätutkimusten ja infran eli teiden, voimaloiden perustusten, nostokenttien, verkkoliittymän, kaapelointien, sähkölinjojen, muuntoasemien ja muuntajien suunnittelutyö (Lasanen 2014, 14). Maaperätutkimusten perusteella tehdään perustamistapalausunto, joka ohjaa tuulivoimaloiden perustamista ja rakentamista. Kun tuulipuiston infra on rakennettu, alkaa tuulivoimaloiden pystyttäminen. Tuulivoimalan komponentit tuodaan alueelle osissa ja pystytetään paikan päällä. Kun tuulivoimalat on saatu pystytettyä, alkaa voimaloiden tuotantovaihe. Siihen sisältyy valvonta, huolto ja ylläpito. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, 3–4.)

Tuulivoimaloiden purkamisesta ja osien mahdollisesta uusiokäytöstä on vielä varsin vähän kokemusta ja tutkittua tietoa. ELY-keskuksen Tuulivoiman yleisoppaan mukaan elinkaaren lopussa

oleva tuulivoimala puretaan. Tässä vaiheessa on huomioitava maankäyttö- ja rakennuslain mukaisesti purkamisluvan sekä rakennuspaikan ja sen ympäristön mahdollinen kunnostuksen tarve. Käyttöikänsä päähän tulleen voimalan tilalle voitaneen rakentaa kokonaan uusi tuulivoimala tai maisemoida alue uudelleen. Uuden tuulivoimalan rakentamisessa on huomioitava, että perustukset on rakennettava aina uudelleen, jotta ne pystyvät turvallisesti siirtämään uuden voimalan aiheuttamat kuormat maaperään. (Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, 4.)

## **2.2 Tuulipuiston kaavoitus ja ympäristövaikutusten arviointimenettely**

Tuulipuiston kaavoitus on prosessina samanlainen kuin minkä tahansa muunkin alueen kaavoitus. Sen tarkoitus on arvioida merkittävät vaikutukset ympäristölle (Märijärvi 2023). Prosessia ohjaavat muun muassa maankäyttö- ja rakennuslaki sekä laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä. Maankäyttö- ja rakennuslaissa on 77 §:ssä määritelty erikseen tuulivoimaa koskevista kaavoituksen sisältövaatimuksista. Siinä on määritetty, että yleiskaavaa voidaan käyttää tuulivoiman rakentamisluvan perusteena, mikäli siinä on erikseen määritelty, että näin voidaan tehdä. Lisäksi kyseisessä laissa säädetään, että yleiskaavan on ohjattava rakentamista ja alueiden käyttöä, tuulipuiston on sopeuduttava maisemaan ja ympäristöön sekä tuulivoimalan teknisen huollon ja sähkönsiirron on oltava järjestettävissä. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999 10:77 §.)

Kaavoitukseen kuuluvat aloitus-, valmistelu-/luonnos-, ehdotus- ja hyväksymisvaiheet. Kaavoituksen vaiheet on esitetty kuvassa 2. Tuulipuistoalueen kaavoittamisen aloittamiseksi hanketoimija ottaa yhteyttä kaupunkiin tai kuntaan, jonka hallituksen tai lautakunnan päätöksellä aloitetaan kaavoittamaan aluetta. (Märijärvi 2023.) Aloitusvaiheessa laaditaan kaavoituksen osallistumis- ja arviointisuunnitelma eli OAS, jossa määritellään yhteyshenkilöt ja vuorovaikutuksen järjestäminen (Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999 8:63 §), hanke ja sen arvioitu aikataulu, kaavoitettava alue sekä kuvaillaan lähiympäristö, jotta voidaan arvioida alueelle mahdollisesti tulevia vaikutuksia ja mitä selvityksiä täytyy kaavoitusta ajatellen tehdä. Luonnosvaiheessa esitellään muutama eri vaihtoehto tuulipuiston toteuttamiseksi ja tässä vaiheessa järjestetään yleisötilaisuus, jossa kuullaan mielipiteitä hankkeesta. Ehdotusvaiheessa kaava on julkisesti nähtävillä ja yhteysviranomaisen antaa siitä lausunnon ja mahdollisesti korjausehdotukset. Mahdolliset muutosehdotukset korjataan ja kaava hyväksytään ja julkaistaan hyväksymisvaiheessa (Märijärvi 2023).



KUVA 2. Kaavoituksen vaiheet (Tuusula 2024)

Tuulivoimahankkeen ollessa vähintään 10 voimalan tai 45 megawatin kokoinen, tarvitaan aina automaattisesti YVA-menettely, jota ohjaa laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä eli YVA-laki. Käytännössä YVA-ohjelmassa esitellään samat asiat kuin OAS:ssakin. (Märijärvi 2023.) YVA-menettelyn tarkoitus on tunnistaa, arvioida ja kuvata hankkeen todennäköisesti merkittäviä ympäristövaikutuksia ja kuulla viranomaisia ja niitä toimijoita, joihin hanke vaikuttaa. Hankevastaava laatii ympäristövaikutusten arviointiohjelman suunnitelman, jossa käyvät ilmi tarvittavat selvitykset ja se, miten arviointimenettely järjestetään. (Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 252/2017 1:2 §.) Lisäksi selvitetystä asioista laaditaan YVA-selostus, josta yhteysviranomainen antaa lausunnon. YVA-selostus liitetään tuulipuiston rakennuslupahakemukseen, jota haetaan kunnan tai kaupungin rakennusvalvontaviranomaiselta. (Märijärvi 2023.)

### 2.3 Tuulivoimarakentamisen ilmastovaikutukset

Vuonna 2025 voimaan tulevassa rakentamislaisissa (751/2023 4:38 §) on säädetty, että rakennuslupaan liitetään ilmastaselvitys, jossa on määritetty hankkeen koko elinkaaren hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki. Hiilijalanjäljen avulla kerrotaan rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyviä kasvihuonekaasuja, ja hiilikädenjäljellä tarkoitetaan, paljonko hankkeella hidastetaan ilmastomuutosta. Määrät ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttien painona. (Rakentamislaki

157/2023 1:2 §; Väylävirasto 2023, 8.) Vielä on epäselvää, koskeeko lakiuudistus myös tuulipuistojen rakennuslupia.

Tuulivoimala tuottaa energiaa käytännössä ilman hiilidioksidi- eli CO<sub>2</sub>-päästöjä, mutta sen rakentamiseen, asentamiseen, kuljetukseen ja purkamiseen liittyy ympäristövaikutuksia (Granlund 2022, 5; Haapala 2014). Tuulivoimahankkeen hiilijalanjälkeä tarkastellaan elinkaariarvioinnin avulla, mikä on esitetty kuvassa 3. Siinä kuvataan tässä tapauksessa hankkeen koko elinkaaren negatiiviset vaikutukset ympäristölle aina raaka-aineiden hankinnasta purkamiseen saakka. Käytännössä mitä pidempi on tuulivoimalan elinkaari, sen pienempi on hiilijalanjälkikin. (Granlund 2022, 5–6; Väylävirasto 2023, 8.)



