

Mikael Ahtonen

TUULIVOIMALAN KIERRÄTTÄMISEN ELINKAARI- JA KUSTANNUSVAIKUTUS

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen
Yliopistonlehtori Hannele Auvinen
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Mikael Ahtonen: Tuulivoimalan kierrättämisen elinkaari- ja kustannusvaikutus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-ohjelma
Huhtikuu 2024

2010-luvulla tuulivoimarakentaminen Suomessa kasvoi räjähdysmäisesti. Kasvun katalysaattorina toimi vuonna 2011 voimaantullut syöttötariffijärjestelmä, jossa tuulivoimayhtiöitä tuettiin maksamalla tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan erotuksen määrä markkinatukea. Järjestelmään ei olla hyväksytty uusia tuulivoimaloita 1.11.2017 jälkeen. Vuodesta 2018 eteenpäin tuulivoimaa on rakennettu markkinaehtoisesti ilman tukia. Koska 2010-luvun aikana on rakennettu noin 750 uutta tuulivoimalaa Suomessa ja tuulivoimalan keskimääräisen käyttöiän ollessa noin 20–25 vuotta, on 2030-luvun aikana ja jälkeen tulossa Suomeen merkittävä purku- ja kierrätystaakka tuulivoimaloista.

Tämän työn tavoitteena oli selvittää minkälaisia ympäristö- ja kustannusvaikutuksia koituu tuulivoimalan kierrättämisestä. Lisäksi työssä selvitettiin tuulivoimalan valmistautumista tulevaan purku- ja kierrätystaakkaan. Työssä tutustuttiin tuulivoimalan rakenteeseen, komponenttien materiaaleihin sekä niiden kierrätettävyyteen. Työssä tehtiin myös kirjallisuuskatsaus nykyisiin ja tuleviin tapoihin kierrättää tuulivoimalan hankalasti kierrätettäviä komponentteja, kuten lapoja, sekä tarkasteltiin tuulivoimaloiden kierrättämiseen ja purkamiseen liittyvää lainsäädäntöä.

Työssä tutkittiin vuosien 2010–2020 välillä rakennettua keskimääräisen kokoista tuulivoimalaa Suomessa. Tutkittu voimala oli roottorihalkaisijaltaan 126 m ja sen napakorkeus oli 134 m. Tuulivoimalan sähköteho oli 3,45 MW_e. Tässä työssä tehty elinkaariarviointi pohjautui laitevalmistaja Vestas Wind Systems A/S aikaisemmin toteuttamiin elinkaariarviointeihin omasta tuulivoimalamallistostaan. Työssä koottiin elinkaari-inventaario tuulivoimalan materiaaleista sekä sen valmistamiseen ja loppukäsittelyyn käytetyistä prosesseista. Elinkaari-inventaario on osa elinkaariarviointia ja sen kautta määritetään, että kuinka paljon mikäkin komponentti aiheuttaa ympäristövaikutuksia. Elinkaariarvioinnin tulokseksi saatiin, että tuulivoimalan sijainnilla on merkitystä elinkaaren hiilijalanjälkeen. Vaikutus ei kuitenkaan aiheudu tuulivoimalan valmistamisesta ja kuljettamisesta tuotantopaikalle vaan siitä, että sijaintien väliset tuuliolosuhteet voivat vaihdella merkittävästi. Tutkituista sijainneista Kalajoella sijaitsevalla tuulivoimalalla oli noin 15 % pienempi hiilijalanjälki verrattuna Isojoella ja Simossa sijaitseviin voimaloihin. Tuulivoimaloiden elinkaaren hiilijalanjäljeksi saatiin 4,3–6,4 g CO₂-ekv/kWh riippuen tuulivoimalan sijainnista sekä lapojen loppukäsittelytavasta.

Purku- ja kierrätyskustannuksien osalta saatiin tulokseksi, että kustannukset ovat erittäin riippuvaisia perustusten betonin käsittelykustannuksista. Tuulivoimalan purkamisesta voidaan jopa saada tuloja, mikäli tuulivoimalan perustukset voidaan jättää maisemoituna maaperään. Jos perustusten betoni kuitenkin joudutaan käsittelemään jätehuollon kautta, koituu perustusten loppukäsittelystä suurin kulu tuulivoimalaa purettaessa. Tuulivoimalan lapojen osalta tulokseksi saatiin, että mikäli lavat kierrätetään murskaamalla, käsittelykustannukset ovat noin 8 500–12 700 €. Kemiallisesti kierrätettäessä lapojen käsittelykustannukset ovat noin 20 300–22 400 €. Kustannuslaskennasta selvisi, että mikäli perustusten betoni hyödynnetään murskeena maarakentamisessa, koituu tuulivoimalan purkamisesta ja kierrättämisestä 23 000–126 700 € kuluja.

Kyselytutkimuksen vastaukset käsiteltiin anonyymisti siltä osin, että vastanneiden yritysten nimiä ei mainittu. Kyselyyn vastanneet yritykset olivat pääsääntöisesti hyvin varautuneita tuulivoimaloiden purkuun ja kierrättämiseen tulevaisuudessa. Eräät yritykset olivat jo aikaisemmin purkaneet ja kierrättäneet tuulivoimaloita. Kyselytutkimuksen tuloksia ei kuitenkaan pidä yleistää alan yleismielipiteeksi, sillä kyselyyn vastanneita yrityksiä oli vain 10 kappaletta.

Avainsanat: tuulivoima, kierrättäminen, hiilijalanjälki, elinkaariarviointi.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Mikael Ahtonen: Life cycle impacts and costs of wind turbine recycling
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree Program in Environmental and Energy Engineering
April 2024

During the 2010s, the construction of wind power in Finland grew exponentially. The growth was catalyzed by the feed-in tariff system introduction in 2011. It supported wind power companies by paying them the difference between a set target price and the market price as market subsidies. No new wind turbines have been accepted into the feed-in tariff system after 1.11.2017. From 2018 onwards, new wind turbines have been built on market terms without subsidies. Since around 750 new wind turbines were built in Finland during the 2010s and the average lifespan of a wind turbine is approximately 20–25 years, a significant dismantling and recycling burden from wind turbine is expected during and after the 2030s in Finland.

The aim of this study was to investigate what kind of environmental and cost impacts arise from recycling wind turbines. Additionally, this thesis explored how the wind power sector in Finland is preparing for the future dismantling and recycling burden. The thesis included an examination of wind turbines, its materials, and their recyclability. A literature review was also conducted on current and future methods for recycling components of wind turbine that are difficult to recycle i.e. wind turbine blades. Related legislation on dismantling and recycling wind turbines was also examined.

The study focused on average sized wind turbine that was built between 2010 and 2020 in Finland. The studied turbine had a rotor diameter of 126 m and a hub height of 134 m. The power generation capacity of the turbine was 3,45 MW_e. This study's life cycle assessment was based on previous assessments conducted by Vestas Wind Systems A/S for its own wind turbine models. A life cycle inventory of the materials used in the wind turbine and the processes used in manufacturing and end-of-life treatment (EOL) was compiled. The life cycle inventory determines how much each component contribute to overall environmental impacts.

The results of the done life cycle assessment showed that the location of the wind turbine has a significant impact on the wind turbines carbon footprint. However, the impact does not stem from the manufacturing and transportation of the turbine to the site but rather from the fact that wind conditions can vary significantly between locations. Among the locations studied, the wind turbine located in Kalajoki had about a 15 % smaller carbon footprint compared to those in Isojoki and Simo. The carbon footprint of the studied wind turbines was found to be between 4,3–6,4 g CO₂-eq/kWh depending on the location of the turbine and the method of blade EOL treatment.

Regarding dismantling and recycling costs, it was found that costs are highly dependent on EOL treatment costs of the foundations' concrete. Dismantling the wind turbine could even generate income for the owner if the turbine's foundations can be left landscaped into the soil. However, if the foundations concrete needs to be processed through waste management companies, the EOL treatment costs of the foundations becomes the largest cost in wind turbine dismantling. For the turbines blades it was found that if they are recycled by crushing, the processing costs are approximately 8,500–12,700 €. If the blades are recycled chemically, the processing costs are approximately 20,300–22,400 €. Cost analysis showed that if the foundations' concrete is utilized as crushed filler material in construction, the costs of dismantling and recycling a wind turbine would be 23,000–126,700 €.

The responses to the conducted survey were processed anonymously. The companies that responded to the survey were generally prepared for the future dismantling and recycling of wind turbines. Some companies had previously dismantled and recycled wind turbines. However, the results of the survey shouldn't be generalized as the overall opinion of the industry, as there were only ten responding companies in the survey.

Keywords: wind power, recycling, carbon footprint, life cycle assessment.

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

Opinnäytetyössäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

Työkalun nimi (ja versio): ChatGPT 3.5 ja 4, Consensus

Käyttötarkoitus ja osio, jossa työkalua käytettiin:

ChatGPT: kappalerakenteiden jäsentely, kieliasun tarkastelu, tekstien kääntäminen suomen kielelle. Luvut 1–6.

Consensus: tiedonhaku, pääkohtien etsintä ja ilmaisu tieteellisistä teksteistä. Luvut 2 ja 3.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista julkaisueettisten normien rikkomuksista.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin omasta kiinnostuksesta AFRY Finland Oy:n rahoittamana. Kiitän AFRYa mahdollisuudesta kirjoittaa diplomityöni sellaisesta aiheesta, jonka koen olevan yhteiskunnallisesti tärkeä ja tuulivoima-alalle yleishyödyllinen. Haluan kiittää AFRYn puolen ohjaajaani Tiina Sarjaa. Työ ei olisi kieliasultaan lähellekään nykyistä tasoaan ilman hänen kommenttejaan.

Haluan myös kiittää yliopiston puolelta ohjaajiani Henrik Tolvasta ja Hannele Auvista. Henrikin pitämät energiatekniikan kurssit ovat olleet aina erittäin laadukkaita ja opettavaisia. Ilman näitä kursseja en olisi ikinä oppinut Excelin voimaa. Hannelen kurssi elinkaariarviointiin liittyen toimi katalysaattorina tämän työn aiheeseen. Ilman kyseistä kurssia en olisi todennäköisesti ikinä kiinnostunut päästölaskennasta.

Opiskelu on monien mielestä ihmisen parasta aikaa ja aatokseen voin täysin yhtyä. Opiskeluaikaani on mahtunut vähän kaikenlaista ja haluankin kiittää kamujani Kaverit Oy Ab ry:ltä. Kamut tekivät opiskeluajastani melkoisen hauskaa ja teidän kanssanne oli kunnia päästä koskeen TTY:n viimeisinä fukseina. Toivottavasti vielä joskus käytäisiin Haitarin buffassa :).

Haluan kiittää vanhempiani opiskeluni ja muun elämän jatkuvasta tukemisesta. Ilman heitä en olisi varmaan kiinnostunut lapsuudessa enemmän tekniikasta. Pahoittelut kuitenkin äidilleni siitä, että minusta ei nyt tullut öljysheikkiä energiatekniikan opintojen kautta. Suuri kiitos myös koiralleni Yodalle. Olet ollut aivan uskomaton terapiakoira koko diplomityöprojektin keston ajan. Suurin kiitos kuuluu kuitenkin paremmalle osapuolelleni Sannalle. Vertaistukesi niin diplomityöhön kuin myös elämään liittyen on ollut korvaamaton. Ehkä näin valmistumisen kynnyksellä uskon sinun mielipidettäsi siitä, että leipäveitset ovat teräviä, eikä tylsiä.

Tampereella, 15.4.2024

Mikael Ahtonen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUULIVOIMALAN ELINKAARIVAIHEET.....	3
2.1 Tuulivoimalan rakenne	3
2.2 Komponentit ja niiden valmistus.....	7
2.2.1 Perustukset.....	8
2.2.2 Torni	11
2.2.3 Lavat.....	13
2.2.4 Naselli, napa ja sähköistyskomponentit.....	16
2.3 Tuulivoimalan käyttö ja purku.....	18
2.4 Tuulivoiman sidosryhmät	19
3. TUULIVOIMALAN KIERRÄTTÄMINEN	21
3.1 Tuulivoimalan komponenttien kierrätettävyys.....	21
3.2 Kierrätys- ja loppusijoitusmenetelmät vaikeasti kierrätettävälle materiaaleille.....	23
3.2.1 Lapojen murskaus.....	23
3.2.2 Lapojen kemiallinen kierrättäminen	25
3.2.3 Poltto	26
3.2.4 Kaatopaikkajäte	27
3.3 Purkuun ja kierrätykseen liittyvä lainsäädäntö.....	27
3.4 Elinkaariarvioinnin toteuttaminen ja hiilijalanjäljen määrittäminen.....	29
3.4.1 Toteuttamisvaiheet.....	29
3.4.2 Aikaisemmat elinkaariarviointit tuulivoimaan liittyen	32
4. AINEISTOT JA MENETELMÄT	35
4.1 Tutkimusstrategia, -tavoite ja soveltamisala	35
4.2 Case-tutkimuksen tuulivoimala ja kohteet	36
4.3 Kustannuslaskenta.....	40
4.4 Elinkaariarviointi.....	43
4.5 Elinkaari-inventaario	45
4.5.1 Valmistuksen elinkaari-inventaario.....	46
4.5.2 Kierrätyksen elinkaari-inventaario	50
4.6 Kyselytutkimus.....	56
5. TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA.....	58
5.1 Elinkaariarvioinnin tulokset.....	58
5.2 Kustannuslaskennan tulokset.....	68
5.3 Kierrättäminen tuulivoimatoimijoiden näkökulmasta	70

5.4 Tuloksien pohdinta ja jatkotutkimusten tarve	77
5.4.1 Elinkaariarviointi.....	77
5.4.2 Kustannuslaskenta.....	78
5.4.3 Kyselytutkimus.....	78
6. YHTEENVETO.....	80
LÄHTEET	83
LIITE A: SIMAPRO ELINKAARIVERKOSTOT CASE-TUTKIMUKSEN TUULIVOIMALOILLE	88
LIITE B: KYSELYTUTKIMUKSEN KYSYMYKSET	103
LIITE C: KYSELYTUTKIMUKSEN TIETOSUOJAILMOITUS	105

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Erityyppiset pystyakselituulivoimalat. Muokattu lähteestä [8].</i>	3
Kuva 2.	<i>Erityyppiset vaaka-akseliset voimalat [9].</i>	4
Kuva 3.	<i>Vertailu erityyppisten tuulivoimaloiden tehokkuudesta [11].</i>	5
Kuva 4.	<i>Vaihdelaatikollisen vaaka-akselisen tuulivoimalan rakenne [12].</i>	6
Kuva 5.	<i>Suoravetotuulivoimalan rakenne. Muokattu lähteestä [14].</i>	7
Kuva 6.	<i>Pintaperustuksen poikkileikkaus [19].</i>	9
Kuva 7.	<i>Painovoimaperustuksen poikkileikkaus [19].</i>	9
Kuva 8.	<i>Paalutetun laattaperustuksen rakenne [20].</i>	10
Kuva 9.	<i>Tuulivoimalan lapa ja sen rakennekomponentit. Komponenteissa havaittavissa kaksi aeroshell-kuorta ja kaksi tukipuuta. Muokattu lähteestä [27].</i>	13
Kuva 10.	<i>Tuulivoimalan lavan rakenne. Muokattu lähteestä [29].</i>	14
Kuva 11.	<i>Yksinkertaistettu havainnekuva RTM valmistusmenetelmien prosessivaiheista.</i>	15
Kuva 12.	<i>Tuulivoimalan jätehierarkia [45].</i>	21
Kuva 13.	<i>Kuusakoski Oy:n komposiittimurskaus [52].</i>	24
Kuva 14.	<i>LCA:n neljä iteratiivista vaihetta. [71, s. 8].</i>	30
Kuva 15.	<i>Tutkimusstrategia.</i>	35
Kuva 16.	<i>Järjestelmän rajat sekä prosessivirtaukset.</i>	36
Kuva 17.	<i>Vestas V126-3.45MW tehokäyrä [77].</i>	37
Kuva 18.	<i>Tuulivoimaloiden sijainnit, sekä kuljetussatamat. – Merkkää rahtikuljetusta ja • tuulivoimalan sijaintia.</i>	38
Kuva 19.	<i>Komponenttien kuljetusverkosto pois lukien rekkakuljetukset Suomessa. – Merkkää rahtikuljetusta ja • komponenttien valmistussijaintia.</i>	39
Kuva 20.	<i>Vestaksen tuulivoimaloiden tornin massa suhteutettuna tornin korkeuteen [76].</i>	44
Kuva 21.	<i>Vestaksen tuulivoimaloiden perustuksien massa suhteutettuna tornin korkeuteen [76].</i>	45
Kuva 22.	<i>Komponenttikohtaiset osuudet kokonaispäästöistä rakentamisvaiheessa.</i>	59
Kuva 23.	<i>Tarkasteltujen voimalasijaintien tuulennopeuden Weibull-jakaumat.</i>	60
Kuva 24.	<i>Tarkasteltujen voimalasijaintien vuosittainen tuotantojakauma.</i>	60
Kuva 25.	<i>Isojoen tuulivoimalan komponenttikohtaiset päästöt, kun komponenteille on asetettu kierrätyshyvyitys.</i>	61
Kuva 26.	<i>Kalajoen tuulivoimalan komponenttikohtaiset päästöt, kun komponenteille on asetettu kierrätyshyvyitys.</i>	62
Kuva 27.	<i>Simon tuulivoimalan komponenttikohtaiset päästöt, kun komponenteille on asetettu kierrätyshyvyitys.</i>	62
Kuva 28.	<i>Tuulivoimalan ja perustuksien elinkaaren hiilijalanjälki eri lapojenkäsittelymenetelmillä.</i>	63
Kuva 29.	<i>Ilmaston lämpenemispotentiaali eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.</i>	64
Kuva 30.	<i>Stratosfäärinen otsonikato eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.</i>	64
Kuva 31.	<i>Pienhiukkasten muodostuminen eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.</i>	65
Kuva 32.	<i>Vedenkulutus eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.</i>	65

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

<i>APOS</i>	eng. Allocation at the point of substitution. Elinkaariarvioinnin allokointimenetelmä.
<i>CETEC</i>	eng. Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites. Hanke tuulivoimaloiden lapojen kemialliseen kierrättämiseen.
<i>CFC-11-ekv</i>	Trikloorifluorimetaaniekvivalenttia
<i>CH</i>	Sveitsi. Maakoodi.
<i>CO₂-ekv</i>	Hiilidioksidiekvivalentti.
<i>DK</i>	Tanska. Maakoodi.
<i>EOL</i>	eng. end-of-life. Käyttöikänsä päässä oleva laite.
<i>FI</i>	Suomi. Maakoodi
<i>GFRP</i>	eng. glass fibre-reinforced plastic. Lasikuituvahvistettu lujitemuovi.
<i>GLO</i>	eng. Global. Maailmanlaajuinen
<i>ISO</i>	eng. International Organization for Standardization. Kansainvälinen standardisoimisjärjestö.
<i>HGWL</i>	eng. High ground water level. Korkea pohjaveden taso.
<i>KiMuRa</i>	Lyhenne kierrätetty ja murskattu raaka-aine -hankkeesta.
<i>LCA</i>	eng. Life Cycle Assessment. Elinkaariarviointi.
<i>LCI</i>	eng. Life cycle inventory. Elinkaari-inventaario.
<i>LCOE</i>	eng. Levelized Cost of Energy. Elinkaaren ajalta laskettu tuotanto-kustannus energialle.
<i>LGWL</i>	eng. Low ground water level. Matala pohjaveden taso.
<i>MRL</i>	Maankäyttö- ja rakennuslaki.
<i>NREL</i>	eng. National Renewable Energy Laboratory. Yhdysvalloissa toimiva tutkimuskeskus uusiutuvaan ja vähähiiliseen energiaan.
<i>Prepreg</i>	eng. Pre-impregnated. Termi esikyllästetyille kuitukankaille.
<i>RER</i>	Eurooppa.
<i>RTM</i>	eng. Resin Transfer Moulding. Hartsinsiirtoinfuusio. Tuulivoimalan lapojenvalmistusmenetelmä.
<i>ROW</i>	eng. Rest of World. Muu maailma.
<i>SETAC</i>	eng. Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Kansainvälinen ympäristötoksikologian ja ympäristökemian järjestö.
<i>STY</i>	Suomen Tuulivoimayhdistys ry.
<i>PM_{2.5}-ekv</i>	Ekvivalenssi pienhiukkasiin, joiden läpimitta on alle 2,5 mikrometriä.
<i>UNECE</i>	eng. United Nations Economic Commission for Europe. Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio.
<i>VARTM</i>	eng. Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding. Hartsin tyhjiöinfuusio. Lapavalmistusmenetelmä.

Merkinnät

<i>CO₂-ekv/kWh</i>	Hiilidioksidiekvivalentti tuotettua energiayksikköä kohden.
<i>dB</i>	Desibeli.
<i>Wh</i>	Wattitunti.

1. JOHDANTO

Tuulivoima on tärkeä osa Suomen energiantuotantojärjestelmää. Investoinnit tuulivoimaan ovat olleet jatkuvassa ja kiihtyvässä kasvussa 2010-luvun alusta asti. Kasvu johtuu monista eri syistä, mutta pääasiallinen syy investointeihin on ollut ennen vuotta 2018 valtion tukema syöttötariffijärjestelmä, jossa tuulivoimaa tuettiin maksamalla tuotetusta sähköstä ennalta sovittu hinta [1]. Syöttötariffijärjestelmään hyväksytyille tuulivoimaloille maksetaan tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan erotuksen määrä tukia ja tukia voimalaitos voi saada 12 vuoden ajan. Järjestelmä otettiin käyttöön vuonna 2011 ja uusia tuulivoimaloita ei otettu järjestelmän piiriin 1.11.2017 jälkeen. Syöttötariffijärjestelmän sulkeutumisen jälkeen tuulivoimaloita on rakennettu markkinaehtoisesti, sillä teknologian kehitys on ollut erittäin nopeaa. Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n (STY) mukaan vuonna 2009 rakennettu 3 MW_e tuulivoimala tuotti noin 9 000 MWh_e vuodessa, kun taas vuonna 2019 rakennettu tuulivoimala tuottaa vuosittain jopa 19 000 MWh_e vuodessa.

Vuoden 2022 marraskuussa maa- ja merituulivoimahankkeita oli meneillään 345 kappaletta, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti oli 65 945 MW [2]. Vuosien 2010–2022 välillä Suomen alueille pystytettiin yhteensä 1330 tuulivoimalaa, kun taas purettiin vain 47 kappaletta erinäisten syiden vuoksi [3]. Koska 2010-luvulla rakennettujen tuulivoimaloiden keskimääräinen käyttöikä on noin 20–25 vuotta [4, s. 13], [5, s. 12], [6, s. 39], tarkoittaa se vuosille 2030–2045 mittavan määrän purkutaakkaa.