KUVA 3. Elinkaariarviointi eli life cycle assesment, LCA (Suomen ympäristökeskus 2024)

Myös Savolainen on opinnäytetyössään tutkinut tuulipuiston hiilijalanjälkeä ja sitä tasaako tuulipuisto elinikänsä aikana rakentamisvaiheessa aiheutuneet päästöt. Hän tarkasteli työssään yhden tuulipuiston päästöjä. Opinnäytetyön perusteella paaluperustuksella on suurin ja kallioankkuroidulla perustuksella pienin hiilijalanjälki. Perustusten rakentamisen ja materiaalien lisäksi päästölaskennassa oli otettu huomioon myös tiestön ja kaapelointien infratyöt. (Savolainen 2023 2, 34.) On tutkittu, että tuulivoimala tuottaisi alle vuodessa energiamäärän, joka on kulunut sen rakentamiseen ja yli 60-kertaisen energiamäärän koko elinkaarensa aikana (Suomen Tuulivoimayhdistys 2024).

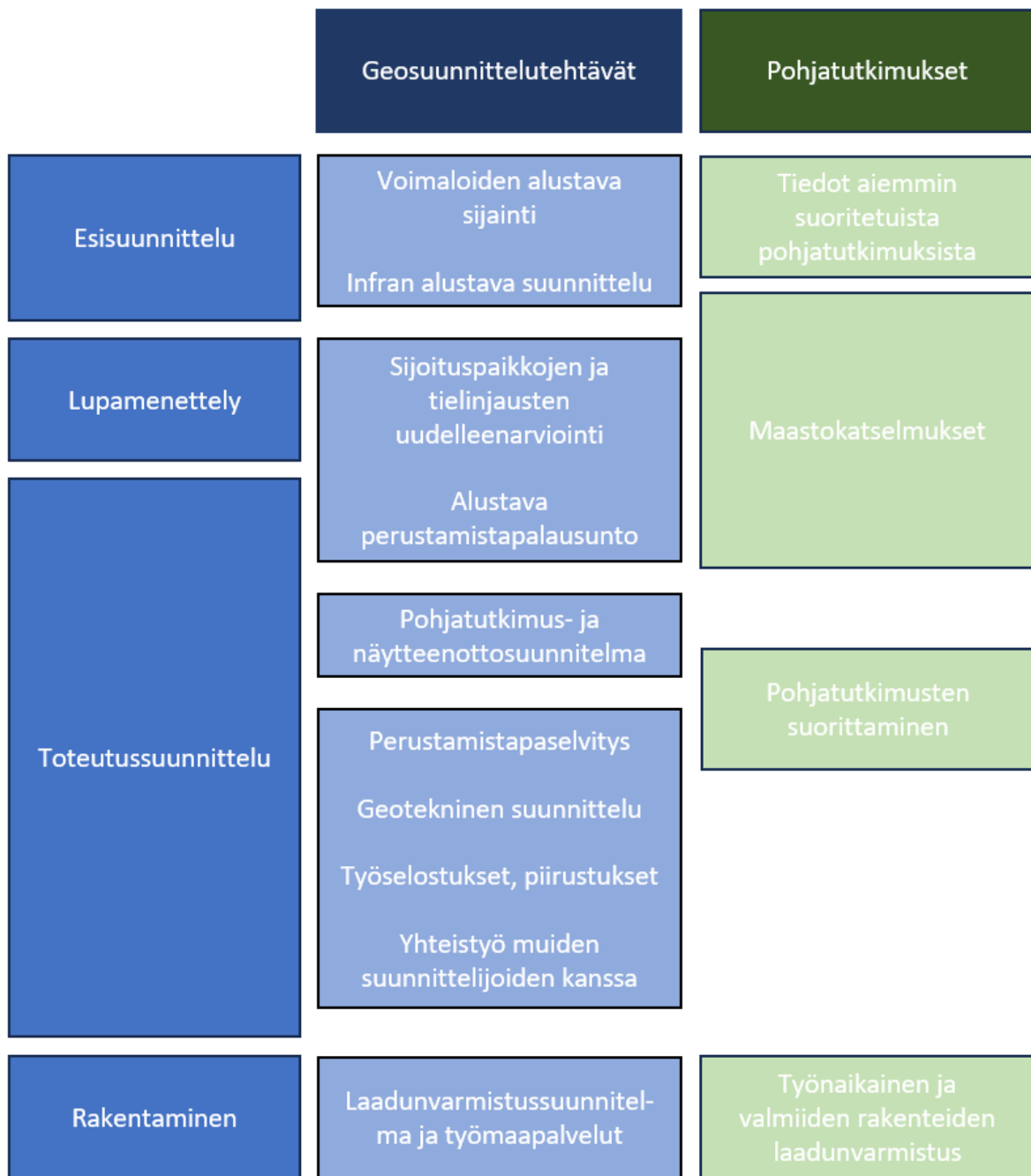
Tuulivoimalla tuotetun sähkön hiilijalanjälki on noin 7–9 CO<sub>2</sub> ekv /kWh (Suomen Tuulivoimayhdistys 2024). Etha Wind teki hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen laskelmia Takakangas-Pihlajaharjun tuulivoimahankkeelle. Näiden laskelmien perusteella huomattiin, että hankkeen positiiviset vaikutukset eli hiilikädenjälki oli jopa 50 kertaa suurempi kuin hiilijalanjälki, vaikka hankkeen rakentamisen vuoksi kaadettiin puita ja tuotannosta aiheutui päästöjä. (Granlund 2022, 13.) Laskelmissa päästiin samaan arvioon hiilijalanjäljestä kuten Suomen Tuulivoimayhdistyksen on todennut.

### 3 TUULIPUISTOJEN GEO- JA INFRASUUNNITTELU

Tuulivoimahankkeen toteutussuunnittelu alkaa käytännössä jo esiselvitysvaiheessa ja jatkuu tarjousvaiheessa, jota seuraa rakentamissuunnitteluvaiheen aikainen tarkempi suunnittelu. Tuulipuistojen toteutussuunnitteluun kuuluvat muun muassa maaperätutkimusten, tielinjausten, tasauksien ja rakenteiden, kääntöpaikkojen, voimaloiden nostoalueiden ja perustusten, kuivatuksen, kaapelireititysten ja varastointialueiden suunnittelu. Suunnitteluun osallistuvat muun muassa geo-, infra- ja perustussuunnittelijat. (Kotamäki 2023.)

#### 3.1 Tuulipuiston geosuunnittelu

Kuvassa 4 on esitetty tuulipuiston geosuunnittelun ja pohjatutkimusten eteneminen, joka ajoittuu luvussa 2.1. esitettyjen hankkeen vaiheiden mukaan. Geosuunnitteluun liittyvät hankevaiheet ovat esisuunnittelu-, lupamenettely-, toteutussuunnittelu- sekä rakentamisvaihe. Esisuunnitteluvaiheessa määritetään tuulivoimaloiden alustava sijainti ja aloitetaan infran alustava suunnittelu. (Kriikkula 2013, 46.) Esisuunnitteluvaiheessa voidaan tehdä jo suppeita maaperätutkimuksia tai maastokatselmuksia (Kotamäki 2023). Lupamenettelyvaiheessa arvioidaan uudelleen voimalapaikkojen ja tielinjausten sijainnit. Toteutussuunnitteluvaiheessa tehdään perustamistapalausunto osittain lupamenettelyvaiheen kanssa samanaikaisesti. Lisäksi toteutusvaiheessa määritellään tarkemmin pohjatutkimus- ja näytteenottosuunnitelma ja näiden perusteella tehdään perustamistapaselvitys ja aloitetaan tuulivoimalan perustusten geotekninen suunnittelu. Tässä vaiheessa tehdään myös työselostukset ja piirustukset. Rakentamisvaiheessa määritellään työmaan aikaiset palvelut. Yhteistyö eri suunnittelijoiden kanssa on suunnittelun kaikissa vaiheissa tärkeää. (Kriikkula 2013, 46.)



KUVA 4. Prosessikaavio tuulivoimalan geosuunnittelusta (Kriikkula 2013, 46), muokattu.

Tuulipuiston pohjatutkimusten esisuunnitteluvaiheessa hankitaan tiedot mahdollisista aikaisemmin tehdyistä maaperätutkimuksista. Lupamenettelyvaiheessa järjestetään maastokatselmuksia, joiden perusteella tarkastellaan mahdollisia voimaloiden perustamissijainteja. Toteutussuunnitteluvaiheessa suoritetaan maaperätutkimukset, joiden perusteella määritetään maaperäolosuhteet, jotka vaikuttavat tuulivoimalan perustamistapaan. Maaperää tutkitaan kairauksien ja maanäytteiden avulla. Rakennusvaiheessa varmistetaan sekä työn aikainen että valmiiden rakenteiden laatu. (Kriikkula 2013, 46, 48–49.)

### 3.1.1 Tuulipuiston maaperätutkimukset

Tuulipuiston maaperätutkimuksia ohjelmoitaessa ja tehdessä pyritään kaikki tarvittavat tutkimukset tekemään kerralla. Tarvittaviin tutkimuksiin kuuluvat esimerkiksi perustuspaikan ja nostoalueiden tutkiminen kairauksien ja maanäytteiden avulla. Voimalan perustusalueelta tutkitaan yleensä neljä pistettä: yksi voimalan keskipisteestä ja kolme kehältä. Tuulivoimalan perustuksen halkaisija on yleensä noin 20–30 metriä. (Kotamäki 2023.)

Tuulipuiston tiestön osalta tutkimusmenetelmät vaihtelevat tilaajan toiveiden mukaan. Olemassa olevaa tiestöä pyritään käyttämään mahdollisimman hyvin voimaloille johtavien teiden pohjana, mutta tiestöä suunnitellaan myös koskemattomaan maastoon. Olemassa olevat tiestöt voidaan tutkia esimerkiksi kairauksin ja levypainokokein. Lisäksi ne voidaan mitata myös geodeettisesti. (Kotamäki 2023.)

Tuulipuistojen maaperää tutkitaan kairausten ja maaperänäytteiden avulla. Yleisimpiä kairausmenetelmiä ovat puristinheijari- ja porakonekairaukset sekä joskus myös siipikairaus maaperän olosuhteiden mukaan. Maaperänäytteitä pyritään ottamaan metrin välein niin syvältä kuin kairauksella päästään. Myös happamia sulfaattimaita tutkitaan, varsinkin jos GTK:n eli Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartan perusteella on syytä epäillä, että niitä tuulipuistoalueella olisi. Happamat sulfaattimaat vaikuttavat esimerkiksi tuulivoimalan perustamistavan valintaan. (Kotamäki 2023.)

Edellä mainittujen tutkimusten lisäksi tuulipuistoalueella havainnoidaan myös pohjavedenpinnan korkeutta, jotta pystyttäisiin mahdollisimman tarkasti arvioimaan, täytyykö tuulivoimalan perustukset mitoittaa nosteelle. Tuulivoiman perustuksia mitoittaessa on syytä olettaa, että pohjavedenpinnan taso voi nousta maanpinnan tasolle tai jopa korkeammalle, jolloin kuivatuksen suunnittelu ja perustuksen mitoitus nosteelle ovat erittäin oleellisia huomioitavia asioita. (Kotamäki 2023.)

Maaperätutkimuksista laaditaan pohjatutkimusraportti, jossa kerrotaan tutkimusten avulla tehdyt havainnot maaperästä ja pohjaolosuhteista. Raportissa esitetään maalajirajat ja arvioidaan maaperän tiiveyttä näytteiden ja kairausvastusten avulla sekä kerrotaan pohjaolosuhteista kullakin voimala-alueella. Raportissa esitetään myös mitoitusparametrit, joiden avulla perustussuunnittelija määrittää suositellun perustamistavan. (Kotamäki 2023.)

### 3.1.2 Tuulivoimalan perustuksen geosuunnittelu

Pohjatutkimusten valmistuttua aloitetaan varsinainen geo- ja pohjarakennesuunnittelu. Siihen vaikuttaa myös voimalatoimittajan antamat tiedot voimalan aiheuttamista kuormista voimalan perustusalueelle ja nostokentälle. Geosuunnittelija laskee maan kantokestävyyden pohjatutkimusten perusteella ja näiden perusteella perustussuunnittelija valitsee sopivan perustamistavan. (Kotamäki 2023.)

Eurokoodit ohjaavat rakennusten perustusten suunnittelua, mutta tuulivoimalan perustuksia suunniteltaessa ne eivät pelkästään riitä, sillä mitoitustekijät vaihtelevat ja huomioitavia asioita on runsaasti. Perustusten suunnittelun lähtökohtana käytetään voimalatoimittajan tekemiä tuulianalysejä sekä maaperätutkimusten avulla saatuja maaparametrejä ja pohjaveden pinnan tasoa. Tuulivoimalan perustuksia suunniteltaessa tehdään väsymismitoitus, sillä tuulivoimalan kuormat rikkovat perustusta aina jonkin verran. Näin saadaan laskettua kestävyysparametrit mahdollisimman totuudenmukaisesti. Myös tuulivoimalaan kohdistuvat kaatavat voimat huomioidaan voimalan perustuksia suunniteltaessa. Perustussuunnittelija määrittää muutaman perustustyyppin, jossa edellä mainitut asiat on huomioitu. (Kontinen 2023.)

Yleensä maalle rakennettavalle tuulivoimalalle käytetään maanvaraista laatta- eli gravitaatioperustusta (kuva 5), joka pehmeiköllä paalutetaan ja kalliolle rakennettaessa ankkuroidaan (kuva 6). Käytännössä tuulivoimalan perustuksia paalutetaan (kuva 7) hyvin harvoin, sillä esimerkiksi kustannussyistä johtuen on kannattavampaa tehdä suuriakin massanvaihtoja. Vaihtoehtoisesti voimalan sijaintia voidaan myös kaavan asettamissa rajoissa siirtää ominaisuuksiltaan lujemmalle pohjamaalle. (Kotamäki 2023.) Tuulipuistojen perustustavat on esitetty kuvassa 8.