Tuulivoimaloita pystytään kierrättämään hyvällä kierrätysasteella. Ongelmia kierrättämiseen tuottaa kuitenkin tuulivoimaloiden lavat. Lavat valmistetaan erittäin kestävästä komposiittimateriaaleista kuten lasikuitulujitetusta muovista (GFRP). Lujitemuoveja on haastavaa kierrättää ja jatko prosessoida end-of-life (EOL) -tilanteessa, minkä vuoksi tähän asti ne ovat useimmiten joko poltettu energijätteenä tai ne on loppusijoitettu kaatopaikalle. Jatkovasti yleistävämpi loppukäsittelytapa GFRP-jätteelle on ollut jätteen murskaaminen ja murskeen hyötykäyttö raaka-aineena. Lapojen murskauskierrätys on tämän työn yksi tutkittavista osa-alueista.

Tämän työn tavoitteena on selvittää minkälaisia ympäristö- ja kustannusvaikutuksia koi-
tuu tuulivoimalan kierrättämisestä. Lisäksi työssä selvitetään tuulivoima-alan valmistau-
tumista tulevaan purku ja kierrätystaakkaan kun tuulivoimaloita ruvetaan ottamaan pois

käytöstä laajemmin 2030-luvun aikana. Tavoitteiden saavuttamiseksi työ jaettiin viiteen tutkimuskysymykseen:

1. Mikä on tuulivoimalan elinkaaren hiilijalanjälki ja mikä on kierrätyksen rooli siinä?
2. Mitä kierrätysmenetelmiä tuulivoimalan komponenteille on olemassa?
3. Mitä sidosryhmiä kierrätykseen osallistuu ja mikä on eri sidosryhmien rooli?
4. Missä tilanteessa Suomessa toimivat tuulivoimayritykset ovat kierrätyksen suhteen ja miten kierrättämistä aiotaan kehittää?
5. Mikä on tarkasteltavan tuulivoimalan elinkaaren hiilijalanjälki? Mikä on kierrätyksen vaikutus siihen ja kuinka paljon kierrätys maksaa?

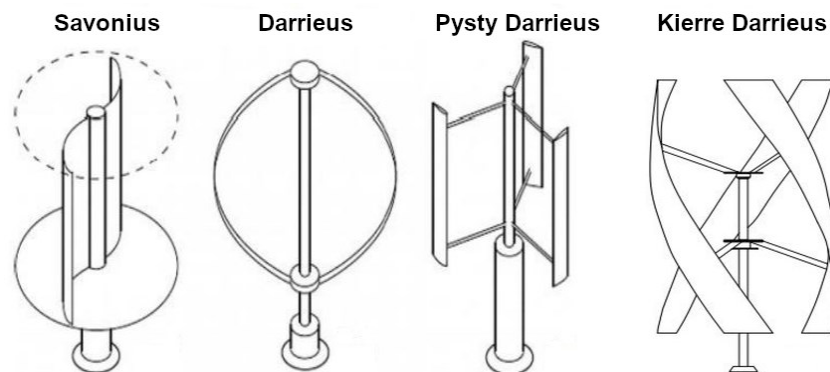
Työn teoriaosuuden avulla kerätään tarvittava tieto tutkimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi. Teoria esitetään luvuissa kaksi ja kolme. Toisen luvun kahdessa ensimmäisessä alaluvussa on kirjallisuuskatsaus siihen, että mistä tuulivoimala koostuu ja miten komponentit valmistetaan. Tämän jälkeen kolmannessa alaluvussa esitellään tuulivoimalan käyttöön ja purkuun liittyviä aiheita ja neljännessä alaluvussa tuodaan esille tuulivoimaan liittyvät sidosryhmät. Kolmannessa luvussa syvennytään tuulivoimalan kierrättämiseen. Luvun ensimmäisessä ja toisessa alaluvussa toteutetaan kirjallisuuskatsaus tuulivoimalan komponenttien kierrätettävyyteen, jonka jälkeen kolmannessa alaluvussa tehdään lyhyt kirjallisuuskatsaus purkuun ja kierrätykseen liittyvään lainsäädäntöön Suomessa. Kolmannen luvun viimeisessä alaluvussa syvennytään elinkaariarvioinnin toteuttamiseen ja aikaisempien tutkimuksien tuloksiin. Neljäs luku käsittelee tämän työn tutkimusmetodologiaa. Siinä tuodaan esille tutkimusstrategia, tarkasteltavat kohteet, sekä kustannuslaskennan ja elinkaariarvion lähtötiedot. Lisäksi neljännessä luvussa esitellään kyselytutkimuksen kysymyspohja. Viidennessä luvussa käsitellään elinkaariarvioinnin, kustannuslaskennan ja kyselyn tuloksia, sekä pohditaan tulosten merkitystä.

2. TUULIVOIMALAN ELINKAARIVAIHEET

Tämän luvun tarkoituksena on laajentaa ymmärrystä tuulivoimalan elinkaaresta ja sen eri vaiheista. Alussa käsitellään yleisesti tuulivoimalan rakennetta ja kerrotaan erityyppisistä tuulivoimaloista. Tämän jälkeen käsitellään tarkemmin tuulivoimalan komponentteja ja niiden valmistusprosesseja. Tuulivoimaloiden pääkomponentit, kuten torni, lavat, naselli, napa sekä sähköistyskomponentit ovat pääasiallisesti tarkastelun kohteena. Tämän jälkeen tarkastellaan tuulivoimalan käytön ja purun vaiheita. Näistä vaiheista tuodaan esille niiden erityispiirteet sekä mahdolliset haasteet. Viimeisenä kerrotaan tuulivoimatoimintaan liittyvistä sidosryhmistä.

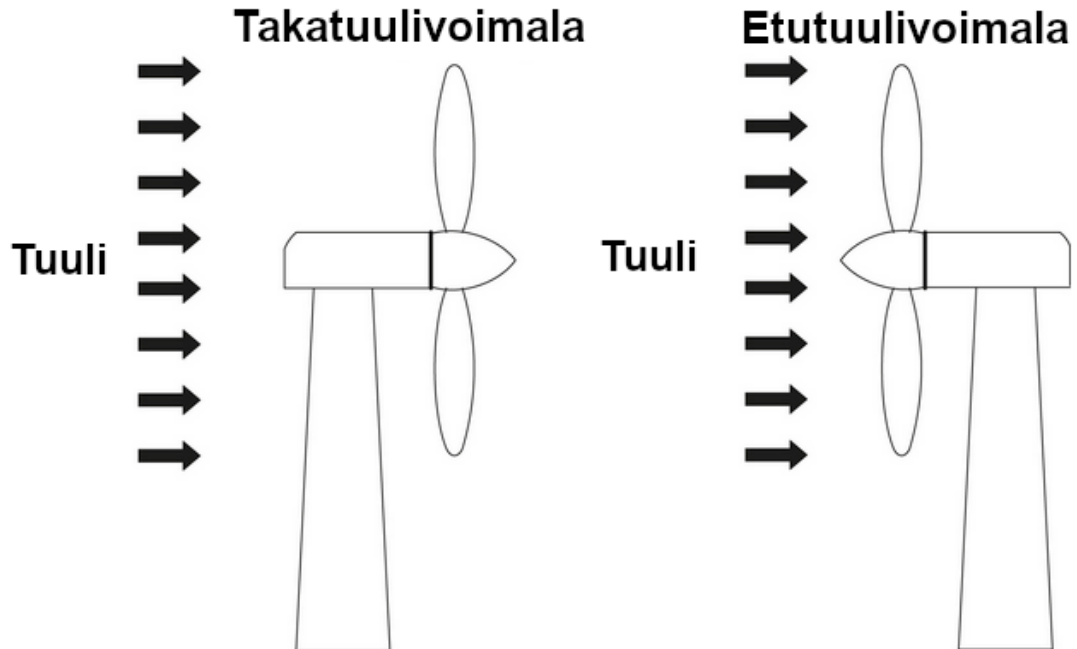
2.1 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimaloita voidaan valmistaa monella erilaisilla tavoilla ja tekniikoilla. Rakenteellisesti niitä voi olla pystyakselisia ja vaaka-akselisia sekä 1-, 2-, 3- tai useampilapaisina. Yleisimmät teollisuusluokan tuulivoimatuotannossa käytettävät voimat ovat vaaka-akselisia ja 3-lapaisia. Kyseinen rakennustyyli on koettu kustannustehokkaimmaksi tavaksi tuottaa energiaa tuulella, sillä rakennuskustannukset saatuun hyötyyn nähden ovat parhaimmillaan. Pienemmät kotitalouskäyttöön ja kaupunkiympäristöön sijoitettavat tuulivoimat ovat yleensä omakäyttöä varten ja täten näitä tapauksia varten on usein ollut kustannustehokkaampaa rakentaa pystyakselisia voimaloita tai 2-lapaisia vaaka-akselisia voimaloita. Pystyakselisia tuulivoimaloita voivat olla muun muassa Savonius- tai Darrieus-tyyliset voimat (Kuva 1). [7] Tämän tyyppiset voimat ovat usein yksinkertaisia rakenteeltaan, itsestään käynnistyviä, halpoja ja kykeneviä vastaanottamaan tuulta jokaisesta ilmansuunnasta ilman tarvetta kääntää tuulivoimalaa.



Kuva 1. Erityyppiset pystyakselituulivoimalat. Muokattu lähteestä [8].

Vaaka-akselin tuulivoimaloissa vääntömomenttia tuottava roottori suunnataan aina tuulta kohti. Roottorin akseli on kyseisissä voimaloissa maanpinnan suuntaisesti, ja ne ovat lähtökohtaisesti tehokkaampia kuin pystyakseliset tuulivoimalat. [7] Vaaka-akselisia tuulivoimaloita voi olla kahta erilaista, takatuuli- ja etutuulivoimaloita (Kuva 2).

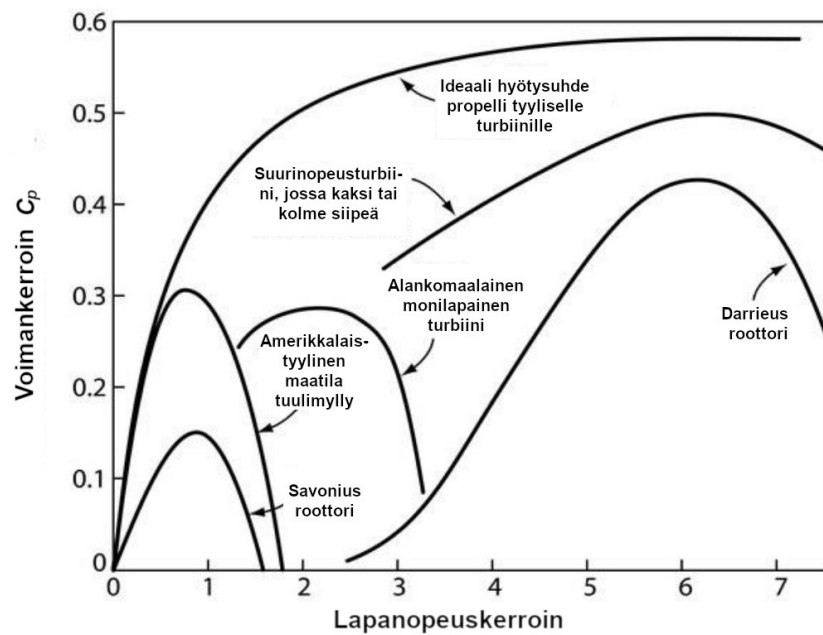


Kuva 2. Erityyppiset vaaka-akseliset voimalat [9].

Etutuulivoimaloilla on merkittäviä etuja teollisen mittaluokan energiantuotannossa verrattuna takatuulivoimaloihin [7], [9, s. 246]. Tämä johtuu siitä, että takatuulivoimassa tuulivoimalan torni aiheuttaa tuuleen turbulenssia ja pyörteitä ennen lapojen saavuttamista. Pyörteinen tuuli aiheuttaa lapoihin lisääntyneitä värinää ja melua verrattuna etutuulivoimalaan. Täten takatuulivoimalan komponentteihin kohdistuu suurempaa rasitusta verrattuna etutuulivoimalaan. Etutuulivoimalan matalammat äänitasot auttavat voimaloiden luvittamisessa, sillä tuulivoimahankkeissa tuulivoimaloiden äänitasoihin täytyy kiinnittää huomioita. Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden melun ohjearvoista määrittää sallitun kuultavan äänitason pysyvän tai vapaa-ajan asutuksen ulkoalueilla, sekä virkistys- ja kansallispuistojen alueilla. Asutus ja virkistys alueilla tuulivoimaloiden aiheuttamat äänitasot eivät saa ylittää päivällä 45 dB ohjearvoa ja öisin 40 dB äänitason ohjearvoa. Kansallispuistoihin pätee 40 dB ohjearvo ajasta riippumatta. [10]

Vaaka-akselisissa voimaloissa voimalan roottori tulee kääntää kohti tuulta, jotta voimala pystyy tuottamaan sähköä. Tuuleen suuntaaminen tapahtuu lähtökohtaisesti aina moottorikäyttöisesti megawattiluokan tuulivoimaloissa. Megawattiluokan voimaloissa kolme lapaa on jo täysin vakiintunut käytäntö. Kolmilapainen roottori on pyörähdyssymmetri-

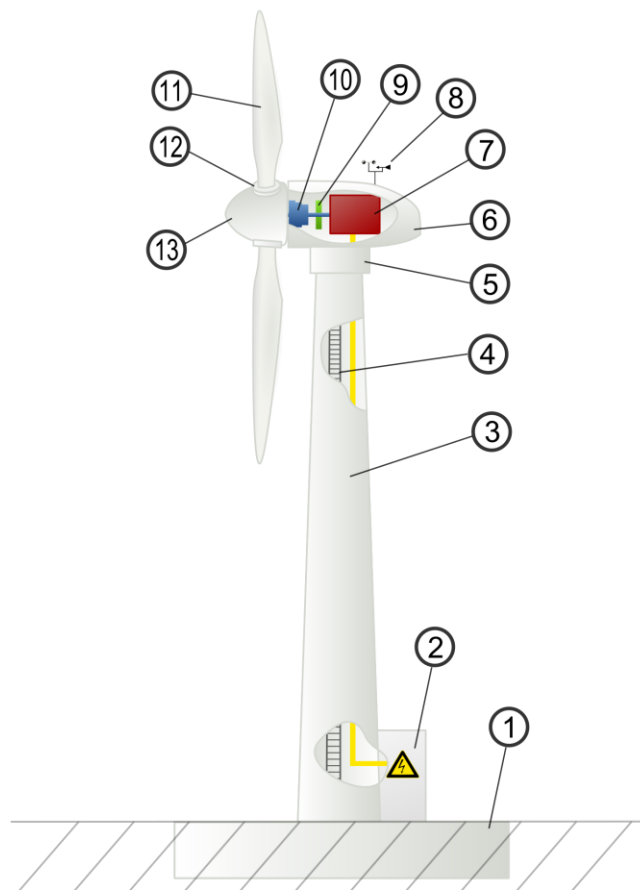
sesti tasapainossa ja massahitusvoimat ovat tasapainossa kaikkien akseleiden suhteen. Mikäli voimalassa on vähemmän kuin kolme lapaa, aiheutuu tuuleen käännettäessä tuulivoimalaan merkittävää räsitusta, sillä massahitusvoimat vaaka- ja pystyakselin suhteen ovat eroavaiset. Massahitusvoimien eroavaisuus voi myös aiheuttaa värinää lavoissa, mikä lisää lapojen tuottamaa ääntä sekä voi lyhentää niiden käyttöikää. Mikäli lappoja taas on enemmän kuin kolme, tuulivoimalan kustannukset ja massa kasvavat merkittävästi, mutta energiaa ei tuoteta paljoa enempää verrattuna kolmilapaiseen roottoriin. Kuvassa 3 on esitetty erityyppisten tuulivoimaloiden tehokkuus voimankertoimen ja lapanopeuskertoimen funktioina. [7], [11]



Kuva 3. Vertailu erityyppisten tuulivoimaloiden tehokkuudesta [11].

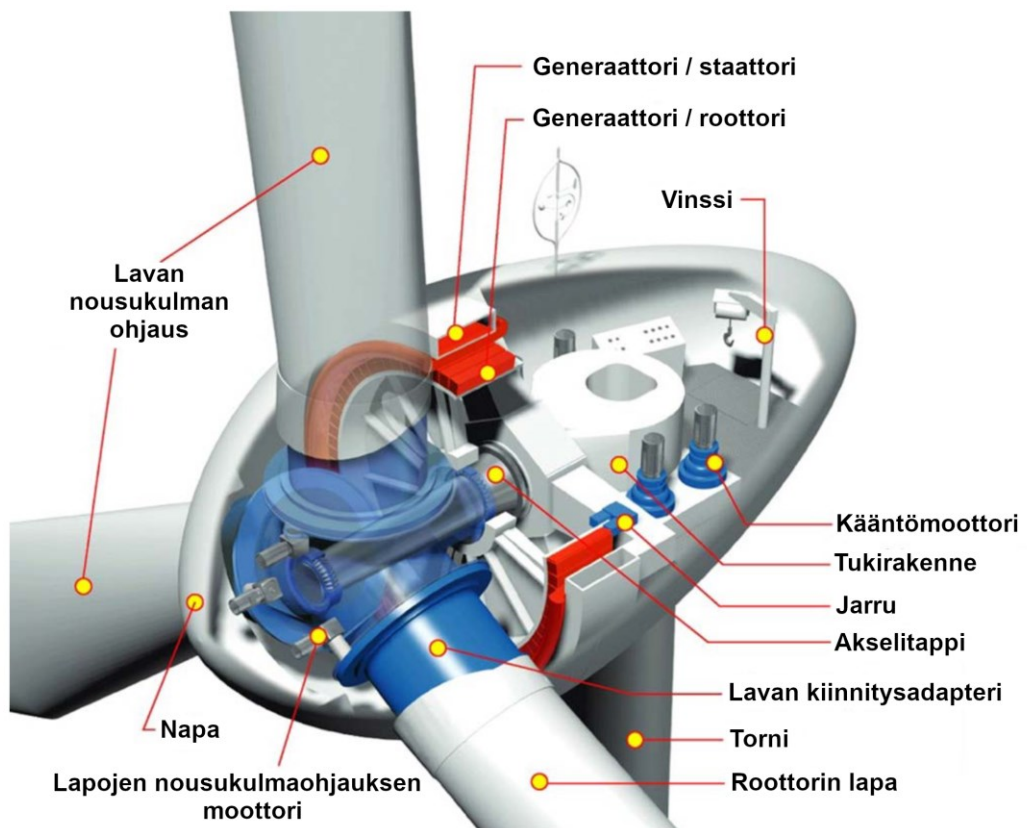
Kuvassa 4 on esitetty vaihdelaatikollisen vaaka-akselisen etutuulivoimalan komponentit. Komponentit ovat [12]:

1. Perustukset
2. Yhteys sähköverkkoon
3. Torni
4. Tikkaat konehuoneeseen
5. Tuuleen suuntausohjaus/Yaw-moottori
6. Naselli ja konehuone
7. Generaattori
8. Tuulennopeuden mittari
9. Jarru
10. Vaihdelaatikko
11. Roottorilapa
12. Lavan nousukulmanohjaus
13. Roottorin keskiö



Kuva 4. Vaihdelaatikollisen vaaka-akselisen tuulivoimalan rakenne [12].

Mikäli tuulivoimala on suoravetotyyppinen, jää tuulivoimalasta vaihdelaatikko pois. Suoravetoisessa tuulivoimalassa roottorista välittyvä vääntömomentti välittyy suoraan generaattorille. Suoravetotekniikka on osoittautunut edukkaimmaksi tyyliksi asentaa tuulivoimaa merelle. Koska tuulivoimalan mekaanisen rasituksen alaiset komponentit vähenevät merkittävästi vaihdelaatikon poistolla, on suoravetoinen tuulivoimala merkittävästi luotettavampi ja huoltovapaampi, sekä joissakin tapauksissa myös kevyempi. Merellä laajempien huoltotoimenpiteiden, kuten vaihdelaatikon täyshuollon tekeminen on erittäin kallista, mikä tarkoittaa sitä, että elinkaaren aikana suoravetoisen tuulivoimalan kustannukset voivat tulla halvemmaksi verrattuna saman mittaluokan vaihdelaatikolliseen tuulivoimalaan. Tuulivoimaloiden vaihdelaatikot voivat vaatia jopa 5 vuoden välein laajemman huollon. [13, s. 44]



Kuva 5. Suoravetotuulivoimalan rakenne. Muokattu lähteestä [14].

Myöhemmissä luvuissa käsitellään tässä työssä tarkasteltavan vaihdelaatikollisen vaaka-akselisen etutuulivoimalan komponentteja.

2.2 Komponentit ja niiden valmistus

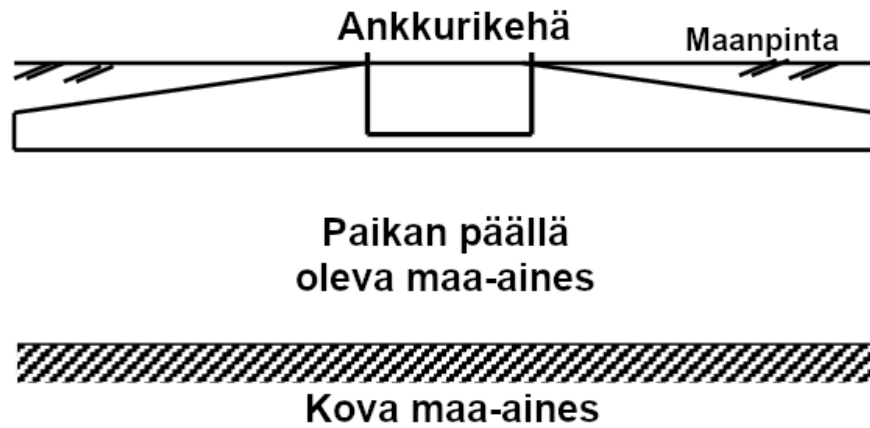
Tuulivoimalat koostuvat monista eri komponenteista. Pääosat ovat perustukset, torni, naselli, lavat, generaattori, sekä riippuen tuulivoimala tyypistä, vaihdelaatikko. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään tuulivoimaloiden pääkomponentit.