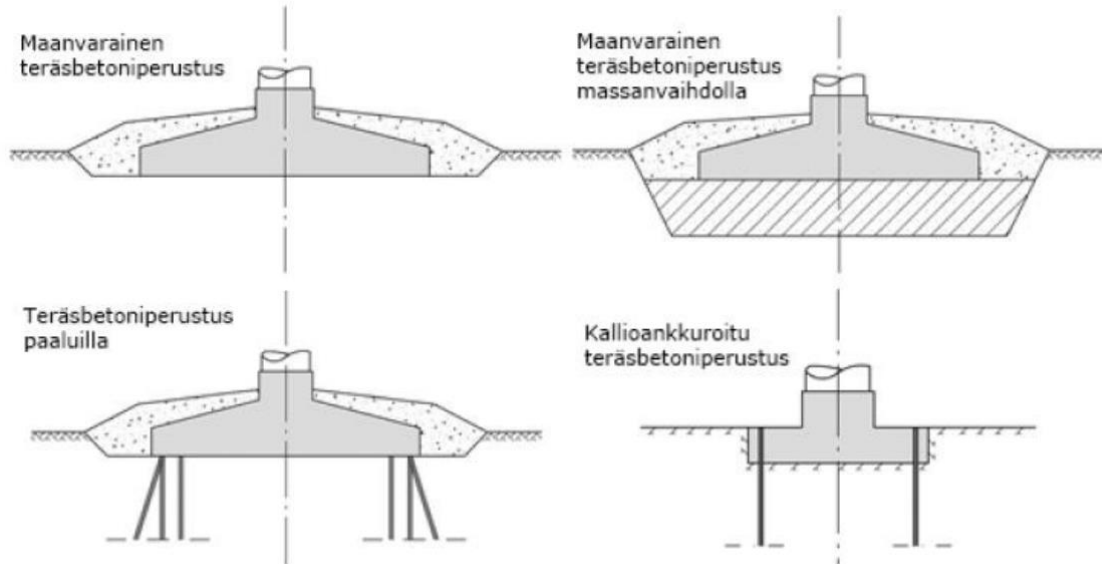
KUVA 5. Tuulivoimalan maanvarainen laattaperustus (Kuva: Lehtinen, Mika Ramboll CM).



KUVA 6. Tuulivoimalan kallioankkuroitu perustus. (Kuva: Lehtinen, Mika Ramboll CM)



KUVA 7. Tuulivoimalan perustuksen paalutus. (Kuva: Lehtinen, Mika Ramboll CM)



KUVA 8. Tuulivoimalan perustustavat (Tuohimaa, Neumann, Heikkinen, Yli-Teevahainen 2020, 6).

Tuulivoimalan perustustason suunnittelussa otetaan myös huomioon, millä korkeudella perustus pystytään kuivattamaan mahdollisimman tehokkaasti. Kuivatustason mukaan määritetään, mitoitetaanko perustukset nosteelle vai pystytäänkö perustus saamaan kokonaan kuivaksi. Perustusten kuivatuksesta tehdään omat piirustukset, joissa esitetään perustusten kuivatusten

reitti, suunta, korot ja miten se liittyy nykyisiin tai suunniteltuihin ojiin. Perustusten kuivatus yhdistetään infrasuunnittelun kuivatuksen kanssa yhteneväiseksi kokonaisuudeksi. Tuulivoimalan perustus mitoitetaan nosteelle, mikäli pohjaveden pinnan taso on perustustason yläpuolella. (Kotamäki 2023.)

### **3.1.3 Tuulipuiston nostokenttien ja teiden geosuunnittelu**

Geosuunnittelija määrittää nostokenttien ja tiestön rakenteet. Käytännössä erilaisille pohjaolosuhteille on määritetty oma rakennetyyppinsä, jonka mukaan tiet ja nostoalueet rakennetaan. Arvioidut rakennekerrokset esitetään pituusleikkauksissa, mutta käytännössä urakoitsijan vastuulla on arvioida rakenteen riittävyyttä, sillä kaivuuvaiheessa pohjaolosuhteista tehtyjen havaintojen perusteella voi ilmetä tarvetta esimerkiksi massanvaihdolle. Lisäksi nostokenttäalueelle voidaan tehdä stabiliteettitarkasteluja, joiden avulla voidaan arvioida, onko rakenteissa ja pohjamaalla riittävän suuri stabiliteetti, jotta nosturi pysyy pystyssä. Myös routamitoituksia saatetaan tehdä joillekin alueille. (Kotamäki 2023.)

Niin tuulipuistojen suunnittelussa kuin missä tahansa infrasuunnittelussa pyritään massatasapainoon. Massatasapaino tarkoittaa, että leikkaus- ja täyttömassat ovat tasapainossa. Massatasapainolla voidaan vaikuttaa merkittävästikin hankkeen kustannuksiin. Geosuunnittelija tekee tiivistä yhteistyötä infrasuunnittelijan kanssa, jotta päästään mahdollisimman hyvin massatasapainoon. (Kotamäki 2023.)

## **3.2 Tuulipuiston infrasuunnittelu**

Tuulipuiston infrasuunnitteluun kuuluvat raivausalueiden, tiestön, nostokenttien, kaapeleiden, sähköasemien, muuntajien ja muunninasemien suunnittelu. Jokaisella voimalatoimittajalla on omat määritelmät ja mitat nostokentän koosta, muodosta ja alueista sekä tielinjausten vaatimuksista. (Ojanperä 2023.) Kuvassa 9 on esitetty yhden voimalatoimittajan malli tuulipuiston nostokentästä.



*KUVA 9. Tuulipuiston nostokenttäalue. (Kuva: Lehtinen, Mika Ramboll CM)*

Tuulipuistojen tiestö pyritään suunnittelemaan mahdollisimman hyvin maastonmuotoja mukaillen, mutta voimalatoimittajan asettamat vaatimukset ohjaavat suunnittelua. Voimalan osat ovat kookkaita ja ne tuodaan tuulipuistoon osissa, ja tästä syystä on hyvinkin tarkat vaatimukset sille, millaisia kaarresäteitä, pyöristyskaaria ja etäisyyksiä väylien suunnittelussa käytetään. Väyliä suunniteltaessa tehdään tiestölle Autoturn-tarkasteluja. Tarkastelussa ajetaan suunnitteluohjelman avulla tiet ja risteykset oikeankokoisella ajoneuvokalustolla, ja näin selviää riittääkö tiestön leveydet, suuntaukset ja erityisesti risteykset isojen voimalakomponenttien kuljetukseen. (Ojanperä 2023.)