2.2.1 Perustukset

Perustuksien päätehtävä on jakaa tuulivoimalaan kohdistuvat vääntövoimat ja dynaamiset voimat maaperään, veteen tai merenpohjaan siten, että tuulivoimala pysyy mahdollisimman vakaana. Tuulivoimaloihin kohdistuu tuulen aiheuttamana vääntömomenttia sekä tuulivoimala itsessään aiheuttaa jo suuren pistemäisen paineen pystytysalustaan suuren massansa vuoksi. Esimerkiksi keskimäärin Suomeen pystytetyn tuuliturbiinin massa, pois lukien perustukset, on ollut noin 136 tonnia per megawatti sähkötehoa [2], [15]. Mikäli perustukset eivät ole tarpeeksi vahvat ja tukevat, tuulivoimalalla on riski sortua tai kaatua tuulenopeuden kasvaessa liian suureksi. Perustuksien tulee myös kestää tuotannosta syntyviä resonansseja. [16, s. 173], [17, s. 57]

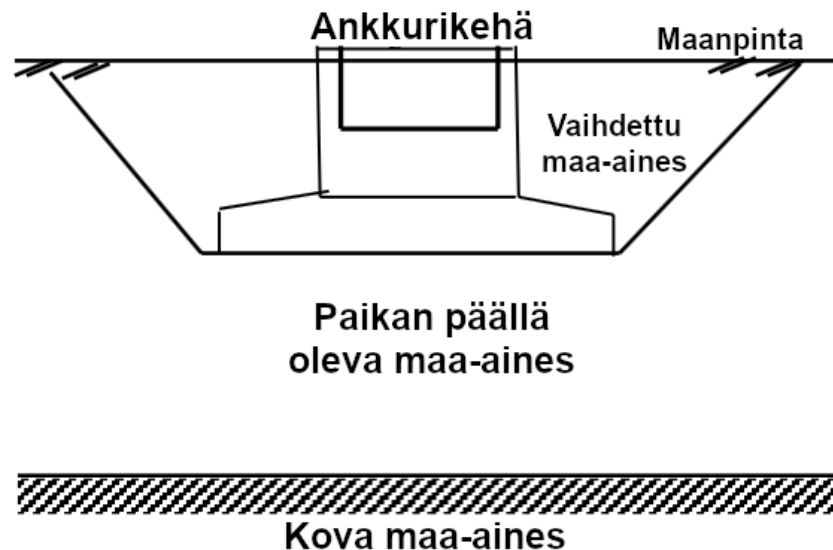
Maan päälle pystytetyn tuulivoimalan perustukset ovat lähtökohtaisesti aina valmistettu teräsvahvistetusta betonista. Maatuulivoimalan perustuksien toimintaperiaate perustuu siihen, että perustuksia ympäröivä maaperä on kykenevä ja tarpeeksi vahva vastaanottamaan tuulivoimalaan kohdistuvia voimia. [17, s. 26] Perustukset voidaan myös ankkuroida peruskallioon, mikäli peruskallio on tarpeeksi lähellä maanpintaa [18].

Maatuulivoimalan perustukset voidaan jakaa pääosin kahteen eri koulukuntaan, maanvaraisiin perustuksiin ja paalutusperustuksiin. Maanvaraisissa perustuksissa perustus rakennetaan maa-aineksen päälle, jolloin maaperän kantavuudella on suuri merkitys perustuksen kokoon. Maanvaraisia perustuksia voidaan rakentaa pääosin kahdella eri tavalla, pintaperustuksilla ja painovoimaperustuksilla. Pintaperustuksissa (Kuva 6) perustuksien kantavuus tulee sen leveydestä ja massasta. Kyseisessä tyylissä kaikkien tuulivoimalaan ja perustuksiin kohdistuvien voimien summa tulisi olla mahdollisimman lähellä perustuksen pohjaa ja sen keskipistettä, jotta tuulivoimala ei kaadu. Tämä voidaan saavuttaa rakentamalla paksu ja painava perustus. Pintaperustuksien etu on se, että maainesta ei tarvitse kaivaa ja vaihtaa pois merkittävästi. Pintaperustuksien ongelma on kuitenkin se, että maaperän kantavuus pitää olla juuri sopiva, jotta se kestää tuulivoimalan ja sen perustuksien suuren painon. [19]



Kuva 6. Pintaperustuksen poikkileikkaus [19].

Painovoimaperustuksissa (Kuva 7) perustukseen kohdistuva kuorma jakautuu paremmin ympäröivään maaperään verrattuna pintaperustukseen. Tämä johtuu siitä, että perustukset kaivetaan syvemmälle maaperään ja se ympäröidään suuremmalla määrällä maa-ainesta. Uudelleentäytön maa-aines voi olla aikaisemmin kaivettua tai vaihdettua maa-ainesta. Uudelleentäytön ideana on, että maa-aines painaa perustuksia maaperään ja täten lisää perustuksien vakautta. Painovoimaperustuksien etuna pintaperustuksiin on se, että vahvistettua betonia tarvitaan rakenteisiin merkittävästi vähemmän ja ne ovat stabiilimmat voimien suhteen. Haittapuolena taas on, että perustukset tarvitsevat enemmän kaivuu- ja täyttötoimintaa. [19]

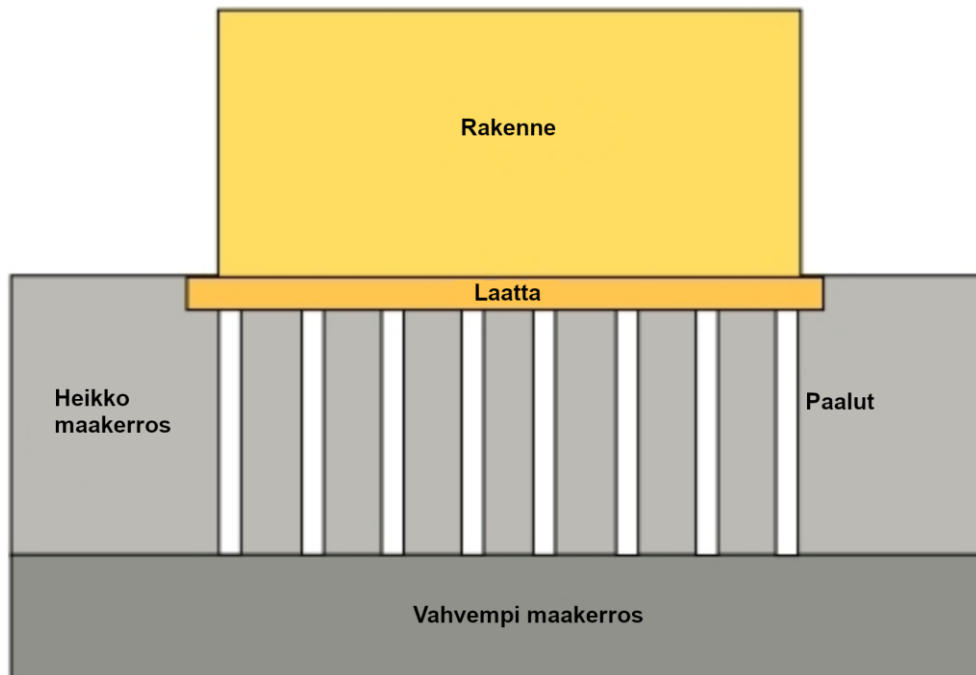


Kuva 7. Painovoimaperustuksen poikkileikkaus [19]

Maaperä ei ole aina suotuisa pinta- tai painovoimaperustuksia varten, jolloin tuulivoimalan perustukset pitää paaluttaa maaperään. Perustuksien paaluttamisen ideana on, että paalut jakavat perustuksiin kohdistuvat voimat tasaisesti heikkoon tai pehmeään maa-

perään siten, että tuulivoimala pysyy mahdollisimman vakaana. Tilanteen mukaan paalutus voidaan toteuttaa siten, että perustus kiinnitetään peruskallioon. Tällöin kuorma ohittaa heikon maaperän ja se jakautuu peruskallioon. Paaluperustukset voivat tulla myös tarpeeseen erityisen tuulisilla alueilla, kun pinta- tai painovoimaperustukset eivät ole kykeneviä jakamaan tuulivoimalaan kohdistuvia voimia tarpeeksi hyvin maaperään. Paaluperustukset ovat erittäin hyviä vastaanottamaan sivuttaisvoimia kovasta tuulesta. [19]

Paalutettu laattaperustus (Kuva 8) on maanvaraisista paalutusperustuksista yleisin muoto. Siinä on yhdistetty paalutus pintaperustuksen omaiseen laattaan, jolloin hyödytään molempien perustustyylien vahvuuksista. Laatta jakaa maaperän yläosiin osan tuulivoimalaan kohdistuvista voimista, kun suuremmat voimat jakautuvat syvemmälle maaperään paalutusryhmittymän myötä. [19] Kyseinen rakennustapa on erittäin suotuisa pehmeän ja heikon maaperän alueilla kuten suo- ja hiekkapohja-alueilla, joilla ei välttämättä ole kallioperää, johon kiinnittää perustuksia. Paalutettu laattaperustus ei ole hyvä tapa rakentaa kiinteän ja kovan maaperän alueilla, sillä paalutuksen toimivuuden perusta on paaluihin kohdistuvassa kitkavoimassa. Paalujen ja maaperän väliin jää kovan maaperän tapauksissa aukkoja, jotka vähentävät syntyvää kitkavoimaa ja täten perustuksien kantokyky heikkenee. Paalujen määrä sekä niiden pituus määritetään käyttäen tasaisen laskeuman ja paaluryhmän kapasiteetin laskentatapoja. Perustuksien mallinnukset toteutetaan yleensä käyttäen elementtimenetelmää. [19]



Kuva 8. Paalutetun laattaperustuksen rakenne [20].

Jos maaperän pehmeät kerrokset ovat ohuita tai puuttuvat kokonaan voidaan tuulivoimalan perustukset ankkuroida peruskallioon joko suoraan tai paalutuksen myötä. Ankkurointi toteutetaan poraamalla kallioon reikiä ja näihin reikiin asennetaan ankkurit tuulivoimalan perustusta varten. Paalutuksen tapauksessa pehmeämmän maaperän läpi paalutetaan samankaltainen perustus kuin paalutettu laattaperustus, mutta erona kyseeseen tapaan on se, että paalut asetetaan peruskallion päälle. Hyötynä tässä on se, että perustuksien laskeumaan vaikuttaa enää vain paalujen deformaatio paineen alaisuudessa. Kallioon asti paaluttamalla perustuksille tehdään yleensä oletus, että heikompaan maakerrokseen ei jaeta kuormaa ollenkaan. [19] Oletus ei pidä aina paikkaansa, mutta on samalla hyvä turvallisuuden kannalta, sillä useimmiten ympäröivä maa-aines kuitenkin vähäisesti tukee perustuksia.

2.2.2 Tornit

Tuulivoimalan tornin päätehtävä on tukea tuulivoimalan nasellia, roottoria ja muita komponentteja sekä olla tarpeeksi korkea, jotta roottori pystyy tehokkaasti hyödyntämään ilmavirtausta. Lähellä maanpintaa ilmavirtaukset voivat olla turbulenttisia, mikä voi aiheuttaa ongelmia lapojen kärjissä. Epätasaiset ilmavirtaukset voivat nostaa tuulivoimalan äänitasoa yli sallitun ja aiheuttaa lisääntyntä kuormitusta muun muassa resonoinnin vuoksi.

Tuulivoimaloiden tornit koostuvat pääosin joko täysin teräksisestä tai teräs- ja betoni hybridirakenteista. Tornit rakennetaan yleisesti putkimaisista teräselementeistä, joita kasataan päällekkäin yli 100 m korkeaksi rakenteeksi. Tuulivoimalan torni rakennetaan siten, että tornin alaosan halkaisija on suurempi kuin yläosan, eli torni kapenee mitä lähemmäksi nousee nasellia. Tornit voidaan rakentaa myös ristikkoteräsrakenteisena, mutta teollisuusluokan tuulivoimassa kyseistä menetelmää ei ole käytetty enää lähes ollenkaan. Ristikkotornit ovat huollon ja ylläpidon kannalta monimutkaisempia, sillä niissä on enemmän tarkastettavia komponentteja ja liitoskohtia verrattuna putkimaiseen teräselementtitorniin.

Hybriditorneissa osa tornista koostuu teräsvahvistetusta betonielementeistä ja loppuosa samanlaisista teräselementeistä kuten täysin teräksisessä tornissa. Hybriditornit ovat hieman huoltovapaampia ja kestävämpiä kuin terästornit [21], mutta niiden käyttösoveltuvuus Suomen olosuhteisiin on rajallinen. Tämän vuoksi suurin osa Suomeen pystytetyistä voimaloista ovat terästornisia [22]. Muissa valtioissa hybriditorneja käytetään enemmän, sillä vuotuinen lämpötilavaihtelu ei ole niin iso verrattuna Suomeen. Hybriditornit voivat olla logistisesti paikan mukaan edukkaampia verrattuna teräsputkitorneihin.

Riippuen paikallisista säännöksistä betoninen torni voidaan valata paikan päällä, mikä säästää merkittävästi kuljetuskustannuksissa.

Tuulivoimalan torni on tuulivoimalan painavin osa heti perustuksien jälkeen. Tämän vuoksi se on myös kallis komponentti, vaikka torni koostuu yksinkertaisista osista verrattuna esimerkiksi naselliin ja sen sisältämiin komponentteihin. Tornin osuus tuulivoimalan kokonaiskustannuksista on noin 15-20 % [23, s. 8], [24, s. 320]. Täten tornin suunnittelu tulee optimoida hyvin rakentamisen kustannuksien sekä rakenteellisen turvallisuuden ja toiminnallisuuden suhteen. Turvallisuus- ja toiminnallisuus-rajoitteita voivat olla muun muassa massajäykkyys-suhde, minimipaino tai minimi tärinä. Suunnittelun rajoiteparametrejä määriteltäessä on tärkeää tarkastella ääritilanteiden aiheuttamia kuormituksia kuten esimerkiksi suurinta pääjännitystä tai vaakasuuntaista liikettä tornin yläosassa. Tornin suunnittelun pääparametrit liittyvät kuitenkin vain tornin halkaisijaan, paksuuteen ja korkeuteen, sillä tornit ovat hyvin yksinkertaisia rakenteeltaan. [24, s. 320]

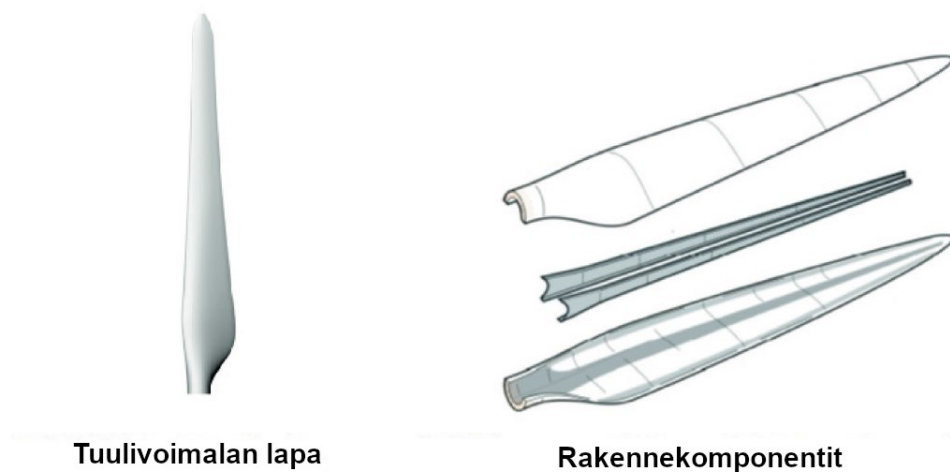
Tuulivoimalan tornin sisäinen suunnittelu ja varustelu ovat tärkeitä tekijöitä tuulivoimalan tehokkaassa ja turvallisessa operoinnissa. Putkitorneissa sijaitsevat sisäiset portaikot, tikapuut tai hissit mahdollistavat helpon ja turvallisen pääsyn naselliin. Putkimainen torni tarjoaa suojaa tuulelta, jolloin huolto- ja tarkastustoimenpiteet ovat merkittävästi turvallisempia verrattuna ristikkorakenteiseen torniin. Tornin sisällä kulkeutuu sähkö- ja viestintäkaapelit maanpinnalle, jossa sijaitsee yhteydet sähköverkkoon ja internettiin, jonka kautta tuulivoimalaa ohjataan tuulipuistoa operoivan yhtiön keskitetystä komentokeskuksesta. Torni sisältää myös erilaisia turvallisuusjärjestelmiä, kuten savun- ja palonilmaisimia ja sammutusjärjestelmiä sekä ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmiä. Ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmät ovat toiminnalle välttämättömiä järjestelmiä sillä, komponentit vaativat tietynlaiset olosuhteet optimaalista toimintaa varten. Esimerkiksi sähköistyskomponentit kuten muuntajat, invertterit ja generaattorit vaativat jäähdytysjärjestelmiä toimintaa varten. [25] Joissakin tuulivoimaloissa voi kulkea tornin sisällä huoltonosturi hissien lisäksi. Nosturia käytetään huoltotoimenpiteitä varten, joissa huoltotarvikkeita ei ole mahdollista kuljettaa käyttäen henkilöhissiä.

Tuulivoimaloiden tornimoduulien koko ja massa tekevät niiden kuljetuksesta ja asennuksesta monimutkaisen prosessin. Niiden pituus, leveys ja raskaus asettaa vaatimuksen, että komponenttien kuljetus joudutaan tekemään aina käyttäen erityiskuljetuksia. Kuljetukset vaativat huolellista suunnittelua ja erikoisvalmisteisten kuljetusvälineiden käyttöä. Reittisuunnittelussa tulee ottaa huomioon mahdolliset esteet ja reitin kestävyys. Esimerkiksi tiestöjä voidaan joutua uudistamaan tai levantämään sekä siltoja voidaan joutua vahvistamaan reitin varrella, jotta kuljetukset voidaan toteuttaa turvallisesti.

Asennuspaikka tulee tornin kappaleiden osalta valmistella hyvin. Valmistelut aloitetaan usein jo ennen perustuksien valamista, kun tuulivoimalan ympärille rakennetaan nosto-alue. Tornia varten voidaan toteuttaa nostoalueelle väliaikaissäilö, jotta kappaleet ovat valmiina, kun nosturi saadaan työmaalle tornin pystyttämistä varten.

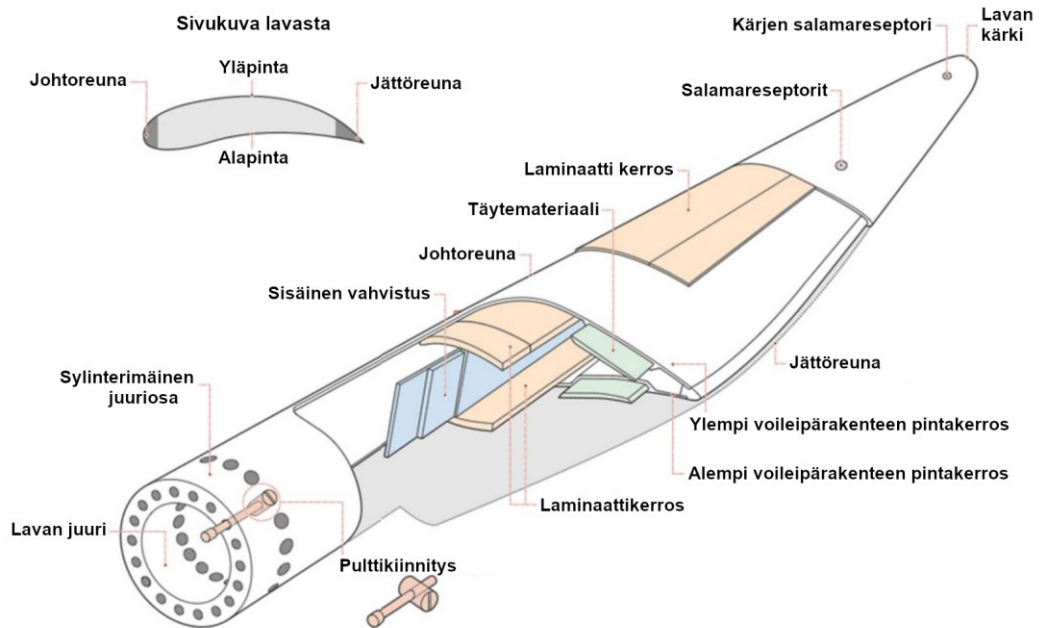
2.2.3 Lavat

Lapojen tehtävä on vastaanottaa tuulen liike-energiaa roottoria pyörittäväksi pyörimisenergiaksi pääakselille ja tästä eteenpäin käytössä olevan tekniikan mukaan vaihde-laatikkoon tai suoraan generaattorille. Tuulivoimaloiden lavat koostuvat komposiittimateriaaleista ja -rakenteista. Yleisimmät komposiittimateriaalit tuulivoimatuotannossa ovat lasi- ja hiilikuitulujitemuovit, jotka kattavat noin 80–90 % tuulivoimalan lavan painosta. Näissä komposiittimateriaaleissa kuidut toimivat materiaalin vahvikkeina. Kuituvahvikkeet kattavat komposiitissa noin 60–70 % kokonaispainosta. Loput 30–40 % koostuu hartsista, kuten esimerkiksi epoksista tai muista kertamuovipolymeereistä. [26, s. 166]



Kuva 9. Tuulivoimalan lapa ja sen rakennekomponentit. Komponenteissa havaittavissa kaksi aeroshell-kuorta ja kaksi tukipuuta. Muokattu lähteestä [27].

Tuulivoimalan lavan voileipämäinen rakenne alkaa yleisesti kahdesta pituussuuntaisesta lasi- tai hiilikuitukomposiitti puolikkaasta. Puolikkaat ovat muotoiltu aerodynaamiseksi, nostoa tuottavaksi elementeiksi, joita joskus kutsutaan aeroshell-kuoriksi. Puolikkaiden väliin tulee lapaa vahvistavat väli- ja sidosaineet. Väli- ja sidosaineina käytetään yleensä erilaisia polymeerivaahoja, liimoja sekä balsapuuta. Näin niin sanotulla voileipärakenteella (Kuva 10) saadaan erittäin kestävä lasi- tai hiilikuitukomposiitti tuulivoimalan lapa. [28]



Kuva 10. Tuulivoimalan lavan rakenne. Muokattu lähteestä [29].

Hartsin siirtoinfuusio on yleisin lapavalmistusmenetelmä. Prosessista on käytössä kaksi versiota, painehartsi-infuusio (RTM) ja tyhjiöhartsi-infuusio (VARTM). Painehartsi-infuusiossa hartsi syötetään paineistettuna nesteenä suljettuun muottiin, jossa on vahvistekuituja valmiiksi aseteltuna. Hartsin tyhjiöinfuusio toimii käytännössä käänteisesti paineinfuusioon. Siinä muotoon asetetut vahvistekuidut ovat tyhjiössä ja hartsi syötetään nesteenä muottionteloon, jolloin sen tyhjiö niin kuin ”vetää” hartsin muotin jokaiseen osaan. Muotin ja syötettävän hartsin paine-eron vuoksi kuivat vahvistekuidut kyllästyvät ja saadaan lopputuotteena erittäin kestävä komposiittimateriaali lämmitys ja kovettamisprosessin jälkeen. Hartsi-infuusio voidaan jakaa kuuteen päävaiheeseen: [30, s. 65]

Vaihe 1: valitaan sopiva kuituvahviste ja matriisihartsi.

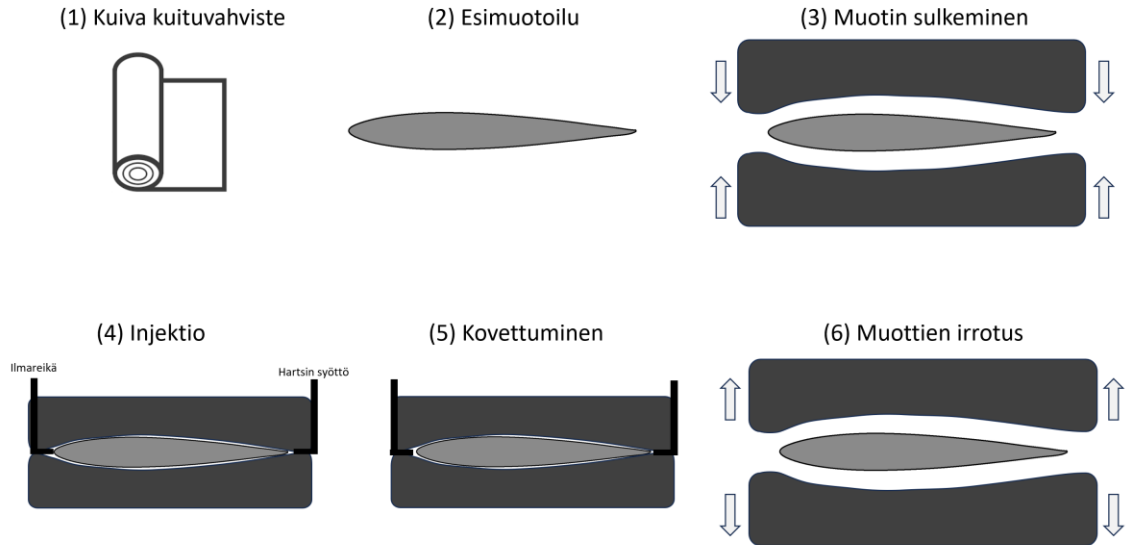
Vaihe 2: esimuotoillaan kuitukankaat haluttuun muotoon, suuntaan ja kerroksiin.

Vaihe 3: esimuotoillun kuitukomponentin asettaminen muottiin ja muotin sulkeminen.

Vaihe 4: hartsin injektointi muottiin ja lasikuidun kyllästäminen muotin täyttymiseen asti.

Vaihe 5: polymeroitumisprosessi, hartsin kuivuminen ja kovettuminen.

Vaihe 6: muotin avaaminen ja komposiittikappaleen irrottaminen muotista



Kuva 11. Yksinkertaistettu havainnekuva RTM valmistusmenetelmien prosessivaiheista.

Vaihe 4 on tärkein osa lapavalmistuksessa. Hartsin injektointi pitää toteutua hyvin, koska muuten komposiittiin voi jäädä epäpuhtauksia. Epäpuhtaudet heikentävät merkittävästi komponentin kestävyyttä ja ne voivat aiheuttaa ennenaikaisia laiterikkoja. Tuulivoimavalmistaja Siemens Gamesa on viime aikoina kärsinyt laatuongelmista lapojen suhteen. Valmistajan lavoissa on ilmennyt odottamatonta taipumista ja ryppyilyä minkä vuoksi yhtiö joutuu korjaamaan ja korvaamaan yli miljardin euron edestä tuulivoimalan komponentteja, kuten lapoja ja laakereita, asiakkailleen. Yhtiö ei ole ilmoittanut johtuvatko ilmenneet ongelmat valmistusmenetelmistä, materiaaleista vai suunnittelusta. [31], [32], [33]

Esikyllästystekniikka (myöhemmin prepreg-tekniikka) on omaksuttu ilmailu- ja lentokoneollisuudesta. Prepreg-valmistusmenetelmä perustuu puolivalmiin tuotteen käyttöön, jossa kuitukankaat on esikyllästetty hartsilla, jota ei ole vielä kovetettu. Huoneenlämmössä prepreg-kuitukankaiden hartsi on vielä tahmaista ja puolikiinteää, jolloin kuitukankaita voidaan asetella päällekkäin ja haluttuun muotoon laminaattirakenteen valmistamista varten. Käytetyt kuitu ja hartsiyhdistelmät vaikuttavat käytettäviin prosesseihin ja lämpötiloihin, jolloin prosessilämpötilat voivat vaihdella 70°C:sta aina 225°C:een asti. [34, s. 519]

Prepreg-kuitukangaskerroksien tiivistäminen toteutetaan käyttäen tyhjiön ja lämpötilan yhdistelmää. Kangaskerrokset päällystetään polymeerikalvolla, joka tiivistetään muotin seinää vasten. Muotin ja kalvon väliin luodaan tyhjiö, jolloin ilmakehän ilmanpaineen myötä prepreg-kuitukangaskerrokset painautuvat muotin seinämää vasten ja lapa saa muotonsa. [34, s. 519]

Prepreg-tekniikalla on joitakin etuja verrattuna hartsi-infuusio menetelmiin. Lavan valmistusprosessiin käytettävien materiaalien ominaisuuksia on helpompi hallita, suurempi kuitumäärä lisää ominaisjäykkyyttä ja -vahvuutta, eli lavoista voidaan tehdä kevyempiä. Valmistusprosessi on myös siistimpi, jolloin työympäristö on parempi ja terveellisempi sekä valmistusprosessia varten tarvitaan pienempi ilmanvaihtojärjestelmä. Prepreg-kuitukankaiden säilyvyys on kuitenkin heikkoa, muutamasta päivästä muutama viikkoon. Kuitukankaita pakkassäilyttämällä -18°C voidaan pidentää säilyvyyttä 6–12 kuukauteen, mutta tämä lisää huomattavasti materiaalikustannuksia. Mikäli prepreg-kuitukangas pilaantuu, eli hartsi kovettuu ennen aikaisesti tai valuu pois kuitukankaan väleistä, on materiaali käyttökelvoton valmistusprosessia varten. [34, s. 519]

Lasikuidun suosio tuulivoiman lapamateriaalina johtuu lasikuitukomposiitin monista suotuisista ominaisuuksista. Lapoihin kohdistuu muun muassa aerodynaamisia, painovoimallisia, sentrifugaalisia, gyroskooppisia ja toimintaan liittyviä kuormituksia. Lasikuitukomposiitissa yhdistyy korkea vetolujuus ja alhainen tiheys, jolloin materiaalilla on korkea paino-lujuussuhde. Tästä on erityisesti hyötyä tuulivoimalan koon kasvaessa. Yleinen oletus on ollut, että tuulivoimalan halkaisijan kasvaessa lapaan kohdistuvat paino- ja sentrifugaaliset voimat kasvavat kuutiollisesti. Nämä voimat ovat massariippuvaisia. Lasikuituvahvisteiset lujitemuovit vastustavat hyvin väsymystä ja korroosiota, sekä niillä on pienet sähkö- ja lämmönjohtuvuuskertoimet. [30, ss. 23, 57]

2.2.4 Naselli, napa ja sähköistyskomponentit

Tuulivoimalan nasellin eli konehuoneen sisällä on kaikki tärkeimmät sähkötekniset ja mekaaniset komponentit. Naselli sisältää muun muassa Yaw- ja pitch-järjestelmät, generaattorin ja tuulivoimalatyyppin mukaan, vaihteiston. Naselli sijaitsee tornin päällä ja sen tehtävänä on suojella komponentteja säältä. Naselli on kiinnitetty torniin laakerin välityksellä, joka mahdollistaa nasellin pyörimisen pysty akselin ympäri, jotta naselli ja roottori ovat aina kohdistettuna tuulta päin, kun tuotetaan sähköä tuulivoimalalla. [6, s. 25] Naselliin on vastaavasti laakereiden välityksellä kiinnitetty napa johon tuulivoimalan lavat kiinnitetään. Napa sisältää myös pitch-järjestelmän. Naselli ja napa koostuvat pääosin valuteräksestä ja lasikuidusta. Naselli kasataan useammasta valuteräslevystä, jotka leikataan sopivan kokoisiksi ja hitsataan yhteen. [4, ss. 96–97], [35, ss. 88–89]

Naselissa sijaitsee tuulivoimalan toiminnalle oleelliset sähkökomponentit kuten ohjausjärjestelmät, sähkö- ja tietokaapelit ja mahdolliset muuntajat. Yaw-järjestelmä kääntää tuulivoimalan nasellin ja roottorin kohtisuoraan tuulensuuntaisesti käyttäen sähkömootoreita. Pitch-järjestelmä taas optimoi tuulivoimalan lapojen nousukulman optimaaliseksi energiantuotantoa varten. Nousukulman avulla säädetään vaihteistoon ja generaattoriin

välittyvän vääntömomentin suuruutta. Liian tuulisissa olosuhteissa kulmaa säätämällä voidaan rajoittaa vääntömomentin suuruutta, jotta komponentit eivät yllirasitu eikä ylitetä tuulivoimalan luokiteltua tehokapasiteettia. Nousukulmalla voidaan säätää myös roottorin pyörimisnopeutta lähes pysähdyksiin asti. [24, s. 94] Näin voi joutua esimerkiksi tekemään tilanteissa, joissa sähköverkko ei ole kykenevä vastaanottamaan sähköä merkittävän ylituotannon vuoksi. Yaw- ja pitch-järjestelmät, sekä sähkö- ja tietokaapelit koostuvat metalleista kuten teräksestä, alumiinista, kuparista, sekä muoveista.

Tuulivoimalan tärkein komponentti eli generaattori on tuulivoimalan sähköä tuottava osa. Se koostuu pääosin teräksestä, valuteräksestä ja kuparista [4, s. 97] ja erilaisista kestopagneettimateriaaleista [28]. Generaattorin pyörivä osa eli roottori indusoi magneettikentän avulla staattorin käämityksiä ja induktion kautta syntyvä sähkövirta johdetaan muuntajien kautta sähköverkkoon. Roottorin magneettikenttä voidaan toteuttaa joko kestopagneetein tai sähkömagneetein. Käytetty magneettityyppi vaikuttaa siihen, että joudutaanko tuulivoimalalle toteuttaa reaktiivisen tehon hallintaa. Sähkömagneetteja käytettäessä tarvitaan reaktiivisen tehon hallintaa, sillä ne tarvitsevat sähköistä virittäytymistä ja täten kuluttavat reaktiivista tehoa. [28]

Merituulivoimassa kestopagneettigeneraattoreista on tullut suosituimpia vaihtoehtoja eri generaattorivaihtoehtoista. Kestopagneetit ovat luonteeltaan kestävämpi teknologia samalla vaatien vähempää huoltoa, mikä on erittäin tärkeää merituulivoimakäytössä. Lisäksi kestopagneetteja käyttämällä voidaan suoravetotuulivoimalan tapauksessa eliminoida vaihdelaatikko kokonaan, mikä vähentää huoltamisen tarvetta vielä lisää. [28]

Tuulivoimalan vaihdelaatikon tehtävänä on välittää suuremmalla kierrosnopeudella roottorilta välittyvä vääntömomentti generaattorille. Tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeus on useimmiten alle 20 kierrosta minuutissa, mikä tarkoittaa sitä, että vaihdelaatikon tulee nopeuttaa pyörimisliikettä 75–150 kertaisesti riippuen siitä käytetäänkö kaksi- vai nelinapaista generaattoria ja mihin sähköverkon taajuuteen tulee voimalan generaattori tahdistaa. Vaihdelaatikollisten tuulivoimaloiden tapauksessa generaattori on lähes aina tahdistettu verkkoon. [6, s. 41] Esimerkiksi Suomessa tuulivoimalat tahdistetaan 50 Hz taajuuteen, joka on valtakunnan sähköverkon taajuus. Vaihdelaatikot koostuvat pääosin erilaatuisista teräksistä ja rautamateriaaleista [4, s. 96]. Esimerkiksi vaihdelaatikon hammasrattaat käyttävät erilaatuista terästä verrattuna vaihdelaatikon koteloon, joka voi olla muun muassa valuterästä.

2.3 Tuulivoimalan käyttö ja purku

Tuulivoimaloiden suunniteltu käyttöikä on keskimäärin noin 20–25 vuotta [36]. Tällä hetkellä pystytettävien tuulivoimaloiden käyttöikä voi olla jopa yli 35 vuotta [37]. Käytön aikana tuulivoimalaa pitää huolta ja tuulivoimalaan voi myös ilmestyä odottamattomia vikaantumisia. Jensen (2018) toteaa tuulivoimaloiden kierrättämisestä koituvien ympäristövaikutusten tutkimuksessaan, että korjausten ja huollon kustannukset voivat olla yhteensä jopa 25 % tuulivoimalan LCOE:sta [36] (Levelized Cost Of Energy), kun taas NREL (National Renewal Energy Laboratory) toteaa, että käytön aikaiset kustannukset ovat noin 32 % LCOE:sta [38, s. 7]. LCOE kuvaa elinkaaren aikana tuotetun energian hintaa.

Tuulivoimaloille tulee käytön aikana toteuttaa ennakoivaa huoltoa. Ennakoivalla huollolla voidaan vähentää riskiä laiterikkoja kohtaan sekä mahdollisuuksien mukaan vähentää jopa huoltokuluja. Tuulivoimaloiden ohjausjärjestelmillä ja etädiagnostiikalla voidaan myös tarkkailla tuulivoimaloiden kuntoa laitteistojen sen salliessa. Kuntotarkastelua tuulivoimaloiden komponenttien väsymiseen voidaan toteuttaa ohjausjärjestelmistä saatavan datan perusteella tai tekemällä suoria kuntotarkastuksia tuulivoimaloihin säännöllisesti. Komponenttien kuntoa voidaan arvioida muun muassa elementtimenetelmällä tai tapahtuneiden syklien laskennan kautta. Väsymisen jatkuvalla tarkkailulla voidaan varmistua siitä, että tuulivoimala kestää koko suunnitellun elinikänsä ja mahdollisuuksien mukaan olla käytössä vielä jopa yli suunnitellun. Mitä pidempään tuulivoimala on käytössä, sitä enemmän sillä saadaan tuotettua energiaa ja tuloja, mutta tuulivoimalan käyttö- ja ylläpitokustannukset kasvavat. Pitkään käytössä olleella tuulivoimalalla voi olla merkittävä riskiä rakenteellisiin vaurioihin, sillä tuulivoimala on kokenut suuren määrän syklejä kuten roottorin kierroksia, tai lämpösyklejä. Rakeenteellisten riskien minimoiminen on erittäin kallista pitkäaikaisen käytön aikana väsyneille materiaaleille. [36]

Tuulivoimalan käytöllä sekä sen purkamisella on merkittävä työllistävä vaikutus. Ramboll Oy:n vuonna 2019 tekemän selvityksen mukaan vuoteen 2018 mennessä rakennetun tuulivoiman käytön työllistävä vaikutus oli jopa 40000 henkilötyövuotta, mikäli tuulivoimaloille oletetaan 20 vuoden käyttöikä. Samaisessa selvityksessä todettiin, että vuoteen 2018 mennessä pystytettyjen tuulivoimaloiden purkamisen työllistävä vaikutus olisi lähes 1300 henkilötyövuotta. Selvityksessä arviottiin myös työllisyysvaikutuksia vuoteen 2030 asti tilanteeseen, jossa Suomessa tuulivoimakapasiteetti on kasvanut 6000 MW. Tuulivoimaloiden käytöstä aiheutuva työllisyysvaikutus elinkaaren aikana oli uudessa tilanteessa arviolta 6300 suoraa ja 113000 välillistä henkilötyövuotta. Vastaavasti uudessa tilanteessa tuulivoimaloiden purun vaikutus olisi noin 100 suoraa ja 3800 välillistä henkilötyövuotta. [39]

Tuulivoimasta saadaan myös merkittävää yhteiskunnallista arvonlisäystä sekä verotuloja. Ramboll arvioi selvityksessään, että vuoteen 2018 mennessä rakennetun tuulivoiman arvonlisäys elinkaaren aikana on noin 5,7 miljardia euroa, josta suora arvonlisäys tuotetusta sähköstä olisi noin 3,4 miljardia euroa. Purkuvaiheesta arvioitiin muodostuvan arvonlisäystä noin 90 miljoonaa euroa. Mikäli vuoteen 2030 mennessä tuulivoimakapasiteetti kasvaa 6000 MW vuoden 2018 tasosta, arvonlisäys kansantalouteen arvioitiin kasvavan käyttövaiheessa jopa 28,8 miljardiin euroon ja purkuvaiheessa 320 miljoonaan euroon. [39]

Tuulivoimalan käyttöiän päätyttyä pitää tuulivoimala purkaa. Tämä johtuu Suomen lainsäädännöstä, mikä estää tuulivoimaloiden jättämisen paikalleen käyttöiän päätyttyä. Paikalleen jättäminen ei ole myöskään turvallisuuden kannalta suotavaa, sillä hylätystä tuulivoimalasta koituu merkittävä romahduksen riski. Jätelain (646/2011) 5§:n mukaan jätettä on aine tai esine, jonka sen haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä tai on velvollinen poistamaan käytöstä [40]. Mikäli tuulivoimala katsotaan esineeksi, pitää tuulivoimala käsitellä lain pohjalta jätteenä. Mikäli toisaalta tuulivoimala katsotaan rakennukseksi tai rakennelmaksi, kuuluvat ne maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) sekä tulevan rakentamislain (751/2023) lainalaisiksi. Rakennuslainsäädäntö edellyttää, että rakennuksien tulee täyttää terveellisyys-, turvallisuuden ja käyttökelpoisuuden vaatimukset, eikä niistä saa aiheutua ympäristöhaittaa. Mikäli tuulivoimala ei täytä vaatimuksia, voi viranomainen vaatia rakennuksen kunnostusta tai purkamista. Purkuun ja kierrätykseen liittyvää lainsäädäntöä käsitellään tarkemmin luvussa 3.3, sekä komponenttien kierrätys- ja loppusijoitusmenetelmiä luvuissa 3.1 ja 3.2.

2.4 Tuulivoiman sidosryhmät

Tuulivoimaan liittyy merkittävä määrä eri sidosryhmiä. Näitä ovat muun muassa tuulipuistojen omistajat, rahoittajat, hankekehittäjät ja operoijat, huoltopalvelujen tuottajat, asiakkaat eli sähkönostajat, laitevalmistajat, sähköverkon omistajat, kunnat, viranomaiset, maanomistajat ja lähialueiden asukkaat. Lisäksi tuulivoimahankkeissa hyödynnetään konsultteja, rakentajia ja käytön päättyessä jätehuoltoyrityksiä ja erilaisia kierrätyspalveluja.

Tuulivoimahankkeiden aikana on oleellista ylläpitää hyviä yhteiskuntasuhteita kunnan, viranomaisten, alueen asukkaiden ja maanomistajien suhteen, sillä suhteet vaikuttavat oleellisesti hankkeen toteutumiseen [41]. Tuulivoima-alalla yleinen käytäntö on ollut, että maa-alueet vuokrataan maanomistajalta. Maanvuokra voidaan maksaa kertakorvauksena tai vuosittaisena vuokrana. Se voidaan myös sitoa tuotetun energian määrään, tai kaikkien näiden yhdistelmään. [42]

Kunnilta ja viranomaisilta tulisi aina hankkeen alussa selvittää alueen kaavoitusilanne. Näin varmistetaan, että suunniteltua hankealuetta ei olla suojelemassa tai kunta ei ole suunnitellut alueelle muuta käyttöä. Vastuullisen hanketoimijan tulisi pitää maanomistajat ajan tasalla hankkeen kehityksestä ja vaiheista, minkä vuoksi hanketoimijan tulisi olla mahdollisimman hyvin tietoinen mahdollisista kaavoituksen rajoitteista. [42]

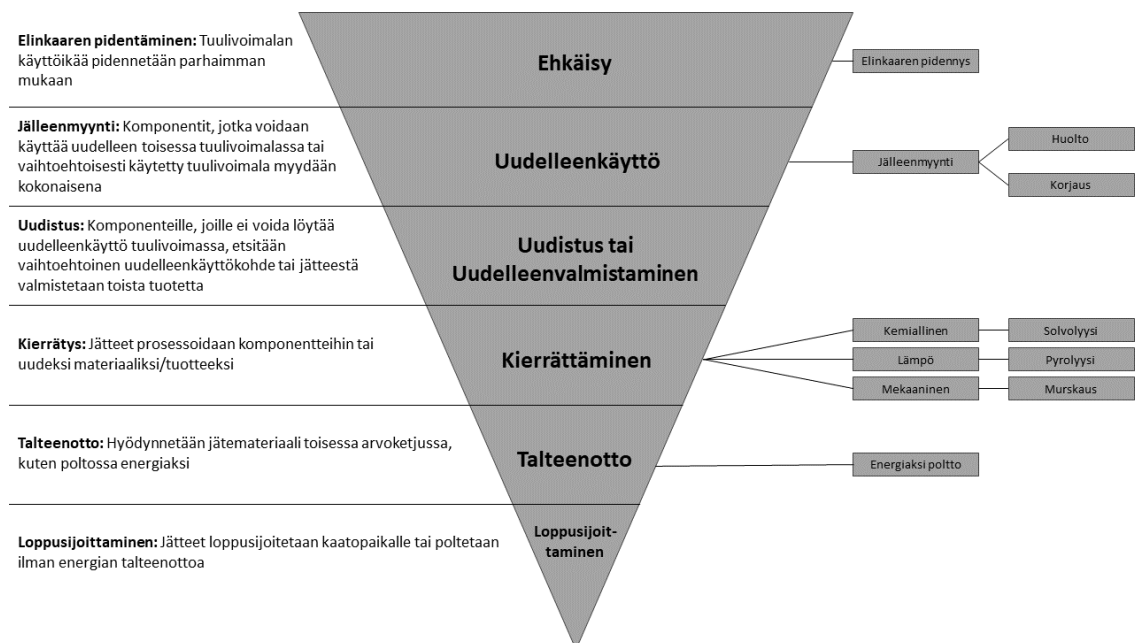
Tuulivoimaloiden rakentamisvaiheessa oleellisia sidosryhmiä ovat laitevalmistajat, rakennuttajat sekä rakentamisen suunnitteluun osallistuneet tahot. Alueille täytyy lähtökohdaisesti aina tehdä merkittävä määrä suunnittelutyötä esimerkiksi teihin, nostoalueisiin, muuntamoihin, perustuksiin ja kaapelointiin liittyen. Tuulipuiston rakennusvaiheessa voidaan myös joutua poistamaan puustoa tiealueen läheisyydestä komponenttien koon takia. [43] Alueen sähköverkonhaltijan kanssa tehdään hankkeen aikana verkkoliityntäsopimus. Liityntäjohdon sijainnin valinta ja siitä mahdollisesti tehtävät maanvuokrasopimukset tai korvaukset tulisi toteuttaa mahdollisimman vastuullisesti. Vastuullinen toimija voi esimerkiksi tarjota liityntäjohdon maa-alueiden maanomistajille samanlaista vuokrasopimusta kuin hankealueen muille maanomistajille.