Suunnittelua aloitettaessa haetaan Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto kyseiseltä alueelta ja sen pohjalta tehdään maastomalli, joka on suunnittelun lähtökohtana. Myös peruskartta ja kiinteistöraja-aineisto haetaan Maanmittauslaitokselta. Suunnitelmakarttaan koostetaan peruskartan pohjalta, muinaismuisto-, luonnonsuojelu- ja muut erityisalueet, vuokratut kiinteistöt ja kiinteistöt, joille ei ole vuokrasopimusta, tielinjaukset, raivausalueet, voimaloiden sijainnit nostokenttineen, varastointialueet, kääntöpaikat, tuulipuiston "sisäänkäynti" sekä muu oleellinen tieto. (Ojanperä 2023.)

Kun voimaloiden tarkat sijainnit tiedetään, suunnitellaan tuulipuiston väylät maanpintaa mukaillen voimalatoimittajien ohjeistuksia noudattaen. Myös kuljetussuunta huomioidaan väylien suunnittelussa. Voimalan nostokentät suunnitellaan pääosin vaakatasoon, mutta kuivatuksen

helpottamiseksi tietyille alueille sallitaan myös pieni kaltevuus voimalatoimittajan ohjeistuksien mukaisesti. Väylien tasaukset esitetään pituusleikkauksissa ja rakenne poikkileikkauksissa. (Ojanperä 2023.)

### **3.3 Tuulipuiston rakentamisen as built -vaihe**

Kun tuulipuiston infran rakennustyöt on saatu päätökseen, urakoitsija luovuttaa hankkeen rakennuttajalle. Rakennuttaja saattaa vaatia toteutuneesta rakentamisesta tarkepiirustukset, jotka osoittavat, että tuulipuisto on rakennettu suunnitelmien ja hyvän rakentamistavan mukaisesti. Tätä vaihetta kutsutaan as built -vaiheeksi. (Kotamäki 2023.)

As built -vaiheessa tuotetaan tarkemittausten pohjalta piirustukset esimerkiksi kaapeloinneista, kaivannoista, kaivutasoista, kuivatuksesta, rakennekerroksista, rakennetuista ojista, rummuista, nostokenttien ja teiden ylimmästä yhdistelmäpinnasta sekä täytöistä. Näiden pohjalta tehdään toteuma-, pituus- ja geoleikkauspiirustukset, jotka urakoitsija tarkistaa ja luovuttaa rakennuttajalle. Tämä vaihe voi olla työläs ja tarkkuutta vaativa vaihe, jolla monesti voi olla tiukka aikataulu. (Kotamäki 2023.)

## 4 SUUNNITTELUAUTOMAATIO

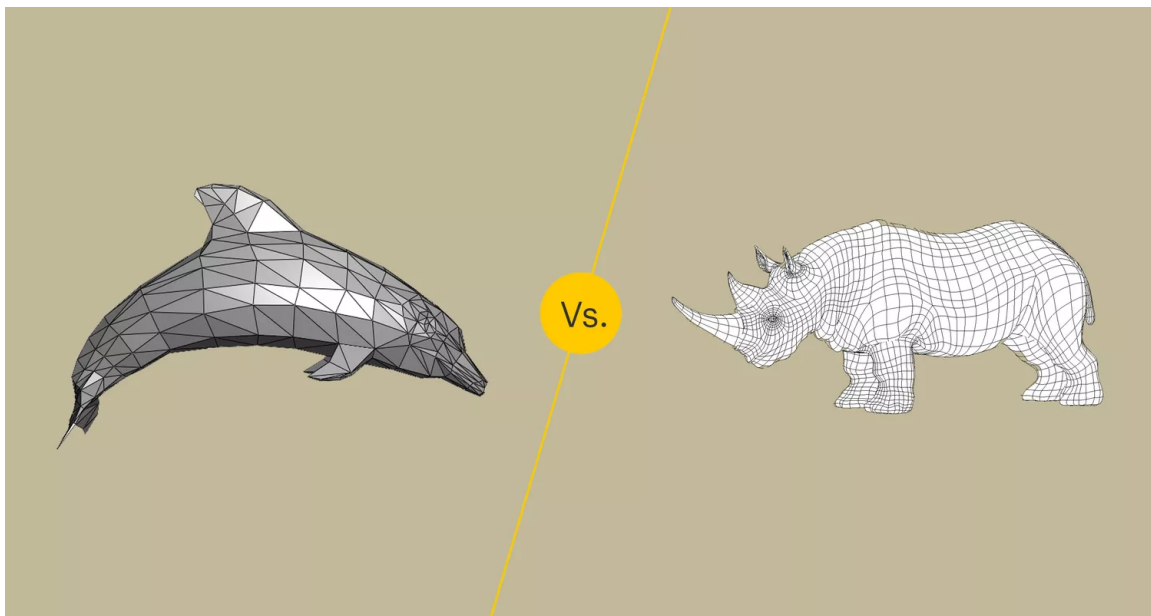
Digitaalinen kehitys yhteiskunnassa on nopeaa ja digitalisaation myötä monet työvaiheet tehostuvat eri aloilla. Suunnittelussa on siirrytty tietomallipohjaiseen suunnitteluun ja sen tueksi on kehitetty suunnitteluautomaatiota, jota voidaan hyödyntää suunnittelun eri vaiheissa (Silventoinen 2022, 7). Vuonna 2007 aloitettiin hyödyntämään visuaalisia ohjelmointialustoja, jolloin ensimmäinen versio Grasshopperista julkaistiin. Grasshopper on algoritmiin perustuva alusta, jota hyödynnetään automaation ohjelmoinnissa. Automaatioprosessissa oleellisinta on saada tieto siirtymään suunnitteluohjelman ja algoritmin välillä. Suunnitteluautomaatiota kehitettäessä on huomioitava, että työkaluja ei kehitetä vain tietyille projekteille, vaan niiden käytettävyys olisi jatkuvaa ja sopisi mahdollisimman monenlaisille projekteille. Suunnitteluautomaation hyödyntäminen voi vähentää suunnitteluun käytettävää aikaa useilla kymmenillä tunneilla. (Pirhonen, Vähänen & Forsman 2023, 32–34, 37.)

Suunnitteluautomaatio sopii parhaiten projekteihin, joissa mallinnettava rakenne on esimerkiksi geometrisesti monimutkainen, koostuu useasta erilaisesta osasta ja jonka mallintamisessa korostuu toistuvuus. Suunnitteluautomaation hyötyjä ovat esimerkiksi ajansäästö toistuvia työvaiheita automatisoimalla, laadunvarmistus ja useiden erilaisten rakennemallien vertailu kustannustehokkaasti. Lisäksi suunnitteluautomaatiota hyödyntämällä mahdolliset suunnittelun muutostarpeet ovat korjattavissa nopeasti. (Pirhonen, Vähänen & Forsman 2023, 34.)

### 4.1 Algoritminen suunnittelu

Algoritmisessa eli parametrisessa suunnittelussa suunnitteluohjelma mallintaa algoritmien ja määriteltyjen rajaehtojen eli parametrien mukaisen mallin, jota voidaan käyttää suunnittelussa. Algoritmien hyödyntämiseksi tarvitaan osaamista matematiikasta ja geometriasta. Algoritmi on ikään kuin resepti, jossa on määritelty vaiheet ja toimenpiteet, joita tarvitaan tehtävän laskemiseen, suorittamiseen ja valmistumiseen. (Juvonen 2019, 12.) Algoritmisesta suunnittelusta voidaan käyttää myös nimityksiä Computational design, tietokoneavusteinen tai automaatioon perustuva suunnittelu (Silventoinen 2022, 22).

Algoritmisessa suunnittelussa hyödynnetään **Rhinoceros 3D**:tä eli Rhinoa ja Grasshopper 3D:tä mallintamisessa. Rhino on pintamallinnusohjelma, jolla voidaan mallintaa kolmiulotteisia muotoja (Nordic Bim Group 2024). Siinä objektit mallinnetaan NURBS eli Non-Uniform Rational Basis Splines -tekniikalla hyödyntämällä eli selkeämmin se kuvaa matemaattisesti 3D-geometriaa. NURBS-meshverkko on tarkempi ja monimutkaisempi kuin perinteinen kolmioverkko, sillä se kuvaa 3D-geometriaa käyrinä suorien viivojen sijaan. (Sculpteo 2024; Silventoinen 2022, 27). Kuvassa 10 on esitetty perinteisen kolmioverkon ja NURBS-verkon ero. Grasshopper on Rhinon ohjelmointikielenä toimiva laajennus, jonka käyttö ei edellytä koodaamis- tai ohjelmointiosaamista (Sawant 2021; Juvonen 2019, 16), lisäksi sen avulla saadaan luotua rajaton määrä suunnitteluvaihtoehtoja parametrejä muuttamalla (Silventoinen 2022, 29).



*KUVA 10. Delfiini on mallinnettu perinteisellä kolmioverkolla ja sarvikuono NURBS-meshverkolla (McCue 2020).*

Algoritmisessa suunnittelussa hyödynnetään Rhinon lisäksi myös **FME**-nimistä ohjelmointialustaa sekä Autodesk Civil 3D:n omaa **Dynamo**a. FME on samankaltainen alusta kuin Rhinokin, mutta se on alun perin luotu paikkatietoaineistojen nopeaan käsittelyyn ja laskemiseen (Esri Finland 2024). Dynamo on alun perin luotu Autodesk Revit -ohjelman visualisoinnin työkaluksi, mutta on sittemmin liitetty myös Civil 3D:hen (Dynamo 2024).

## **4.2 Suunnittelussa hyödynnettävät automaatiotyökalut**

LUKU SISÄLTÄÄ EI-JULKAISTAVAA AINEISTOA

Ramboll Finland Oy:ssa on kehitetty kymmeniä automaatiotyökaluja, joita voidaan hyödyntää erilaisissa suunnittelutyön projekteissa ja vaiheissa. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan automaatiotyökaluja, jotka ajatellaan olevan hyödynnettävissä erityisesti tuulipuistojen geo- ja infrasuunnittelussa. Automaatiotyökaluja hyödynnetään Autodesk Civil 3D ja Quadri Novapoint -suunnitteluohjelmien rinnalla.

## 5 SUUNNITTELUAUTOMAATION HYÖDYNNETTÄVYYS TUULIPUISTOJEN SUUNNITTELUSSA

Opinnäytetyössä selvitettiin, mitkä Ramboll Finland Oy:ssa kehitetyt automaatiotyökalut olivat suoraan hyödynnettävissä tuulipuistojen geo- ja infrasuunnittelussa sekä mitkä työvaiheet hyötyisivät automaatiotyökalun kehittämisestä. Opinnäytetyössä oli tarkoitus testauksen lisäksi haastatella suunnitteluautomaatiota työssään hyödyntäneitä suunnittelijoita ja asiantuntijoita, mutta koettiin, että haastateltavien olisi pitänyt olla käyttänyt automaatiotyökaluja nimenomaan suurissa tuulipuistojen kokoluokassa olevissa hankkeissa ja tällaisia suunnittelijoita ei löytynyt. Opinnäytetyön tulokset saatiin automaatiotyökaluja testaamalla erilaisten testiprojektien avulla. Testiprojektit koottiin aikaisemmin suunnitelluista hankkeista.

Suunnitteluautomaation hyödyntämiseksi suunnittelussa tuli automaatiotyökalut asentaa tietokoneelle toimeksiantajan sovellusten latausalustalta. Ohjelmien käyttöönottoon perehdytti suunnitteluautomaatiota suunnitelleet ja kehittäneet asiantuntijat. Automaatiotyökalujen testauksen aikana tehtiin tiivistä yhteistyötä ja keskusteltiin kokeneiden suunnittelijoiden kanssa ongelmatilanteista ja uusien sekä jo olemassa olevien työkalujen kehittämistarpeista.

### 5.1 Testiprojektien esittely

Testiprojekteja suunniteltiin alun perin olevan kolme erikokoista ja -tyyppistä hanketta, mutta uudistuneen Trimble Novapoint 2023 (ac21) -version myötä testiprojekti 1 jouduttiin jättämään pois testauksesta. Lisäksi koettiin tärkeäksi, että testaus tehdään nimenomaan nykyään käytössä olevalla Novapoint-versiolla, jotta tulokset ovat luotettavasti verrannollisia keskenään. Testiprojektien valintaan vaikuttivat myös koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät, sillä uusi Novapoint-versio ei tukenut testaushetkellä esimerkiksi N60-korkeusjärjestelmää, joka oli testiprojekti 1:ssä käytössä. Testaukseen saatiin luotettavasti toimimaan kaksi erikokoista hanketta: testiprojektit 2 ja 3, jotka todettiin riittäviksi tuloksen kannalta.

Testauksessa käytetyt tuulivoimahankkeet oli suunniteltu jo aikaisemmin. Testiprojekti 2 koostui 72 voimalan ja 105 neliökilometrin kokoisesta ja testiprojekti 3 taas 24 voimalan ja 19 neliökilometrin tuulipuistosta. Testiprojekti 2 oli jaettu kolmeen pienempään osa-alueeseen, mikä helpotti

aineistojen käsittelyä. Molemmat testiprojektit olivat olleet ”suunnittele ja toteuta” -tyyppisiä hankkeita. Edellä mainittujen testiprojektien lisäksi yhtä työkalua testattiin erillisellä projektilla sillä testiprojekteissa 2 ja 3 ei ollut vaadittuja lähtötietoja.

Testattavaksi valituista projekteista luotiin kopio Novapointin paikallisprojektiin. Myös dwg-muodossa ollut aineisto kopioitiin tarpeiden mukaan uuteen sijaintiin, jottei pystytty vahingossakaan muuttamaan tai tuhoamaan alkuperäisiä suunnitelmia. Automaatiotyökalujen testauksen avulla luotuja piirustuksia vertailtiin ilman automaatiota luotuihin.

## **5.2 Testatut automaatiotyökalut**

### LUKU SISÄLTÄÄ EI-JULKAISTAVAA AINEISTOA

Testaukseen valittiin 12 erilaista automaatiotyökalua. Testattavien automaatiotyökalujen rajaaminen oli haastavaa, sillä potentiaalisia työkaluja olisi ollut useita. Testattaviin työkaluihin päädyttiin sen perusteella, miten ne alkuarvioinnissa vaikuttivat olevan todennäköisimmin käytettävissä tuulipuistojen suunnittelussa mahdollisimman erilaisissa työvaiheissa.