3. TUULIVOIMALAN KIERRÄTTÄMINEN

Tuulivoimaloita pystytään kierrättämään nyky menetelmillä jopa 80–90 %:n kierrätysasteella. Haasteita kuitenkin aiheuttaa tuulivoiman lavat, sillä ne on valmistettu erittäin kestävästä komposiittimateriaaleista, useimmiten lasikuitulujitemuoveista. Tämän luvun tarkoituksena on kertoa tuulivoimalan komponenttien kierrätettävyydestä sekä kierrätys- ja loppusijoittamismenetelmistä hyötykäyttöön kelvottomille ja vaikeasti kierrätettäville tuulivoimalan jättejakeille. Lisäksi tässä luvussa toteutetaan kirjallisuuskatsaus tuulivoimalan purkuun ja kierrätykseen liittyvään lainsäädäntöön (luku 3.3). Lopuksi käsitellään miten elinkaarianalyseja toteutetaan sekä kerrotaan aikaisempien tutkimuksien tuloksia tuulivoimalan elinkaaren hiilijalanjälkeen (luku 3.4).

3.1 Tuulivoimalan komponenttien kierrätettävyys

Tuulivoimalat pystytään kokonaisuudessaan kierrättämään erittäin hyvin. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimalat koostuvat pääosin metallisista osista pois lukien perustukset ja lavat, jotka koostuvat betonista ja lasikuidusta. Esimerkiksi laitevalmistaja Vestas on ilmoittanut tuulivoimaloidensa olevan vähintään 85-prosenttisesti kierrätettävissä tai uudelleenkäytettävissä [44]. Tuulivoimalaa kierrätettäessä tulisi noudattaa niin kutsuttua jätehierarkiaa (Kuva 12), jossa aivan viimeinen jätteen prosessointitaso olisi loppusijoittaminen esimerkiksi kaatopaikalle.



Kuva 12. Tuulivoimalan jätehierarkia [45].

Koska tuulivoimalan torni ja nasellin runko koostuvat lähes täysin teräksestä, ovat ne helposti kierrätettävissä. Vestas on omissa tutkimuksissaan olettanut tornin ja nasellin teräsosien olevan jopa 98 % kierrätettävissä [4] ja AFRY Finlandin tuottamassa purkukustannusten arviointiraportissa teräksen ja raudan kierrätettävyyden arvioidaan olevan 80–100 % [46]. Tuulivoimaloissa käytetyt teräkset ovat yleisesti ottaen korkealaatuisia ja vähän seostettuja [4, s. 102], [35, s. 94], jolloin ne käyvät uuden teräksen valmistukseen. Suomessa Outokummun tehdas Torniossa on merkittävä kierrätysteräksen vastaanottaja, ja se tuottaa siitä korkealaatuista ruostumatonta terästä [47]. Tuulivoimalan teräsosien hyvästä kierrätettävyydestä kertoo myös, että laitevalmistaja Vestas käyttää teräsosiinsa noin 30 % kierrätysterästä [4, s. 72], [35, s. 66].

Niin kutsuttujen ”yleismetallien” eli muun muassa raudan, kuparin, alumiinin tai lyijyn kierrätys taso on yleensä yli 50 %. Reck & Graedel (2012) arvioivat katsauksessaan, että metallit ovat periaatteessa loputtomasti kierrätettävissä, mutta lopullinen kierrätysaste riippuu monesta eri tekijästä, kuten tuotesuunnittelusta, kierrätysteknologioista ja metallien termodynaamisesta erottumisesta. [48] Euroopassa esimerkiksi auto- ja rakentamisteollisuuden alumiinin kierrätysaste on yli 90 % ja alumiinisten juomatölkkiä jopa 76 % [49]. Uuden kuparin valmistuksessa Euroopassa taas noin 50 % raakamateriaalista on kierrätettyä kuparia [50]. Rautaa käytetään lähes kaikissa tuulivoimalan komponenteissa teräksen muodossa, kun taas kuparia ja alumiinia käytetään paljon sähköistyskomponenteissa, kuten generaattorissa ja kaapeloinnissa.

Tuulivoimalan perustukset voidaan kierrättää maarakentamisessa murskeena, loppusijoittaa kaatopaikalle tai jättää lain salliessa ne maisemoituna maaperään [46]. Koska perustukset ovat teräsbetonia, täytyy valmistettavasta betonimurskeesta/-pulverista erottaa rakenneteräs muuta kierrättämistä varten. Rakenneteräs voidaan kierrättää muun muassa samalla tavalla kuin tuulivoimalan muut metalliset osat. Oletuksena tosin on, että rakenneteräs erottuu riittävän hyvin betonista, jotta teräs on tarpeeksi hyvälaatuista uudelleensulattamista varten. Suomen Tuulivoimayhdistyksen julkaisemassa purkamiskustannusten raportissa betonin todetaan olevan 50–100-%:sesti kierrätettävissä [46]. Vestas on omissa elinkaaritutkimuksissaan tehnyt erilaisen tulkinnan betonin kierrätettävyydestä, ja todennut betonin loppusijoituspaikan olevan kaatopaikka [4, s. 129]. Perustuksissa on kuitenkin muitakin materiaaleja, kuten muoveja, alumiinia ja kuparia [4, s. 47]. Yleensä nämä materiaalit kuuluvat tuulivoimalan kaapelointiin.

Tuulivoimalan vaihdelaatikko ja generaattori ovat lähtökohtaisesti täysin metallisia ja täten ne voidaan kierrättää lähes täysin, joko uusiokäytössä tai sulattaa uudeksi tuotteeksi [4, s. 128]. Muut sähköistyskomponentit ja ohjausjärjestelmät sisältävät elektroniikkaa,

joten niiden kierrätettävyys ja uusiokäyttömahdollisuus voivat vaihdella komponentin mukaan. STY:n julkaisemassa raportissa todetaan elektroniikan kierrätettävyyden vaihtelevan Suomessa paljon. Elektroniikka voi olla raportin mukaan 0–86 %:sesti kierrätettävissä. Elektroniikkaa voidaan kierrättää murskaamalla ja erottamalla materiaalit omiin jakeisiinsa. Tämän jälkeen materiaalit voidaan kierrättää ja hyötykäyttöön kelpoton jae voidaan polttaa energiaksi tai loppusijoittaa kaatopaikalle. [46] Tuulivoimalan sähköistyskomponenteissa käytetään välillä rikkiheksafluoridikaasua (SF₆) sähköeristeenä, joka on Vestaksen mukaan hyvin kierrätettävissä, jopa 95 %:sesti, lopun osan päästessä ilmakehään [4, s. 129]. Rikkiheksafluoridi on vahva kasvihuonekaasu [51].

Tuulivoimaloissa käytetään myös käytön jälkeen hyötykäyttöön kelvottomia materiaaleja. Esimerkiksi voima- ja tietoliikennekaapeleiden muovipäällistyksille ei ole uusiokäyttömahdollisuuksia, mikäli kaapeleista erotetaan metallit uusiokäyttöä varten. Tuulivoimaloissa käytetään myös jäähdytysnesteitä ja voiteluaineita, jotka eivät välttämättä kelpaa uusiokäyttöön tai kierrätykseen. [4, s. 129], [46, s. 9] Useimmiten hyötykäyttöön kelpottomat materiaalit kannattaa polttaa energiaksi, mikäli paikalliset jätehuolto-yhtiöt ovat kykeneviä vastaanottamaan niitä.

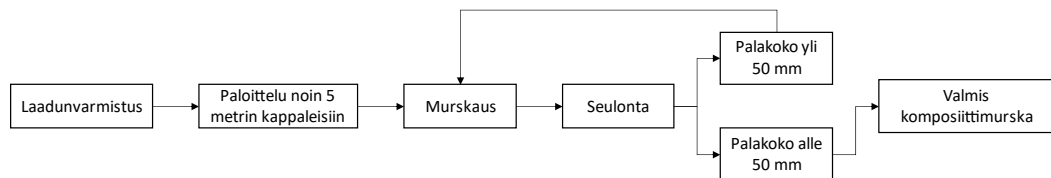
Lapojen kierrätettävyys on tällä hetkellä erittäin kiinnostava aihe ympäri maapallon. Lasikuitukomposiitit on luokiteltu pitkään joko ongelmallisiksi tai vaikeasti kierrätettäviksi materiaaleiksi, sillä lasikuitukomposiiteissa käytettävät hartsit ovat useimmiten kesto-muoveja, ja lasikuitu on suhteellisen matalan arvon tuote, mikäli kuitukankaita ei saada kokonaisina ja puhtaina erotettuna hartsista. Lasikuitukomposiittien kierrätettävyys vaihtelee sen mukaan minkälaista kierrätysmenetelmää tai uusiokäyttöpolkua käyttää. Kierrätysmenetelmistä kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2.

3.2 Kierrätys- ja loppusijoitusmenetelmät vaikeasti kierrätettävälle materiaaleille

3.2.1 Lapojen murskaus

Tuulivoimalan lapojen murskaaminen on tällä hetkellä teknisesti toteutettavin ja skaalattavin kierrätysmenetelmä. Suomessa lapojen murskaamiseen on toteutettu pilottihanke vuosien 2020–2022 välillä, jossa muovikomposiittijätteestä tehtiin hyötykäyttöön kelpaavaa materiaalia sementtiteollisuuden raaka-aineeksi. Toteutettu hanke oli nimeltään Ki-MuRa (Kierrätetty ja murskattu raaka-aine). Lavan rinnakkaisprosessointi sementtiteollisuudessa voitaisiin sijoittaa kuvassa 12 esitetyn jätehierarkian tasoille kierrättäminen – talteenotto.

Tuulivoimalan lapojen murskaaminen kierrätysmenetelmänä on suhteellisen halpaa. Lajoja murskaava Kuusakoski Oy on todennut kykenevänsä prosessoimaan tuulivoimalan lapoja noin 200–300 €/tonni porttimaksun hintaan [46]. Sementin ja muovikomposiittijätteen rinnakkaisprosessointia toteuttava Finnsementti Oy on todennut kykenevänsä vastaanottamaan 10000 tonnia vuodessa lapamursketta. Vastaanottokapasiteetin on arveltu riittävän pelkille tuulivoimaloiden lavoille 2050-luvulle asti. [46] Finnsementin rinnakkaisprosessointimenetelmässä komposiittimurska syötetään klinkkeriuunin kalsinaattoriin, jossa murska poltetaan. Poltosta sementin esiasteeseen, klinkkeriin, jää murskeen sisältämä lasikuitu, kun tuulivoimalan lavan palavat osat, eli hartsi, liima-aineet ja puumateriaalit hyödynnetään prosessin energiaksi. [52] Komposiittimurskan valmistusmenetelmä on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Kuusakoski Oy:n komposiittimurskaus [52].

Murskauskierrättämisen etu verrattuna muihin kierrätysmenetelmiin on se, että menetelmä on kykenevä vastaanottamaan hyvin erilaatuista ja kokoista komposiittijätettä [52]. Tuulivoimalan lapa voisi olla esimerkiksi käyttökelvoton kuitukankaiden rikkoutumisen vuoksi, jolloin lavan kemiallisesta kierrättämisestä ei ole hyötyä, sillä lavasta ei saada eriteltyä ehjää ja kokonaista kuitukangasta. Murskaamisesta saatu materiaali on kuitenkin matalan arvon hyödyke, jolla on suhteellisen rajalliset uusiokäyttömahdollisuudet [53]. Murskatusta lavasta ei voi valmistaa uudelleen uutta lapaa, sillä kuitujen ominaisuudet heikkenevät liian paljon [54]. Kierrätettyä materiaalia tulee siis käyttää toissijaisiin tarkoituksiin. Murskeesta voidaan esimerkiksi valmistaa eristysmateriaalia rakennuksiin tai kuten edellä on mainittu, hyödyntää mursketta raaka-aineena sementin valmistuksessa.

Lapojen murskaus on kierrätysmenetelmänä ollut Saksassa jo pidempään käytössä. Bremenissä toimiva Neocomp GmbH kykenee vastaanottamaan maksimissaan 80000 tonnia komposiittijätettä vuodessa [55] ja yhtiö on vuonna 2017 saanut GreenTec palkinnon innovatiivisesta työstään. Yhtiö tuottaa komposiittijätteestä lisäainetta sementin valmistukseen lisäämällä valmistettuun komposiittimurskeeseen kierrätyspaperin jäännösaineita. Syntynyt seos rakeistetaan ja valmiista raaseksesta saadaan hyötykelpoista lisäainetta. [56]

3.2.2 Lapojen kemiallinen kierrättäminen

Toinen tämän hetken tärkeimmistä ja suurinta kiinnostusta herättävistä lapojen kierrättämismenetelmistä on niiden kemiallinen kierrättäminen. Menetelmä on erittäin lupaava, sillä parhaimmillaan lavasta voidaan eritellä lasikuitukankaat ja hartsi erilleen sekä uusiokäyttää erotellut materiaalit uudestaan uusien lapojen valmistuksessa. Lapojen kemiallinen kierrättäminen on tällä hetkellä toisaalta vasta laboratorio vaiheessa ja suuremman mittaluokan kierrättämistä ei ole toteutettu kuten lapojen murskaamisen osalta on jo tehty. Lavan kemiallinen kierrättäminen voitaisiin sijoittaa kuvassa 12 esitetyn jätehierarkian tasoille uudistus/uudelleenvalmistaminen – kierrättäminen.

Cousins et al. (2019) toteuttivat kokeellisen tuulivoimalan lapaosan liuottamisen, jossa kloroformia hyödyntämällä liuotettiin polymeerihartsi ja eroteltiin lasikuitukankaat komposiitista. Polymeerihartsi erotettiin vielä jälkikäteen kloroformiseoksesta hyödyntämällä metanolia, joka toimi tutkimuksessa saostaja-aineena. Tämän jälkeen saostettua hartsia kuivattiin 24 tuntia foliolevyllä ja 12 tuntia lämmitetyssä tyhjiössä. Tutkimuksessa päästiin 91 %:n talteenottoon komposiitin alkuperäisestä massasta. [57] Mikäli lasikuitukomposiittien kemiallisella kierrättämisellä saadaan niin hyvälaatuisia lasikuitukankaita eroteltua, että niitä voidaan käyttää uusien lapojen valmistamiseen, merkitsee se sitä, että uusien lapojen valmistamiseen kuluu merkittävästi vähemmän energiaa ja resursseja. Lasikuitukomposiittien valmistamiseen kuluu noin 13–130,1 MJ/kg energiaa [54] ja yhden lavan valmistuksesta voi koitua jopa 111,6 tonnia hiilidioksidipäästöjä [58].

Kemiallisen kierrättämisen ongelmana on erilaisten resurssien suuri käyttö. Lisäksi käytetyt kemikaalit voivat olla ympäristölle myrkyllisiä, eli kemikaalien käyttö tulee toteuttaa turvallisesti ympäristön sekä henkilöiden kannalta. Kemikaalit voivat olla esimerkiksi ihoa syövyttäviä, välittömästi myrkyllisiä tai henkeä ärsyttäviä. Cousins et al. (2019) tekemässä kokeellisessa tutkimuksessa todettiin, että yhtä lapakomposiittikiloa kohden täytyy kuluttaa noin 6,45 kg kloroformia ja 6,86 kg metanolia. Lisäksi hartsin liuottaminen vaatii energiaa 17,9 MJ/kg_{resiniä} [57]. Lapojen kemiallisen kierrättämisen energiantarpeeseen on kirjallisuudessa eriävää näkemystä. Rani et al. (2021) toteavat, että kemiallisen kierrätyksen energiantarve vaihtelee välillä 63–91 MJ/kg [54]. Ucar Sokoli (2016) toteaa väitöskirjassaan, että solvolyyysiä hyödyntämällä lasikuitukomposiitin kierrätysprosessi kuluttaa energiaa noin 23,4 MJ/kg_{komposiittia}. Ucar Sokoli ei tutkinut väitöskirjassaan käytettyjen kemikaalien energiantarvetta, mutta tutkimuksessa käytetty asetonin tuottaa lavan hartseista öljyä, jota voidaan polttaa energiaksi. Tutkimuksessa todetaan myös, että prosessia skaalaamalla kierrätysprosessista voitaisiin jopa saada energiaposiitivinen, mikäli komposiitin ja asetonin konversiolla saadaan tuotettua hyvin öljyä. [59]

Tuulivoimalaitevalmistaja Vestas on ollut mukana CETEC-hankkeessa (Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites). Hankkeessa on ollut osallisena Vestaksen lisäksi Aarhusin yliopisto, Tanskan teknologinen instituutti sekä epoksin valmistaja Olin. Hankkeessa on pyritty siihen, että jo käytössä olevat tuulivoimaloiden lavat pystytään kierrättämään kemiallisesti siten, että niistä saadaan neitseellisen laatuista raaka-aineita talteen. Talteen otetuista raaka-aineista on tarkoitus saada uusiokäyttökelpoisia uusien tuulivoimaloiden lapojen valmistamiseen. Hankkeesta on saatu hyviä tuloksia, mutta menetelmä ei ole vielä täysin valmis kaupalliseen toteutukseen. Vestas on kuitenkin sitoutunut saamaan kierrätysmenetelmän laajempaan käyttöön. [60]

3.2.3 Poltto

Lasikuitukomposiittimateriaalien polttaminen energiaksi on hyvin yleinen tapa käsitellä komposiittijätettä. Käytännön tasolla lapojen rinnakkaisprosessointi sementtiteollisuudessa on energiaksi polttamista, mutta polttoprosessissa on eroja. Rinnakkaisprosessoinnissa poltosta syntyvä tuhka ja lasikuitujäämät sitoutuvat tuotettuun klinkkeriin [52], kun taas lasikuitukomposiittia poltettaessa suoraan energiaksi esimerkiksi jätteenpolttolaitoksilla syntyy tuhkaa, joka täytyy loppusijoittaa erikseen esimerkiksi kaatopaikalle. Suomessa jätteenpolttolaitokset ovat kykeneviä polttamaan lasikuitukomposiittia yhdyskuntajätteen seassa, mikäli lasikuitukomposiittien palakoko on riittävän pieni [61], [62].

Leijupetipoltolla on mahdollista ottaa talteen tuulivoimalan lavasta lasikuitua, mutta polton aikana lasikuidun ominaisuudet heikkenevät merkittävästi. Pickering et al. (2000) ovat aikaisemmin tutkineet lasikuitukomposiittien leijupetipoltoa ja he totesivat, että polton jälkeen pystyttiin saamaan talteen 5 mm pitkiä kuituja, joiden puhtaus oli jopa 80 % käyttämällä seulaseparaattoria. Kuitujen vetolujuus toisaalta heikkeni polton aikana jopa 50 %, mikä tarkoittaisi sitä, että talteen otettuja kuituja ei voisi käyttää vaativissa applikaatioissa, kuten tuulivoimaloiden lavoissa. Tutkimuksessa todetaan, että lavat täytyisi lisäksi murskata 5 mm raekokoon ennen leijupetipoltoon syöttämistä. Tämä tarkoittaisi sitä, että lavat täytyisi murskata käyttäen jopa tehokkaampaa murskaustapaa mitä on esitetty luvussa 3.2.1 ja kuvassa 13. Mikäli leijupetipoltolla halutaan ottaa talteen lasikuitua, täytyisi poltto tehdä pelkille kuitukomposiiteille, mikä tarkoittaisi sitä, että kattilassa ei saisi polttaa muita yhdyskuntajätteitä. Laitos täytyisi siis rakentaa pelkälle lasikuitukomposiittien kierrätykselle ja loppusijoitukselle, mikä ei välttämättä ole kannattavaa.

Tuulivoimalan lapoja voidaan kierrättää myös pyrolyysin ja kaasutuksen kautta. Tarpeeksi korkeassa lämpötilassa lapojen sisältämät polymeerit pyrolysoituvat palaviksi nesteiksi ja kaasuiksi, joita voidaan hyväksikäyttää energiantuotannossa. Syöttämällä

lasikuitukomposiittia 500 °C hapettomaan uuniin komposiitin hartsi pyrolysoituu synteesikaasuksi. Synteesikaasua polttamalla voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä pyrolyysiprosessia varten. Pyrolyysiprosessin jälkeen jäljelle jääneet lasikuidut voidaan puhdistaa ja kierrättää uusiksi materiaaleiksi matalamman tason applikaatioita varten. Polttamisen tapaan pyrolyysiprosessissa lasikuidun ominaisuudet heikkenevät. [63]

3.2.4 Kaatopaikkajäte

Suomessa lujitemuoveja ei saa loppusijoittaa kaatopaikoille. Valtioneuvoston asetuksessa 331/2013 säännös 28 § estää tuulivoimaloiden lapojen loppusijoittamisen kaatopaikoille. Asetuksessa on vaadittu, että kaatopaikalle loppusijoitettavasta vaarattomasta jätteestä, jonka biohajoavan ja muun orgaanisen aineksen pitoisuus määritettynä orgaanisen hiilen kokonaismääränä tai hehikutushäviönä on enintään 10 %. Koska tuulivoimalan lavoissa käytetyt hartsit ovat polymeerejä ja niiden massa on lähes puolet lavan kokonaismassasta [57], ei tuulivoimalan lapoja saa suoraan loppusijoittaa kaatopaikalle. [62], [64]

Yhdysvalloissa tuulivoimalan lapojen loppusijoittaminen on vielä yleinen käytäntö. Vuonna 2019 Casper:n kaatopaikka Wyomingin osavaltiossa vastaanotti noin 1500 tuulivoimalan lapaa kaatopaikkaloppusijoittamista varten [65], [66]. Loppusijoittamisesta jaettiin videoita laajasti sosiaalisessa mediassa, mikä nostatti vihreää siirtymää kohtaan haittapuolista keskustelua. Yhdysvallat on toisaalta suuri valtio pinta-alaltaan, minkä vuoksi kaatopaikkoja on merkittävästi helpompaa sijoittaa syrjäseuduille. Cooperman et al. (2021) tutkimuksessa todettiin, että Yhdysvalloissa vuoteen 2050 mennessä kumulatiivinen jäte kattaisi vain 1 % jäljellä olevasta kaatopaikkatilavuudesta tai 0,2 % jäljellä olevalta massaltaan [67]. Euroopassa monet tuulivoima-alalla toimivat yhtiöt ovat sitoutuneet kaatopaikkaloppusijoittamiskieltoon ja tuulivoimaloiden kierrättämiseen. Esimerkiksi energiantuotantoyhtiö Vattenfall [68] ja laitevalmistaja Vestas ovat sitoutuneet kierrättämään tuulivoimaloiden lavat 100-prosenttisesti vuoteen 2030 mennessä. Vestas on myös sitoutunut tuottamaan nollajätteen tuulivoimaloita vuoteen 2040 mennessä. [69]

3.3 Purkuun ja kierrätykseen liittyvä lainsäädäntö

Tuulivoimaloiden purkaminen ja kierrätys ovat monimutkaisia prosesseja, jotka edellyttävät huolellista suunnittelua ja lainsäädännön noudattamista. Ympäristöministeriön marraskuussa 2023 julkaiseman Hannes Snellman Oy:n selvityksen mukaan tuulivoimaloiden purkamiselle ei ole erityistä lainsäädäntöä, mutta prosessiin vaikuttavat rakentamisen, ympäristönsuojelun ja jätehuollon lait [70]. Selvityksessä ehdotetaan tuulivoima-

toiminnan sääntelyyn muutoksia, kuten purkamisvelvoitteiden ja purkuvakuuksien sisällyttämistä rakennuslupien tai kaavoitus sopimuksien ehdoiksi, jotta varmistetaan tuulivoimaloiden vastuullinen purkaminen käytön päätyttyä.

Rakentamisen osalta tuulivoimalat luokitellaan rakennuksiksi, jotka vaativat rakennusluvan. Maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999) sekä 1.1.2025 voimaantulevassa rakentamislaisissa (751/2023) rakennuksen kunnossapitovelvollisuus säädös edellyttää, että rakennus ja sen ympäristö pidetään kunnossa. Maankäyttö- ja rakennuslakien mukaan tuulivoimalan maakaapelit ja perustukset voidaan jättää maisemoituna paikalleen, jos ne eivät aiheuta turvallisuusriskiä tai ympäristöhaittaa. Tuulivoimatoiminnan päättyessä purkajan tulee hakea purkamislupaa, ja purkamisen yhteydessä tulee huolehtia syntyvän rakennusjätteen huolellisesta käsittelystä. Purkamislupaa haettaessa pitää purkajan tuoda ilmi, että miten purku toteutetaan sekä miten syntyvä jäte käsitellään. Uuteen rakentamislakiin on täsmennetty purkamisluvan ehtoja, joiden mukaan purkaminen ei saa aiheuttaa haittaa kaavoitukselle tai ympäristölle. [70]

Maanvuokrasopimusten osalta vuokralainen on velvollinen siirtämään tuulivoimalan pois kiinteistöltä ja kunnostamaan paikan vuokrasuhteen päätyttyä. Selvityksen mukaan monissa vuokrasopimuksissa on määritelty purkuvakuudet, joiden tarkoitus on kattaa tuulivoimalan purkukustannukset käytön päättyessä. Purkuvakuudet voivat olla merkittävä turva kiinteistön omistajalle, mikäli tuulivoimayhtiö ei syystä tai toisesta kykene suorittamaan purkutoimenpiteitä. Vakuudet eivät kuitenkaan ole nyky-lainsäädännössä pakollisia, vaan tuulivoimayhtiöt toteuttavat niitä omavalintaisesti. [70]

Jätelain (646/2011) mukaan jätteen, kuten käytöstä poistetun tuulivoimalan, haltijalla on vastuu jätteen asianmukaisesta käsittelystä. Maisemoidut perustukset, jotka ovat maaperään pysyvästi yhteydessä, voidaan katsoa rakennuksen osiksi, mutta niiden ympäristövaikutuksia tulee arvioida samoin kuin muita rakenteita. Jätelain mukaan jätehuollon järjestäminen on ensisijaisesti jätteen haltijan vastuulla. [70]

Selvitys korostaa, että purkamisprosessissa tulee ottaa huomioon sekä lainsäädännölliset velvoitteet että ympäristön suojeleminen. Ehdotetut muutokset, kuten purkamisvelvoitteiden ja vakuuksien lisääminen Suomen lainsäädäntöön, perustuvat muiden maiden lainsäädäntöön ja tähtäävät siihen, että tuulivoimaloiden purkaminen tapahtuisi ympäristön sekä yhteiskunnan kannalta kestäväällä tavalla. [70]

3.4 Elinkaariarvioinnin toteuttaminen ja hiilijalanjäljen määrittäminen

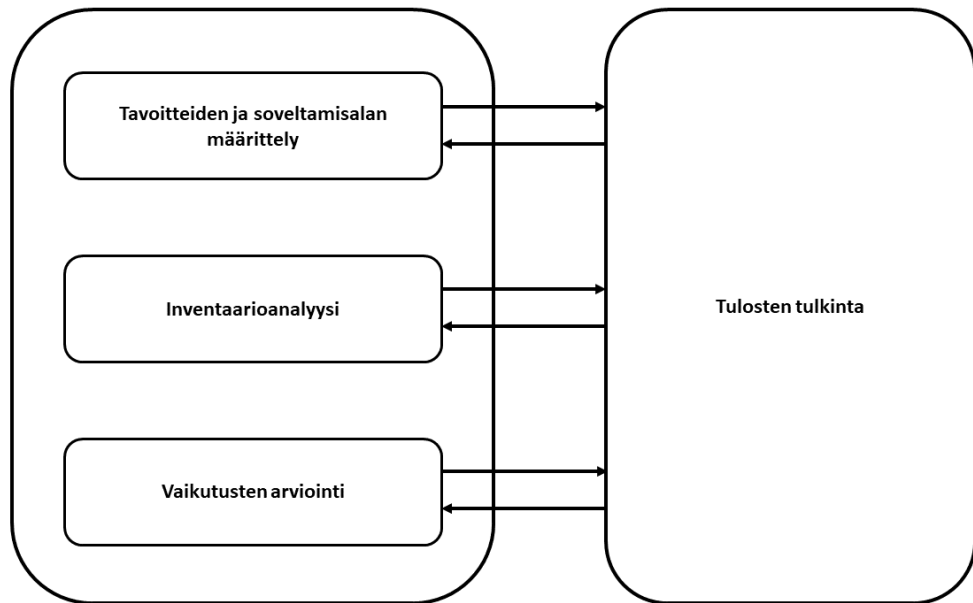
Elinkaariarviointi (myöhemmin LCA, lyhenne Life Cycle Assessment) on kattava menetelmä tuotteiden, palveluiden ja kokonaisuuksien ympäristövaikutusten arvioimiseksi niiden koko elinkaaren ajalta, raaka-aineiden hankinnasta aina tuotteen tai palvelun kierrätykseen tai hävittämiseen asti. LCA auttaa määrittämään muun muassa tuotteen, palvelun tai kokonaisuuden kasvihuonekaasupäästöt, energiankulutuksen sekä veden ja materiaalien käytön. Nämä selvittämällä organisaatiot tai yksittäiset henkilöt voivat ympäristön kannalta kehittää tuotteitaan ja käytäntöjään paremmaksi koko elinkaaren näkökulmasta. LCA:ta voidaan käyttää myös uusien tuotteiden kehityksessä. Yleensä LCA:ta käytetään vertailemaan tuotteita, prosesseja tai systeimejä keskenään sekä myös tietyn tuotteen eri elinkaarivaiheita. [71]

3.4.1 Toteuttamisvaiheet

LCA:n toteuttaminen pohjautuu kansainvälisen standardisointijärjestö ISO:n (International Organization for Standardization) sekä SETAC:n (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) standardeihin ja ohjenuoriin. LCA:n kannalta oleellimmat ISO-standardit kuuluvat ISO 14000-standardisarjaan. Tärkeimmät standardit sarjassa LCA:n kannalta ovat ISO 14040, 14044 ja 14067. [71, s. 4] Standardien ja ohjenuorien mukaan LCA:n toteuttaminen sisältää neljä vaihetta, jotka ovat [71, ss. 7–9]:

1. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely.
2. Inventaarioanalyysi.
3. Vaikutusten arviointi.
4. Tulosten tulkinta.

Jokainen vaihe kytkeytyy toisiinsa ja vaiheiden vaikutuksia toisiinsa tulee jatkuvasti tarkastella. LCA-prosessi on iteratiivinen (Kuva 14).



Kuva 14. LCA:n neljä iteratiivista vaihetta. [71, s. 8]

LCA:n toteuttamisen ensimmäinen vaihe on tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely. Siinä tarkasteltava ongelma tai asia esitetään ja tutkittavan kohteen laajuus määritetään. Tässä vaiheessa määritetään LCA:n kannalta tärkeimmät elementit: järjestelmän toiminto; toiminnallinen yksikkö, mihin päästöt ja otteet perustuvat; sekä tutkittavan järjestelmän rajat. Verrattaviin perusskenaarioon sekä mahdolliset vaihtoehtoiset ratkaisut kuvataan yksityiskohtaisesti myös tässä vaiheessa. [71, s. 7]

Toinen vaihe LCA:n toteuttamisessa on inventaarioanalyysi. Tässä vaiheessa päästöt ilmaan, veteen ja maaperään kvantifioidaan sekä määritetään uusiutuvien ja uusiutumattomien raaka-aineiden käyttömäärät. Toisin sanoen, tässä vaiheessa määritellään tutkittavan kohteen resurssien käyttö koko systeemin toimintoon nähden yhdeksi isoksi kokonaisuudeksi. [71, s. 7]

Kolmas vaihe LCA:ssa on vaikutusten arviointi. Tässä vaiheessa arvioidaan inventaarioanalyysissä määriteltyjen päästöjen ja resurssien kulutuksien vaikutuksia ympäristöön. Vaikutusten arviointi aloitetaan vaikutusluokkien, luokkaindikaattoreiden ja karakterisointimallien vallinnoilla. Tämän jälkeen päästöt luokitellaan jokaiseen ympäristövaikutuskategoriaan. Ympäristövaikutuskategoriat voivat olla esimerkiksi ilmastonmuutos, ihmisille toksisuus, ympäristötoksisuus tai resurssien käyttö. Luokittelun jälkeen toteutetaan keskipistekarakterisointi, joka painottaa ja yhdistää päästöt keskipistevaikutusluokkiin. Keskipistekarakterisoinnin jälkeen toteutetaan vahinkokarakterisointi, joka ryhmittää vaikutuskategoriat vahinkokategorioihin. Näitä voivat olla muun muassa vahingot ihmisen terveydelle, ekosysteemin laadulle tai resursseille. Kaikkien edeltävien vaiheiden jälkeen

voidaan suorittaa normalisointivaihe, joka näyttää tutkimuksen kohteena olevan järjestelmän tai tuotteen vaikutusten osuuden globaalista vaikutuksista tietyssä vaikutuskategoriassa. Viimeisenä vaiheena vaikutusten arvioinnissa toteutetaan yhteiskunnalle tärkeimpien indikaattoreiden, kategorioiden tai tuloksien painotus keskipistevaikutusten pohjalta. [71, s. 8]

Tuloksien tulkintavaiheessa LCA:n aikaisia tuloksia tulkitaan ja epävarmuuksia arvioidaan. Tuloksien tulkinta on jatkuvaa koko LCA:n ajalta, eli tulkintaa tulisi toteuttaa jokaisessa vaiheessa ja jokaisen välituloksen kohdalla. Jatkuvalle tarkastelulle voidaan havaita LCA:n kannalta keskeisiä parametrejä ja parannusvaihtoehtoja hyödyntämällä esimerkiksi herkkyysanalyysia. Lisäksi voidaan hyödyntää kriittistä arviointia valittuihin systeemin rajoihin ja oletuksiin. Kriittistä arviointia toteuttamalla voidaan todistaa systeemin rajat ja oletukset oikeelliseksi. Mikäli niitä ei todeta käyviksi, voidaan laajentaa tai pienentää systeemin rajoja sekä oletuksia, jotta saatavat tulokset ovat realistisia. Tuloksien tulkinnan lopullisena päävaiheena on tuoda esille tutkitun systeemin ympäristövaikutukset verrattuna tutkitun systeemin taloudellisiin ja sosiaalisiin vaikutuksiin. [71, s. 8]

LCA olisi hyvä toteuttaa kaksivaiheisena sen iteratiivisen prosessin vuoksi. LCA olisi hyvä aloittaa alustavalla arvioinnilla tai seulonnalla, jonka tarkoituksena on saada yksinkertaisia tuloksia systeemin jokaisen elinkaarivaiheen vaikutusosuuksista. Tässä vaiheessa olisi myös hyvä toteuttaa alustava herkkyysanalyysi. Herkkyysanalyysi antaa viitteen systeemin avainprosesseista ja -vaikutuksista, jolloin voidaan keskittyä näihin tarkemmin, eikä kuluteta aikaa muihin näkökulmiin, joilla on merkityksetön kokonaisvaikutus elinkaaren kannalta. Toisessa LCA:n iteratiivisen prosessin vaiheessa toteutetaan yksityiskohtaisempi analyysi toistamalla aikaisemmin mainitut LCA:n vaiheet 1–3 tarkemmin. Alustavan arvioinnin ja seulonnan pohjalta valitaan ensisijaisesti tutkittavat systeemin prosessit, vaiheet sekä päästöt, joilla on suurimmat ympäristövaikutukset. [71, s. 9]

LCA:n mallinnustyökaluissa hyödynnetään erilaisia allokointimenetelmiä. Nämä menetelmät jakavat tutkivan systeemin sisään- tai ulostulovirrat tutkitun systeemin ja muiden systeemien välille [72]. Ecoinvent-elinkaari-inventaariotietokanta on yksi laajimmista LCA:ssa käytettävistä inventaariotietokannoista. Kyseisen tietokannan data on erittäin korkealaatuista ja yleiskäytännöllistä. Ecoinvent-tietokannassa käytetään ”Cut-off”, ”Consequential” ja ”APOS (Allocation at the point of substitution)” allokointimenetelmiä ja lähestymistapoja elinkaarimallinnukseen [71, s. 70]

Cut-off -menetelmässä systeemin tai tuotteen alkutuottajalle ei anneta hyvitystä kierrätyskelpoisten materiaalien käytöstä. Tämän myötä kierrätettävät materiaalit ovat käytävissä ilman lisäkuormitusta kierrätysprosesseille, ja sekundaariset kierrätysmateriaalit kantavat vain kierrätysprosesseista koituvat vaikutukset. Jolliet et al. (2015) kirjassa "Environmental Life Cycle Assessment" suositellaan käyttämään Cut-off -menetelmää mikäli LCA:n toteuttaa käyttämällä Ecoinvent-tietokantaa. [71, s. 70] Myös kansainvälinen EPD-järjestelmä ja PAS2050-standardi suosittelivat käyttämään cut-off -menetelmää [72].

Consequential -menetelmä on teoreettisesti tarkin allokointimenetelmä ja lähestymistapa monitoiminnallisiin prosesseihin ja kierrätykseen. Menetelmä on myös ISO 14044 ja ISO 14067 -standardien allokointimenettelyn hierarkiassa ensimmäinen menetelmä. Consequential -menetelmä on kuitenkin haastava käyttää, sillä menetelmässä täytyy tehdä merkittävä määrä oletuksia vältetyistä taakoista. Lisäksi vältettyjen taakkojen oletuksissa voi ilmetä virheellisyyttä sillä tutkitusta järjestelmästä kierrätykseen menevät materiaalit eivät välttämättä ole laadullisesti yhtä hyviä, verrattuna tuotteisiin joita systeemi korvaa. [72]

APOS-menetelmässä allokointi kohdistaa käsittelyjärjestelmien arvokkaat sivutuotteet yhdessä sen toiminnan kanssa, joka loi kyseisen käsittelyä vaativan materiaalin. Vaikka menetelmän etuna on, että sillä voidaan välttää vaikeita allokatioita, on menetelmän käytössä ongelmia kierrätyksen suhteen. Jos esimerkiksi joku käyttää maataloudesta kierrätettyä muovia, kohdistuu kierrätetyn muovin käyttäjälle nitraatti taakka maatalouden tuotannosta, vaikka alkuperäisen muovituotteeseen maatalous ei ollut tekemisissä lainkaan. [71, s. 70] APOS-menetelmän käytössä tulee olla hyvin tarkka, sillä väärin allokoidulla kierrätys-suhteiden vaikutus voi kumuloitua ja LCA:n tuloksena saadaan, että kierrätetyn materiaalin ympäristövaikutus onkin suurempi kuin neitseellisen materiaalin. [72]

3.4.2 Aikaisemmat elinkaariarvioinnit tuulivoimaan liittyen

Etha Windin vuonna 2022 suorittamassa tutkimuksessa käsiteltiin Takakangas-Pihlajajarju tuulipuistohankkeen hiilijalanjälkeä ja hiilikädenjälkeä. Tutkimuksessa hyödynnettiin Vestas V150 4.2 MW -mallin tuulivoimaloita, joiden elinkaari on 35 vuotta. Hiilijalanjälki laskettiin kahdelle eri skenaariorolle: 12 voimalan vaihtoehdolle hiilijalanjälki oli 6,6 g CO₂-ekv/kWh ja 10 voimalan vaihtoehdolle 6,9 g CO₂-ekv/kWh, kun käytössä oli kierrätys-hyvitys. Ilman kierrätys-hyvitystä hiilijalanjäljet olivat suurempia, 9,5 g CO₂-ekv/kWh ja 9.7 g CO₂-ekv/kWh vastaavasti eri vaihtoehdoille. Tuulipuiston hiilikädenjäljeksi määriteltiin 463 g CO₂-ekv/kWh, mikä kuvaa tuulipuiston ilmastohyötyä. Hiilikädenjälki kertoo,

kuinka paljon käyttäjä voi tuotteella tai palvelulla vähentää päästöjään, keskiössä ollen tulevat myönteiset päästövaikutukset. [73]

Vestaksen itse toteuttamissa LCA-tutkimuksissa V126-3.45 MW -tuulivoimaloille (2017) ja V162-6.2 MW tuulivoimaloille (2023) tarkasteltiin niiden ympäristövaikutuksia noudattaen ISO-standardien ISO 14040, ISO 14044 ja ISO/TS 14071 mukaisia menetelmiä. V126-tuulipuiston hiilijalanjälki Euroopassa oli 6,4 g CO₂-ekv/kWh 29 voimalalle [4, ss. 13, 15], ja V162-tuulipuiston hiilijalanjälki Saksassa oli 6,2 g CO₂-ekv/kWh 16 voimalalle [35, ss. 12–13]. Molemmissa tapauksissa voimaloiden käyttöikä oli 20 vuotta, ja kummankin tapauksessa huomioitiin metalliosien kierrätys. Kaikki muut tuulivoimalan osat mallinnettiin päätyvän polttoon tai kaatopaikalle. [4, s. 37], [35, s. 32] Raportissa elinkaarimallinnukseen käytettiin attribuutiolähestymistapaa, joka on hyvin samanlainen luvussa 3.4.1 mainitun consequential -lähestymistavan kanssa, mutta tarkastelee pelkkää voimalaa. Vestaksen mukaan consequential -lähestymistapa elinkaarimallinnukseen olisi vaatinut lisätietoja siitä, miten esimerkiksi kuluttajat vaikuttavat sähkönkulutukseen, kun markkinoille tulee saataville lisää tuulivoimaa. Attribuutiolähestymistavassa keskitytään ainoastaan tuulivoimalan ympäristövaikutuksiin. [4, s. 40], [35, s. 35]

UNECE:n (United Nations Economic Commission for Europe) vuoden 2022 raportti eri sähköntuotantomuotojen ympäristövaikutuksista esitteli 2,5 MW_e -kokoluokan tuulivoimalan hiilijalanjäljeksi 12,4 g CO₂-ekv/kWh. Tuulivoimalan käyttöikä raportissa oli 20 vuotta. Kierrätysshyvitysten mahdollisuutta tai tarkempaa tuulivoimalamallia ei mainittu. [74, ss. 24–27]

Diez-Cañaméron & Mendozan (2023) tutkimus tuulivoimalan lapojen eri kierrätysmenetelmien kiertotalouden tehokkuudesta ja hiilijalanjäljistä paljasti, että solvolyyysi oli tehokkain ja vähäpäästöisin menetelmä. Tutkimuksessa vertailtiin myös uusiokäyttöä, murskausta ja rinnakkaisprosessointia sementin valmistuksessa. Lapojen elinkaari oli 20 vuotta, ja käytetty voimalamalli oli Siemens-Gamesan 4,5 MW_e -kokoluokan SG 4.5-145 voimalamalli. Tutkimuksen tuloksena saatiin, että solvolyyysin kiertotalousindeksi oli 0,47–0,77. Lapoja uusiokäyttämällä uusiin kohteisiin, niitä murskaamalla tai hyödyntämällä sementin valmistuksen rinnakkaisprosessoinnissa kiertotalousindeksin arvioitiin olevan 0,52–0,55. Tutkimuksessa saatiin myös selville, että kolmen lavan hiilijalanjälki oli 623 t CO₂-ekv (1,54 g CO₂-ekv/kWh) kaatopaikalle viennillä sekä poltolla energiaksi, 499 t CO₂-ekv (1,23 g CO₂-ekv/kWh) uusiokäytöllä uusiin kohteisiin, 467 t CO₂-ekv (1,15 g CO₂-ekv/kWh) solvolyyssikierrätysmenetelmällä, 744 t CO₂-ekv (1,83 g CO₂-ekv/kWh) pyrolyssikierrätysmenetelmällä, 562 t CO₂-ekv (1,39 g CO₂-ekv/kWh) murskauskierrätysmenetelmällä ja 615 t CO₂-ekv (1,52 g CO₂-ekv/kWh) rinnakkaisprosessoinnilla se-

mentin valmistuksessa. Tutkimus toteutettiin mukaillen ISO 14040 ja ISO 14044 -standardeja, käyttäen GaBi v10.0 -elinkaarimallinnusohjelmaa, Ecoinvent v.3.8 -elinkaaritietokantaa sekä ReCiPe 2016 v.1.1 Midpoint (H) -karakterisointimetodia. [75]

Morini et al. (2021) tutkivat 63 metriä pitkän tuulivoimalan lavan ympäristövaikutuksia, joista yhden lavan hiilijalanjäljeksi määritettiin 111.6 t CO₂-ekv. Tutkimuksessa lavat oletettiin loppusijoitettavan kaatopaikalle ja niiden käyttöikä oli 25 vuotta. [58] Lapojen hiilijalanjälki eroaa merkittävästi Diez-Cañamero & Mendozan (2023) tutkimuksesta, jossa lapakohtainen päästö oli noin 170 t CO₂-ekv [75]. Lapakohtainen päästö oli siis Diez-Cañamero & Mendozan tutkimuksessa noin 52 % suurempi, mutta toisaalta tutkimuksessa lavan pituus oli myös 8 m pidempi, mikä tarkoittaisi noin 13 % kasvua lavan koossa [58], [75].