## 6 YHTEENVETO

### LUKU SISÄLTÄÄ EI-JULKAISTAVAA AINEISTOA

Opinnäytetyön tavoitteena oli kerätä tietoa tuulipuistojen geo- ja infrasuunnittelussa hyödynnettävistä automaatiotyökaluista ja löytää mahdollisia kehitystarpeita jo kehitetyistä työkaluista. Lisäksi tavoitteena oli löytää muun muassa keskustelun ja haastattelun avulla suunnittelun työvaiheita, joihin voisi kehittää suunnittelua helpottavia automaatiotyökaluja. Opinnäytetyössä haastateltiin tuulipuistoja suunnitelleita asiantuntijoita, jotta saatiin lisää tietoa tuulipuistojen suunnittelun eri vaiheista. Testaukseen sopivat automaatiotyökalut valittiin ennakkoletusten perusteella. Lisäksi automaatiotyökalujen hyödynnettävyyttä tutkittiin kokeilemalla niitä erilaisten testiprojektien avulla. Samalla havainnoitiin sekä jo olemassa olevien että uusien kehitettävien automaatiotyökalujen kehitystarpeita.

Testiprojektien kokoaminen oli yllättävän aikaa vievä vaihe. Aikaisempia projekteja olisi ollut useita, mutta koska ne oli tehty vanhalla Novapoint-versiolla, niitä ei saanut uudella auki eivätkä ne tästä syystä olleet hyödynnettävissä testauksessa. Alkuperäisestä suunnitteluajankohdasta riippuen testaaja piti liittää Novapoint -projekteille sekä niistä piti luoda työkopiot ja vasta tämän jälkeen näki, oliko testiprojekti käyttökelpoinen testaukseen. Esimerkiksi Testiprojekti 1 karsiutui testaamisen ulkopuolelle, sillä sille ei saanut luotua työkopiota N60-korkeusjärjestelmän vuoksi.

Opinnäytetyön aihe oli laaja ja todella haastava. Opinnäytetyön tekijällä oli ennestään vain niukasti kokemusta tuulipuistojen suunnittelusta ja algoritmien suunnittelu oli täysin vieras aihe ennen työtä. Lisäksi joistain suunnitteluohjelmista oli niukempi käyttökokemus ja tämä voi myös osaltaan vaikuttaa työn tulokseen. Opinnäytetyön testaukseen käytettiin jo ennestään tuotettuja malleja ja lähtöaineistoja, joten opinnäytetyön tulokseen vaikuttanee myös lähtöaineistojen laatu.

Testaajan vähäisen kokemuksen vuoksi oli ajoittain haastava tietää, tekeekö ja kiinnittääkö huomioita oikeisiin asioihin. Lisäksi usean automaatiotyökalun käyttöohjeissa oli epätarkkuutta esimerkiksi lähtötietojen muodosta ja siksi oli haastavaa päästä alkuun testaamisessa. Tilanteissa, joissa automaatiotyökalun käyttöohjeissa oli puutteita, saatiin apua suunnitteluautomaatiota kehittäneiltä asiantuntijoilta. Kaiken kaikkiaan työ oli haastava ja automaatiotyökaluja testatessa

olisi voinut olla hyödyllistä saada tukea ja apua jo työssään työkaluja käyttäneiltä suunnittelijoilta. Lisäksi mietitytti, mihin vaiheeseen ja missä muodossa saatu tulos konkreettisesti auttaa.

Opinnäytetyö kehitti ammatillisia valmiuksia erityisesti itsenäisen tiedonhankintamenetelmien osalta sekä lisäämällä suunnitteluohjelmien käyttökokemusta. Lisäksi opinnäytetyöprosessi kehitti kriittistä ajattelua. Testaamiseen käytettävää aikaa oli vaikea arvioida ja ajankäyttöä haastoi myös pikkulapsiperheen arjen ja muun yksityiselämän, työn sekä opinnäytetyön yhteensovittaminen.

Testauksen avulla todettiin, että tuulipuiston maanpintamalli on sen verran iso, että jatkossa voisi olla hyvä tutkia tarvitseeko lähtöaineiston todella olla pistepilvimuodossa vai olisiko vaihtoehtoiset muodot riittäviä ja kevyempiä. Lisäksi on hyvä kiinnittää huomiota myös lähtöaineistojen laatuun ja tarkkuustasoon sekä tutkia onko kaikki suunnitteluvaiheet oleellisia lopputuloksen kannalta.

Loppuyhteenvedon voidaan todeta, että algoritmisen suunnittelun käyttöön ottamisen on oltava mahdollisimman helppoa ja sujuvaa, jotta työkalujen käyttöaste lisääntyy. Työkaluja on kehitettävä jatkuvasti, jotta ne vastaavat kunkin hetken ja vaiheen tarpeeseen. Lisäksi on erityisen tärkeää suunnitteluautomaatiota kehitettäessä huomioida tuulipuistojen mittava kokoluokka muihin hankkeisiin verrattuna. On myös huomioitava, että automaatiotyökalujen käyttöohjeet ovat selkeät ja ajantasaiset. Niistä on löydettävä selkeät ja tarkat tiedot lähtöaineiston muodosta ja sisällöstä sekä siitä, miten käyttöönotto tapahtuu.

## LÄHTEET

Dynamo 2024. Dynamo for Civil 3D. Hakupäivä 31.3.2024. <https://primer2.dynamobim.org/dynamo-for-civil-3d>.

Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Tuulivoiman yleisopas. Hakupäivä 24.11.2023. [https://www.motiva.fi/files/19414/Tuulivoiman\\_yleisopas.pdf](https://www.motiva.fi/files/19414/Tuulivoiman_yleisopas.pdf).

Esri Finland 2024. FME – Muunna, muokkaa, yhdistä ja jaa paikkatietoa. Hakupäivä 31.3.2024. <https://www.esri.fi/fi-fi/tuotteet/fme/intro>.

Granlund, Christian 2022. Hiilikädenjälkilaskenta Takakangas-Pihlajajarjun hankkeelle. Etha Wind. Hakupäivä 12.2.2024. [https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Liite\\_16\\_Hiilikadenjalkilaskenta\\_2022.pdf](https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Liite_16_Hiilikadenjalkilaskenta_2022.pdf).

Haapala, Karl 2014. Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. International Journal of Sustainable Manufacturing. Tiivistelmä. Hakupäivä 12.2.2024. <https://www.inderscience.com/offers.php?id=62496>.

Ilmastolaki 423/2022. Hakupäivä 7.1.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2022/2022042>.

Juvonen, Mirja 2019. Algoritmisen suunnittelun mahdollisuudet geosuunnittelussa. Oulun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikka. Opinnäytetyö. Hakupäivä 7.1.2024. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168411/Juvonen\\_Mirja.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168411/Juvonen_Mirja.pdf?sequence=2&isAllowed=y).

Kangas, Niina 2023. Vihreä siirtymä näkyy Pirkanmaalla erityisesti tuulivoimahankkeiden kasvussa. Pirkanmaan ELY-keskus. Hakupäivä 28.1.2024. [https://www.ely-keskus.fi/uutiset-2023/-/asset\\_publisher/wunrvszgFqL0/content/vihre%25C3%25A4-siirtym%25C3%25A4-n%25C3%25A4kyy-pirkanmaalla-erityisesti-tuulivoimahankkeiden-kasvussa-pirkanmaa-](https://www.ely-keskus.fi/uutiset-2023/-/asset_publisher/wunrvszgFqL0/content/vihre%25C3%25A4-siirtym%25C3%25A4-n%25C3%25A4kyy-pirkanmaalla-erityisesti-tuulivoimahankkeiden-kasvussa-pirkanmaa-)

Kontiainen, Kimmo 2023. Tuulivoimaloiden koko ja teho kasvavat – Miten perustukset suunnitellaan kestäväksi valtavat kuormat? Sweco Finland Oy. Hakupäivä 28.1.2024.  
<https://www.sweco.fi/blog/tuulivoimaloiden-koko-ja-tehot-kasvavat/>.

Kotamäki, Iivo 2023. Project Manager. Ramboll Finland Oy. Haastattelu 28.11.2023.

Kriikkula, Iivo 2013. Tuulivoimaloiden geotekninen suunnittelu. Oulun ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.11.2023.  
<https://www02.core.ac.uk/download/pdf/38085928.pdf>.

Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä 252/2017. Hakupäivä 7.1.2024.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2017/20170252>.

Lasanen, Matti 2014. Tuulipuistoprojektin käsikirja. Oulun ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.11.2023.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/85795/Lasanen\\_Matti.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/85795/Lasanen_Matti.pdf?sequence=1).

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Hakupäivä 7.1.2024.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1999/19990132>.

McCue TJ 2020. Mesh vs. NURBS: Which 3D Model Is Best for 3D Printing? Lifewire. Hakupäivä 9.2.2024. <https://www.lifewire.com/mesh-vs-nurbs-for-3d-printing-2238>.

Märijärvi, Juha-Matti 2023. Department Manager. Ramboll Finland Oy. Haastattelu. 5.12.2023.

Nordic Bim Group 2024. Rhinoceros. 3D-mallinnuksen kuningas. Hakupäivä 28.1.2024.  
<https://www.nordicbim.com/fi/tuotteet/rhinoceros>.

Ojanperä, Timo 2023. Design Manager. Ramboll Finland Oy. Haastattelu 29.11.2023.

Pajula, Jussi 2023. Head of Department. Ramboll Finland Oy. Haastattelu 16.8.2023.

Pirhonen, Ilari, Vähänen, Paavo & Forsman, Joonas 2023. Suunnitteluprosessin tehostaminen parametrisella suunnittelulla. Rakennustekniikka 79 (3), 32–37. <https://view.taiga.com/ri/rakennustekniikka-3-2023#/page=1>.

Rakentamislaki 751/2023. Hakupäivä 28.1.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230751#Lidm46651395329392>.

Ramboll 2023. Tutustu historiaamme. Hakupäivä 9.11.2023. <https://www.ramboll.com/fi/fi/rambollin-historia>.

Ramboll 2024. Automaatiotyökalujen käyttöohjeet. (Yrityksen sisäisessä käytössä)

Savolainen, Sofia 2023. Tuulivoimapuiston infratöiden hiilijalanjälki. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikka. Opinnäytetyö. Hakupäivä 28.1.2024. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/793356/Savolainen\\_Sofia.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/793356/Savolainen_Sofia.pdf?sequence=5&isAllowed=y).

Sawant, Sairi 2021. Grasshopper 3D: A Modeling Software Redefining The Design Process. Hakupäivä 28.1.2021. <https://parametric-architecture.com/grasshopper-3d-a-modeling-software-redefining-the-design-process/>.

Sculpteo 2024. Rhino 3D software: 3D Modeling Software for Architecture and Industrial Design. Hakupäivä 28.1.2024. <https://www.sculpteo.com/en/glossary/rhinoceros-definition/>.

Silventoinen, Johanna 2022. Suunnittelun automaatiotyökalujen käyttöönotto ja hyödyt infrasuunnittelussa. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Opinnäytetyö.

Suomen Tuulivoimayhdistys 2019. Tuulivoimahankkeen luvitus Suomessa. Hakupäivä 3.2.2024. [https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/1397-sty\\_tuulivoiman\\_luvittaminen\\_5\\_2019.pdf](https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/1397-sty_tuulivoiman_luvittaminen_5_2019.pdf).

Suomen Tuulivoimayhdistys 2023. Tuulivoima Suomessa 2023. Hakupäivä 21.1.2024. [https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima\\_vuositilastot-2023-2.pdf](https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-2.pdf).

Suomen Tuulivoimayhdistys 2024. Tuulivoiman ilmastovaikutukset. Hakupäivä 12.2.2024.  
<https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoiman-ilmastovaikutukset>.

Suomen ympäristökeskus 2024. Elinkaariarviointi tukee kestävyysmurrosta. Hakupäivä 12.2.2024.  
<https://www.syke.fi/elinkaariarviointi>.

Tuohimaa, Heikki, Neumann, Antje, Heikkinen, Marja & Yli-Teevahainen, Ville 2020. Iin Yli-Olhavan tuulipuisto. Natura-arviointi. Hakupäivä 27.1.2024.  
[https://ii.fi/sites/ii.fi/files/TIEDOSTOT/ASUMINEN\\_YMPARISTO/Kaavoitus/Liite6\\_osa2\\_Natura\\_Tuuliaapa-Iso\\_Heposuo.pdf](https://ii.fi/sites/ii.fi/files/TIEDOSTOT/ASUMINEN_YMPARISTO/Kaavoitus/Liite6_osa2_Natura_Tuuliaapa-Iso_Heposuo.pdf).

Tuusula 2024. Kaavaprosessi. Hakupäivä 9.2.2024.  
[https://www.tuusula.fi/sivu.tmpl?sivu\\_id=7547](https://www.tuusula.fi/sivu.tmpl?sivu_id=7547).

Väylävirasto 2023. Infrarakentamisen vähähiilisuuden arviointimenetelmä. Väyläviraston ohjeita 43/2023. Hakupäivä 9.5.2024. [https://ava.vaylapiivi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2023-43\\_vahahiilisuuden\\_arviointimenetelma\\_web.pdf](https://ava.vaylapiivi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-43_vahahiilisuuden_arviointimenetelma_web.pdf).

Ympäristöministeriö 2016. Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. Päivitys 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5/2016. Helsinki. Hakupäivä 21.11.2023. 10.11.2023.  
[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH\\_5\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH_5_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Ympäristöministeriö 2024. Tuulivoimarakentaminen. Hakupäivä 21.11.2023.  
<https://ym.fi/tuulivoimarakentaminen>.