Taulukossa 1 on esitetty tuulivoimaan aikaisempien tehtyjen tutkimuksien tuloksia tuulivoimalan hiilijalanjäljestä. Lisäksi taulukossa on tuotu esille UNECE:n vuoden 2022 raportissa todetut hiilijalanjäljet eri energiantuotantomenetelmille.

Taulukko 1. *Aikaisempien tutkimuksien hiilijalanjälkiä eri energiantuotantomenetelmille.*

Energiantuotantomenetelmä	Päästöt [g CO ₂ -ekv/kWh]
<i>Tuulivoiman tutkimukset</i>	
Tuulipuisto Takakangas-Pihlajajarju kierrätysyhvytyksellä [73]	6,6–6,9
Tuulipuisto Takakangas-Pihlajajarju ilman kierrätysyhvytystä [73]	9,5–9,7
Vestas V126-3.45MW tuulipuisto Euroopassa [4, s. 15]	6,4
Vestas V162-6.2MW tuulipuisto Saksassa [35, s. 13]	6,2
UNECE 2.5 MW _e maatuulivoimala [74, s. 27]	12,4
UNECE 5 MW _e merituulivoimala [74, s. 28]	14,2
<i>Muut tuotantomenetelmät</i>	
550 MW _e Hiililauhdevoimala ilman hiilidioksidintalteenottoa [74, s. 19]	1023
550 MW _e Hiililauhdevoimala hiilidioksidintalteenotolla [74, s. 19]	369
497 MW _e Maakaasukombivoimalaitos ilman hiilidioksidintalteenottoa [74, s. 23]	434
474 MW _e Maakaasukombivoimalaitos hiilidioksidintalteenotolla [74, s. 24]	128
Maa-asenteinen monikideaurinkovoimala Euroopassa [74, s. 37]	36,7
Maa-asenteinen ohutkalvoaurinkovoimala Euroopassa [74, s. 38]	11,4
360 MW _e vesivoimala [74, s. 43]	10,7
1000 MW _e ydinvoimala [74, s. 46]	5,13

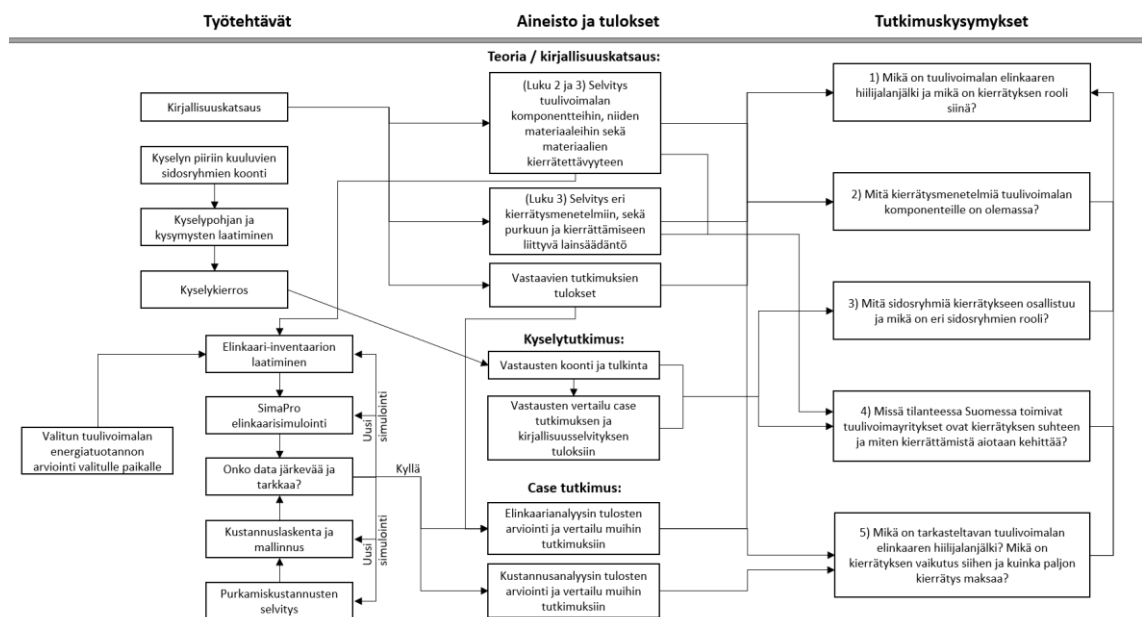
Tuulivoiman hiilijalanjälki on eri tekijöiden elinkaariarvioinneissa hyvin vaihtelevaa. Hiilijalanjälkeen vaikuttaa merkittävästi tapa, jolla tuulivoimala sen käytöstä poistettaessa kierrätetään tai loppusijoitetaan. Taulukosta 1 nähdään, että mikäli tuulivoimala kierrätetään jollakin tapaa, on sen hiilijalanjälki noin 6–7 g CO₂-ekv/kWh, kun ilman kierrättämistä tuulivoiman hiilijalanjälki on noin 11–12 g CO₂-ekv/kWh.

4. AINEISTOT JA MENETELMÄT

Tämän luvun tarkoituksena on tuoda esille diplomityön tutkimusstrategia (luku 4.1), jonka jälkeen esitetään tutkittu tuulivoimala ja kohteet, joita vertaillaan keskenään (luku 4.2). Tämän jälkeen esitetään kustannus- ja elinkaarimallinnuksien toteuttamiseen käytetyt tiedot ja oletukset (luku 4.3). Elinkaarimallinnuksen luvussa (luku 4.4) tuodaan myös esille elinkaarimallinnusta varten tehty elinkaari-inventaario (luku 4.5).

4.1 Tutkimusstrategia, -tavoite ja soveltamisala

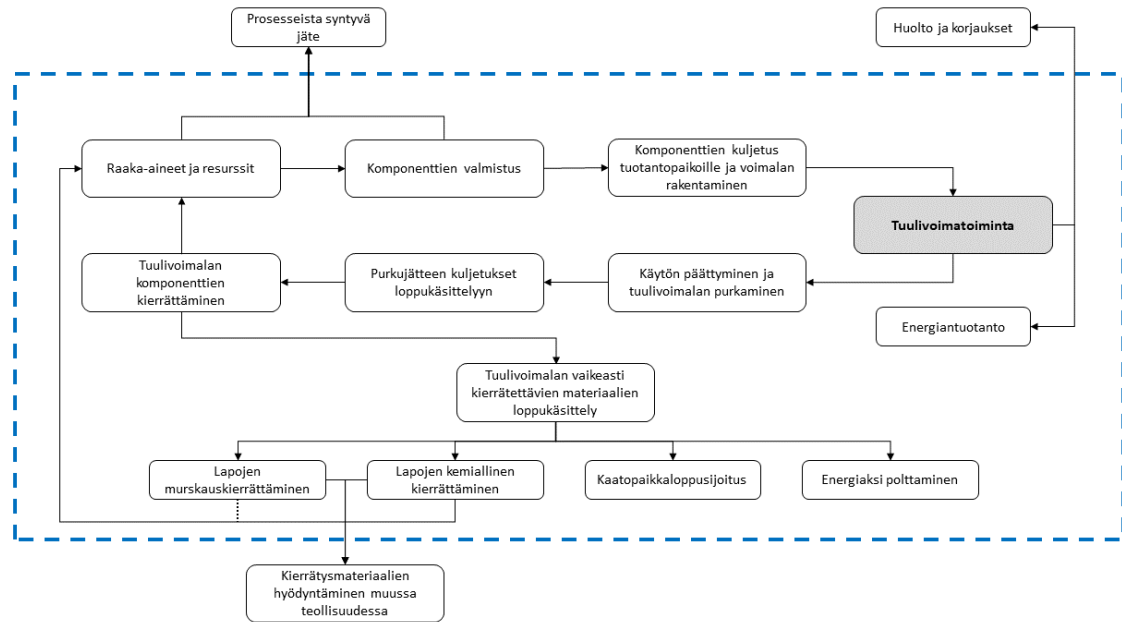
Lähestymistapa toteutettuun tutkimukseen on esitetty kuvassa 15. Tutkimus oli monivaiheinen, ja jaettiin kolmeen päävaiheeseen: teoria- ja kirjallisuuskatsaukseen, kyselytutkimukseen ja case-tutkimukseen.



Kuva 15. Tutkimusstrategia

Työn pääasiallisena tavoitteena oli selvittää minkälaisia tuulivoimalan kierrättämisellä on, sekä kuinka suuri vaikutus tuulivoimalan sijainnilla voi olla ympäristövaikutuksiin. Tutkitun systeemin rajausta oli kehdosta hautaan (cradle to grave) tietyin rajoituksin (Kuva 16). LCA:ssa ei kyetty ottamaan huomioon tuulivoimalaan tehtävien huoltojen ympäristövaikutuksia. Lisäksi systeemin rajojen ulkopuolelle jätettiin tuulivoimalan valmistamisesta mahdollisesti syntyvä jätte ja kierrätysmateriaalien hyödyntäminen muussa kuin tuulivoimateollisuudessa. Kierrätysmateriaalien hyötykäyttöä muussa teollisuudessa voi

olla muun muassa lapamurskeen hyödyntäminen raaka-aineena sementtiteollisuudessa.



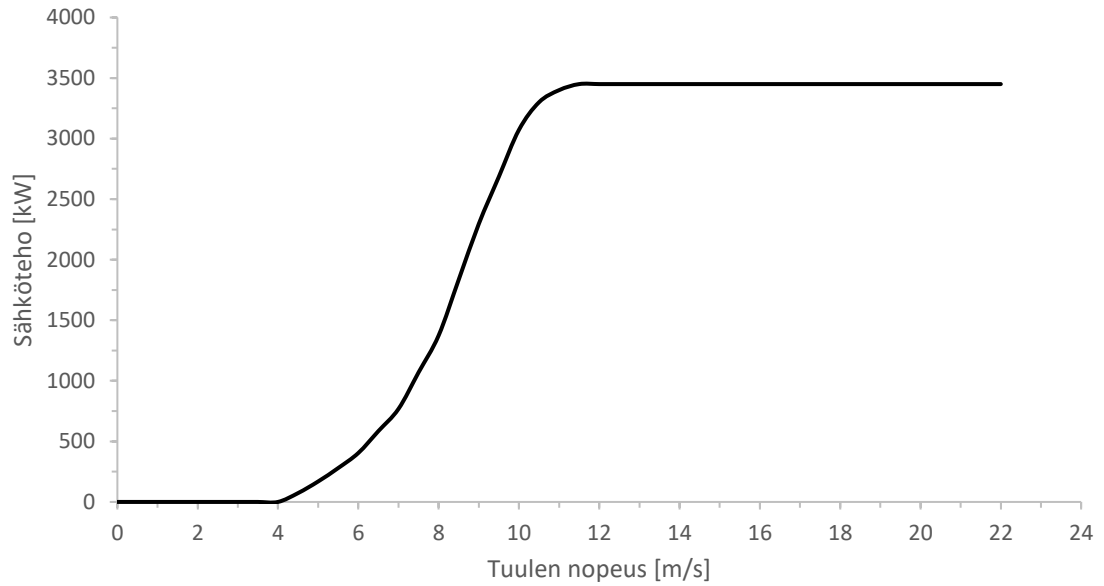
Kuva 16. Järjestelmän rajat sekä prosessivirtaukset

Tutkimuksen funktionaalinen yksikkö oli yksi kokonainen tuulivoimala mukaan lukien perustukset. Tuulivoimalan valmistus- ja kierrätysprosesseja arvioitiin hyödyntäen kirjallisuutta. Tietyissä prosesseissa hyödynnettiin suoraan työssä käytetyn SimaPro® 9.3.0.3 ohjelmiston sisältämän Ecoinvent 3.8 -elinkaaritietokannan tietoja.

4.2 Case-tutkimuksen tuulivoimala ja kohteet

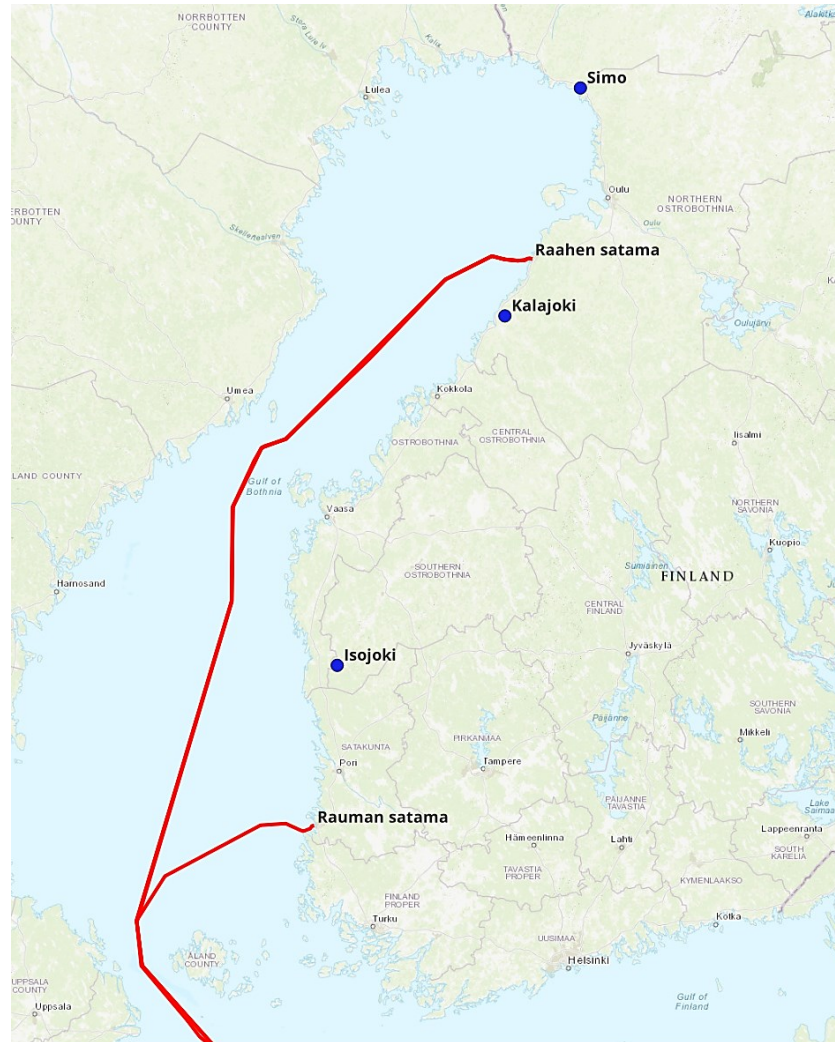
Työssä tutkittava tuulivoimala on vuosien 2010–2020 välillä Suomeen rakennettu keskimääräisen kokoinen tuulivoimala. Suomen Tuulivoimayhdistys ry ylläpitää listaa kaikista Suomeen rakennetuista tuulivoimaloista vuodesta 1991 lähtien.

Suomeen vuosien 2010–2020 välillä rakennettiin 752 kappaletta uusia tuulivoimaloita. Voimaloiden keskimääräinen roottorihalkaisija oli 126,55 metriä ja napakorkeus 133,76 metriä. Voimaloiden keskimääräinen teho oli 3,33 MW. Suurin laitetoimittaja näinä vuosina oli Vestas. [3] Kyseisten tietojen perusteella voidaan yleistää keskimääräisen voimalan olevan hyvin samankaltainen kuin Vestaksen V126 tuulivoimala. Vestas on tehnyt aikaisemmin omia elinkaarianalyysseja voimalamallistoonsa [76], minkä vuoksi tämän työn elinkaari- ja kustannusmalli tulee pohjautumaan pitkälti Vestaksen tuottamiin elinkaarianalyysihin, etenkin LCA raporttiin Vestas V126-3.45MW -mallista. Lisäksi tässä työssä tehdyn yksinkertaisen elinkaaren energiantuotanto-odotuksen lukemat pohjautuvat Vestas V126-3.45MW -mallin tehokäyrään (Kuva 17).



Kuva 17. Vestas V126-3.45MW tehokäyrä [77].

Työtä varten valittiin kolme eri paikkaa tarkasteltavalle tuulivoimalalle, Simo, Kalajoki ja Isojoki (Kuva 18). Kyseisten kuntien alueille on keskittynyt merkittävä määrä tuulivoimaa Suomessa, ja alueet ovat sopivan erillään toisistaan. Pitkät välimatkat alueitten välillä auttavat elinkaarianalyysissä kuljetuksien vaikutuksien selvittämiseen tuulivoimalan käytön elinkaaren aikana.



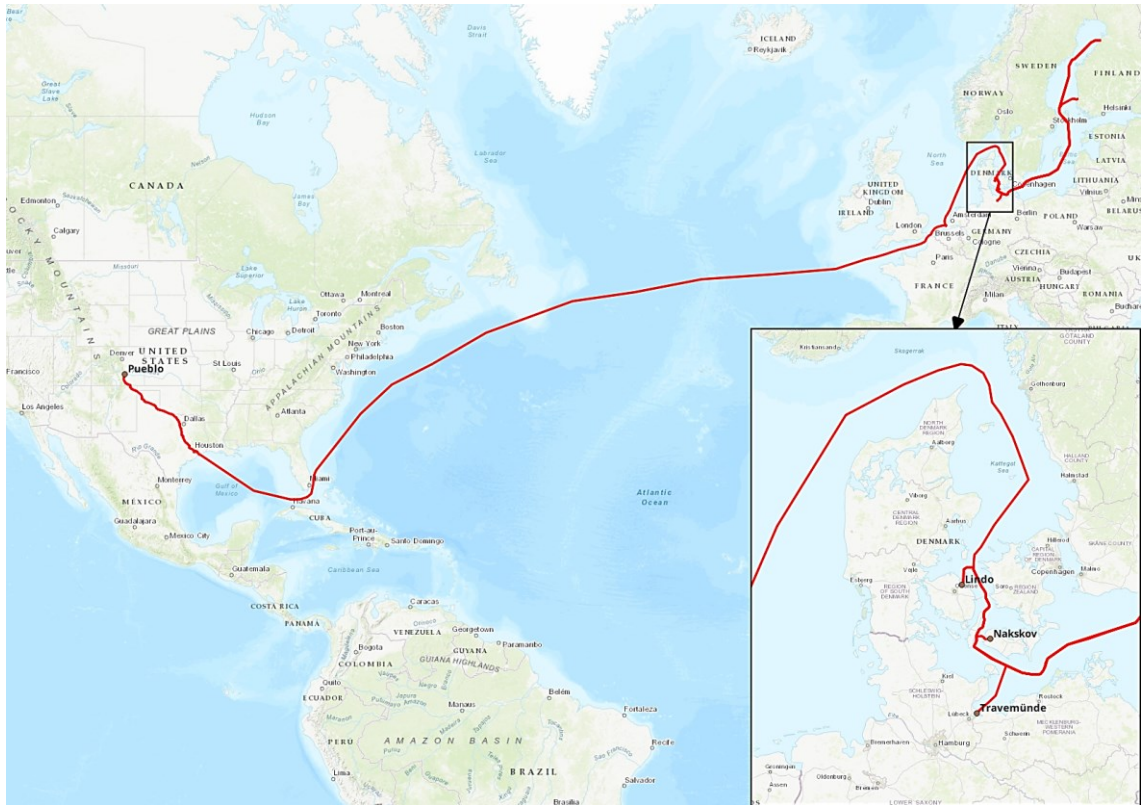
Kuva 18. Tuulivoimaloiden sijainnit, sekä kuljetussatamat. – Merkkää rahtikuljetusta ja • tuulivoimalan sijaintia.

Tuulivoimalan lavat mallinnettiin valmistettavan Vestaksen Nakskovin tehtaalla. Tehtaalla on Google Maps -satelliittikuvien perusteella oma satama, josta on suora pääsy merelle, sekä suuri määrä lapoja ulkovarastossa. Tehdas on Vestaksen mukaan aloittanut toiminnan vuonna 1999, jolloin se tuotti omalle, V66-mallin tuulivoimalalleen lapoja [78]. Lapojen kuljetusreitit ja -välineet tuotantopaikoille on esitetty tarkemmin luvussa 4.5 ja taulukossa 6 sekä kuvassa 19.

Naselli eli konehuone, ja sen sisusta oletettiin kasattavan Vestaksen Lindørn tehtaalla Munkebon kaupungissa. Vestas on omilla sivuillaan ilmoittanut kyseisen tehtaan Nasellien valmistuspaikaksi [79]. Naselliin asennetaan tehtaalla keskiö, vaihdelaatikko, generaattori, sekä oleelliset sähkö- ja ohjauskomponentit. Generaattori ja vaihdelaatikko mallinnettiin elinkaarianalyysissä valmistettavaksi yhtenä kokonaisuutena Vestaksen generaattori tehtaalla Travemündessa Saksassa [79]. Generaattori-vaihdelaatikkokokonaisuuden kuljetusmatkat- ja välineet ovat esitetty tarkemmin luvussa 4.5 ja taulukossa 10

sekä kuvassa 19. Kaikki muut nasellin sisältämät komponentit mallinnettiin joko valmistettavan paikan päällä tai ostettavan vapailta markkinoilta. Nasellin kuljetusmatkat- ja välineet tuotantopaikoille on esitetty tarkemmin taulukossa 12 sekä kuvassa 19.

Tarkasteltavien tuulivoimaloiden tornit oletettiin valmistetuiksi nykyään CS Windin omistamalla tornimoduulitehtaalla Pueblo, Colorado, Yhdysvalloissa. Aikaisemmin Vestaksen omistama tehdas oli käyttöönotonaikaan vuonna 2009 maailman suurimpia tornivalmistajia [80], joten on hyvin todennäköistä, että Suomeenkin on päätyntä kyseisen tehtaan valmistamia torneja. Vestas ei enää valmista omien sivujensa perusteella torneja vaan yritys todennäköisesti hankkii ne alihankinnan kautta tornien valmistamiseen erikoistuneilta yrityksiltä kuten GRI Renewable Industries, Arcosa Wind Towers, Marmen Inc. tai Windar renovables. Tornien kuljetusmatkat- ja välineet on esitetty tarkemmin luvussa 4.5 ja taulukossa 8 sekä kuvassa 19.



Kuva 19. Komponenttien kuljetusverkosto pois lukien rekkakuljetukset Suomessa.
 – Merkkää rahtikuljetusta ja ● komponenttien valmistussijaintia.

Komponenttien kuljetusverkoston pituuksien etsintään käytettiin WGS 84/Pseudo-Mercator karttaprojektioita. Toiselta nimeltään Web Mercator -projektiio on yleisin verkkokarttapalveluissa käytössä oleva projektiio tyyli. Siinä maantieteelliset koordinaatit määritellään taustalla olevalla WGS84-koordinaattijärjestelmällä mutta ne projisoidaan pallopinnalle. [81, s. 87]

4.3 Kustannuslaskenta

Tässä työssä toteutettiin tuulivoimalalle tuulivoimalan purkamisen ja kierrättämisen kustannusmallinnus. Työssä ei otettu kantaa elinkaaren kokonaiskustannuksiin, sillä ne olivat rajauksen ulkopuolella. Näitä olisivat esimerkiksi voimalan hankinnan sekä huollon ja ylläpidon kustannukset.

Tuulivoimalan purkamisen kustannuksien arviointi pohjautuu STY:n ja AFRY Finland Oy:n tuulivoimaloiden purkamisen kustannuksien selvitysraporttiin. Raportti on julkaistu 9.8.2023 ja siinä käsitellään laajasti purkamisen eri vaiheiden kustannuksia. Raportissa purkamisen kustannukset ovat jaettu kolmeen eri vaiheeseen [46]:

1. Purkamisen valmistelu
2. Nasellin ja roottorin purkaminen
3. Tornin purkaminen.

Näistä kolmesta vaiheesta ensimmäinen vaihe, purkamisen valmistelu, on kallein. Yhden voimalan tapauksessa purkamisen valmistelu maksaa 47800–60500 €. Hinta sisältää projektin johdon ja suunnittelun, luvat ja vakuutukset, työmaapalvelut, nostokaluston mobilisoinnin ja nosturien välisiirrot. Nasellin ja roottorin purkamisen arvioitiin maksavan 24800–28700 € yhtä tuulivoimalaa kohden. Purun hinta tässä tapauksessa sisältää lapojen ja navan purun, sähkövarusteiden purun, nasellin purun ja nosturivuokrat. Tornin purun arvioitiin kustantavan 31800–32200 € yhtä tuulivoimalaa kohden. Puruhintaan sisältyy tornin sisäosien purku, tornin purku ja nosturivuokrat. Raportin kustannusarvioiden lähteenä henkilökustannuksiin käytettiin SKOL-indeksiä, nosturikustannuksiin Havor Oy:ta ja muut kustannukset olivat AFRY Finlandin sisäisiä arvioita. Lisäksi raportissa arvioitiin purkujätteiden kuljettamisen kustannuksiksi 18000–28000 € yhtä tuulivoimalaa kohden. Selvityksessä kuljetuksia oletettiin olevan noin 15–24 kuormallista yhtä tuulivoimalaa kohden. [46]

Taulukko 2. *Tuulivoimalan purkamisen kustannukset ilman materiaaliarvojen huomioimista [46].*

Kustannustekijä	Minimikustannus [€]	Maksimikustannus [€]
Purkamisen valmistelu	47 800	60 500
Nasellin ja roottorin purku	24 800	28 700
Tornin purku	31 800	32 200

Purkumateriaaleilla on materialista riippuen jopa merkittävääkin jälleenmyyntiarvoa. Esimerkiksi metallit ovat suhteellisen helppoja uudelleen käyttää sulattamalla ne ja tuottamalla uusia hyödykkeitä. Koska tuulivoimala on perustuksia ja lapoja lukuun ottamatta

lähes täysin metallinen, voi tuulivoimalan jälleenmyyntiarvo olla merkittävä. Purkumateriaalien loppukäsittelyn yksikköhintoja on käsitelty taulukossa 3. Yksikköhinnoissa on huomioitu materiaalien jälleenmyyntiarvo.

Taulukko 3. *Purkumateriaalien loppukäsittelyn yksikköhintoja. Negatiivinen merkki tarkoittaa kustannuksia purkajalle.*

Materiaali	Minimiyksikkö-hinta [€/tonni]	Maksimiyksikkö-hinta [€/tonni]
Betoni [46]	-2	-80
Teräs [46]	100	170
Alumiini [46]	600	1100
Kupari [46]	4 000	6 000
Öljy ja nesteet [46]	-100	-850
Elektroniikka [46]	0	0
Magneetit [46]	0	0
Muut [82]	-40	-170
Lasikuitukomposiitti (murskauskierrätys) [46]	-200	-300
Lasikuitukomposiitti (kemiallinen kierrätys) [57]	-480	-530
Lasikuitukomposiitti (energiaksi polttaminen) [46]	-40	-170
Lasikuitukomposiitti (kaatopaikkajätteenä) [46]	-40	-170

Betonille arvioitiin yksikköhinnan ylärajaksi (maksimiyksikköhinta purkajalle) 80 €/tonni. Raja perustuu jäteveron suuruuteen. AFRY Finlandin raportissa oli betonille arvioitu alaraja 20 €/tonni. Lukema perustuu betonijätteen jalostukseen ja hyödyntämiseen murskeena lähialueilla. [46] Tässä työssä säilytettiin perustuksille mahdollisuus loppusijoittaa ne jättämällä ne maaperään ja maisemoida ne. Alarajaksi arvioitiin, että maisemakustannukset maksaisivat noin 4000 € yhtä perustusta kohden. Näin yksikkökustannus oli noin 2 €/tonni.

Metallien hinta perustui AFRY Finlandin raportissa käytettyihin tietoihin romualan toimijoiden vastaanottohinnoista. Metallien, etenkin sähköistämiseen vaadittavien kuparin ja alumiinin hintoja on erittäin vaikeaa arvioida pitkällä aikavälillä. STY oli toimeenpannut purkukustannusten selvityksen aikaisemmin vuonna 2014. Silloiseen hintatasoon nähdessä kuparin hinta oli lähes tuplaantunut. Yhteiskunnan jatkuvan sähköistymisen myötä kuparin kysyntä tulee jatkossa vain lisääntymään, mikä lisää kasvupainetta kuparin hintoihin. [46] Tässä työssä päätettiin käyttää metalleille tämänhetkisiä hintatietoja, sillä 2030-luvun hintatasoa on erittäin haastavaa arvioida.

Öljyt, voiteluaineet ja jäähdytysnesteet arvioitiin vastaanotettavan AFRY Finlandin raportissa käytetyillä jäteöljyn ja vaarallisen jätteen hinnoilla. Vastaanottomaksut oli arvioitu raportissa kunnallisten jätehuoltoyhtiöiden ja tyypillisten vaarallisten jätteiden hintojen perusteella. [46]

Elektroniikalle merkittiin, että siitä ei koidu kustannuksia. Elinkaarimalli toteutettiin siten, että tuulivoimalavalmistaja Vestas ottaa elektroniikka- ja sähköistyskomponentit vastaan omalle tehtaalleen. Tässä tapauksessa voidaan tehdä oletus, että Vestas hoitaisi itse mahdolliset kuljetukset sekä käsittelykustannukset, sillä jätteellä voi olla vielä merkittävä jälleenmyyntiarvo tai uusiokäyttöpotentiaali.

AFRY Finlandin raportissa mainitaan, että kestopagneeteille on Suomessa olemassa oleva kierrätyskanava. Raportissa toisaalta mainitaan myös, että suuremmat kierrätysmäärät voidaan joutua kierrättämään valmistajan kautta, joka tämän työn tapauksessa olisi joko Vestas tai joku sen alihankkijoista. Elinkaarimallissa oletettiin, että tornimoduulit kuljetettaisiin kokonaisina suoraan Outokummun Tornion terästehtaalle, jossa kierrätys tapahtuisi. Magneettien erillistä yksikköhintaa on vaikea arvioida, joten niiden rahallinen arvo merkittiin nolaksi.

Kohta ”Muut” taulukossa 3 kuvaa mahdollisten kierrätyskelvottomien materiaalien kustannusta. Kustannus koostuu jätehuoltoyhtiöiden vastaanottomaksuista ja tässä tapauksessa ”Muut” kategoriaan sisältyy tuulivoimalan tornin lakat ja maalit sekä satunnaiset muovikomponentit. 40–170 €/tonni yksikkökustannus perustuu Pirkanmaan Jätehuolto Oy:n jätetaksaan. Yhtiö on ilmoittanut loppusijoitettavalle jätteelle hinnaksi 173,65 €/tonni, sekä sekajätteelle noin 30-60 €/tonni riippuen jätteenkeräystavasta 1.1.2024 voimaan tullessa jätetaksassaan [82]. Kustannuksen alarajaksi valittiin sekajätteen perusteella 40 €/tonni.

Lasikuidun kierrättämisen yksikköhinnat olivat hyvin vaihtelevia. Murskauskierrättämisen hinta perustuu AFRY Finlandin purkukustannusraporttiin, jossa kerrotaan, että kierrätystavan yksikkökustannus on noin 200–300 €/tonni. Lukema sisältää lapojen käsittelyn sekä kuljetuksen. Raportissa mainitaan, että murskaamisen hinnan arvio on saatu Kuusakoski Recyclingilta. Loppusijoittaminen energia- tai kaatopaikkajätteeksi perustuu taas jätteiden vastaanottomaksuihin, jotka on selitetty edeltävässä kappaleessa.

Kemiallisen kierrättämisen yksikköhinnan arvio pohjautuu Cousins et al. 2019 [57] ja Rani et al. 2021 [54] tuottamiin tutkimuksiin lasikuitukomposiittien kierrätettävyydestä. Cousins et al. tutkimuksessa toteutettiin kokeellinen kemiallinen kierrättäminen lasikuituiselle tuulivoimalan lavan pääjäteelle ja tehtiin arvioita kierrättämisen kustannuksista. Rani et al. tutkimus taas on kirjallisuuskatsaus tuulivoimaloiden lasikuitukomposiittien kierrätystekniikoihin. Tutkimuksen tietoja hyödynnettiin kemiallisen kierrättämisen energiatarpeen selvittämiseen. Tätä työtä varten valittiin kemiallisen kierrättämisen energiantarpeeksi 77 MJ/kg, joka perustuu Rani et al. 2021 tutkimuksen kemiallisen kierrätystavan vaihteluväliin 63–91 MJ/kg [54]. Kustannusarvioon käytettiin energian hinnaksi 0,08

€/kWh, jolloin kolmen lavan prosessointikustannukseksi arvioitiin noin 72 000 €. Cousins et al. 2019 tutkimuksessa todettiin yhden lavan kiinteäksi kustannukseksi 11767 \$/lapa, joten tätä työtä varten valittiin lapojen kiinteäksi kustannukseksi 12 000 €/lapa. Kolmea lapa kohti siis koitui 36 000 € kiinteitä kustannuksia.

Cousins et al. 2019 tutkimuksessa todettiin, että lavasta hartsi saadaan talteen 90-prosenttisesti ja lasikuitu 50-prosenttisesti. Tässä työssä siis saatiin lasikuitua talteen noin 12,7 tonnia ja hartsia noin 15,1 tonnia. Jätehuoltoon jäi siis noin 14,4 tonnia jätettä, jonka kustannukseksi arvioitiin taulukon 3 perusteella minimissään noin 575 € ja maksimiksi 2 445 €. Cousins et al. totesivat myös, että PMMA-hartsin markkinahinta on 2,5 \$/kg ja lasikuidun markkinahinta 4 \$/kg. Tässä työssä päädyttiin käyttämään hartsille 2,5 €/kg markkinahintaa, jolloin hartsin jälleenmyynnistä voisi saada noin 38 000 € tuottoa. Lasikuidun markkinahinnaksi valittiin 4 €/kg, jolloin kierrätetyn lasikuidun myynnistä voitaisiin saada noin 50 000 € tuottoa. Tuulivoimalan lapojen kemiallisesta kierrättämisestä siis koituu noin 20 000–22 000 €/voimala kustannuksia purkajalle, jolloin kierrättämisen yksikköhinnaksi tuli pyöristettynä 480–530 €/tonni.

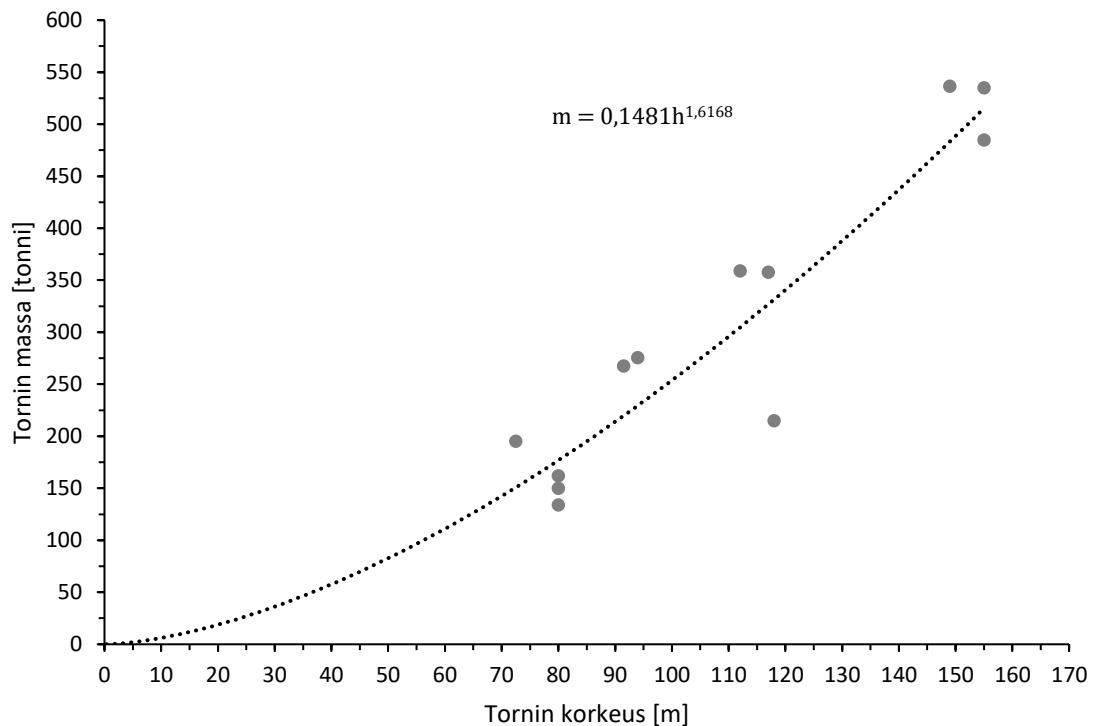
4.4 Elinkaariarviointi

LCA toteutettiin käyttämällä SimaPro-elinkaarimallinnusohjelmistoa. Työssä käytettiin Ecoinvent 3.8-elinkaaritietokantaa (LCI) ja ReCiPe 2016 Midpoint (H)-elinkaari-indikaattoria, sekä Cut-off, System -allokointia. Ympäristövaikutusten arviointi toteutettiin kehodaista hautaan (cradle to grave) -menetelmällä. Arviointia varten valittiin neljä tarkasteltavaa ympäristövaikutuskategoriaa, jotka olivat ilmaston lämpenemispotentiaali [kg CO₂-ekv], stratosfäärinen otsonikato [kg CFC-11-ekv], pienhiukkasten muodostuminen [kg PM_{2.5}-ekv] ja vedenkulutus [m³]. Valitut ympäristövaikutuskategoriat ovat yleisimmin tarkasteltavia ympäristövaikutusten raportoinnin näkökulmia tuotteille tai palveluille.

LCA:ta varten käytetyt tuulivoimalan materiaaliakoostumukset pohjautuvat hyvin pitkälti Vestaksen omiin elinkaari-raportteihin. Raportteja on ollut saatavilla valmistajan monille eri malleille, joista jotkut vastaavat hyvin lähelle Suomeen vuosien 2010–2020 välillä pystytettyä tuulivoimalaa.

LCA:ta varten tutkittavan tuulivoimalan tornin massa täytyi arvioida (Kuva 20). Arviointi toteutettiin hyödyntämällä Vestaksen omia elinkaaritutkimuksia. Suomessa vuosien 2010–2020 välillä pystytetyn tuulivoimalan napakorkeus oli noin 134 metriä, kun taas Vestaksen V126-3.45MW raportissa kyseisen tuulivoimalan napakorkeus oli 117 metriä. Vestas V126-3.45MW tuulivoimalamalli vastaa hyvin läheisesti keskimääräistä 2010–

2020 välillä Suomeen rakennettua tuulivoimalaa. Kyseisellä aikavälillä keskimääräinen roottorikoko oli noin 126,5 metriä, sähkötehon ollessa noin 3,3 MW, kun Vestaksen turbiinimallilla roottorikoko on 126 metriä ja sähköteho 3,45 MW. Vestaksen tuottamissa tutkimuksissa tornin massa oli eritelty muista komponenteista, jolloin tornin korkeuden ja sen massan välille pystyttiin tekemään suhdekaava hyödyntäen sovitetta eri turbiinimalleista saataviin tietoihin.



Kuva 20. Vestaksen tuulivoimaloiden tornin massa suhteutettuna tornin korkeuteen [76]

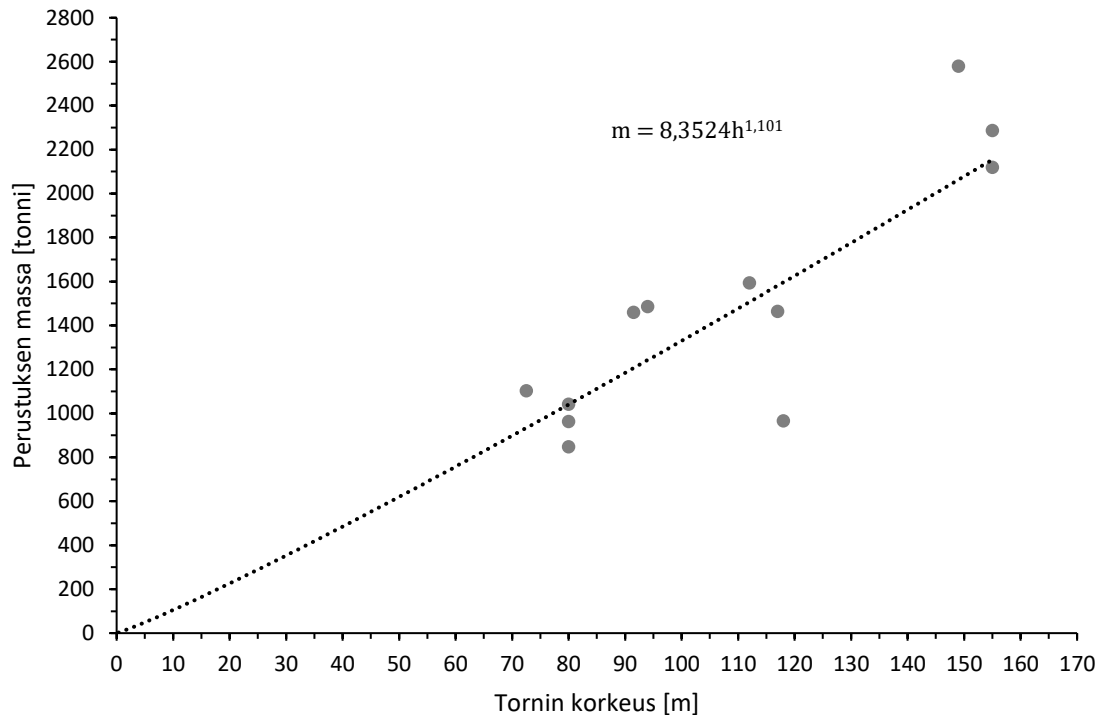
Excelin tuottaman sovitefunktion myötä tornille saatiin massayhtälö

$$m = 0,1481h^{1,6168}, \quad (1)$$

jossa m on tornin massa tonneissa ja h on tornin korkeus metreissä.

Tuulivoimalan perustuksien massa arvioitiin samalla tavalla kuin tuulivoimalan torni (Kuva 21). Vestas on omissa tutkimuksissaan tornin tapaan listannut perustuksien massat tuulivoimalamallin mukaan. Perustukset ovat toisaalta hyvin tapauskohtaisia, joten perustuksien massassa on suurempaa vaihtelevuutta. Vestaksen V126-3.45MW -tuulivoimalan LCA-raportissa on perustuksille ilmoitettu kaksi eri skenaariota, korkea pohjaveden taso (HGWL) ja matala pohjaveden taso (LGWL). HGWL:n tapauksessa tuulivoimalan perustuksiin tarvitaan enemmän betonia ja teräsvahvistusta, sillä skenaariossa pohjaveden taso on lähes yhtä korkealla kuin maaston taso. LGWL-skenaario on raportin

mukaan perusskenaario, sillä kyseinen skenaario vastaa useammin tuulipuistojen asennuspaikkoja. [4, s. 38]



Kuva 21. Vestaksen tuulivoimaloiden perustuksien massa suhteutettuna tornin korkeuteen [76]

Excelin tuottaman sovitefunktion myötä tornille saatiin massayhtälö

$$m = 8,3524h^{1,101}, \quad (2)$$

jossa m on perustuksien massa tonneissa ja h on tornin korkeus metreissä.

4.5 Elinkaari-inventaario

Elinkaarianalyysia varten tuulivoimalan komponenteista täytyi tehdä elinkaari-inventaario. Inventaarioon kootaan eri komponentteihin käytettyjen materiaalien määrät ja koostumukset sekä prosessien käyttöön liittyviä tietoja kuten aika ja prosessoitu määrä. Inventaarion laadintaan käytettiin SimaPro ohjelmiston sisältämää Ecoinvent 3.8 elinkaaritietokantaa. Tietokannassa käytetään lyhenteitä merkitsemään mihin maapallon osaan komponentti kuuluu. Lisäksi tietokannassa on eritelty markkinoilta valmiin ostaminen ja itse tuottaminen. Määritelmät lyhenteille on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. *Ecoinvent 3.8 elinkaaritietokannassa käytettyjen lyhenteiden määritelmät*

Lyhenne	Määritelmä
RER	Eurooppa
DK	Tanska
ROW	Muu maailma (Rest of World)
GLO	Maailmanlaajuinen (Global)
FI	Suomi
CH	Sveitsi
Market for	Markkinoilta ostettu tuote
Production	Itsetuotettu tuote

Elinkaari-inventaario pohjautuu pitkälti Vestaksen itse tuottamiin elinkaarianalyysihin. Vain perustuksien ja torniin käytettyjen materiaalien määrä eroaa Vestaksen omista tutkimuksista. Näitä komponentteja varten käytettiin aikaisemmassa luvussa esiteltyjä sovittefunktoita 1 ja 2. Lukukujen 4.5.1 ja 4.5.2 inventaariotaulukoissa komponentit on ilmaistu englannin kielellä, jonka jälkeen komponenteista on esitetty oleelliset tiedot, oletukset ja arviot suomeksi. Taulukointi toteutettiin englanniksi siksi, että mahdollisia käännösvirheitä ei tapahdu ja tieto säilyy täsmällisenä.

4.5.1 Valmistuksen elinkaari-inventaario

Taulukossa 5 esitettyyn lavan elinkaari-inventaarion jouduttiin käyttämään sovellettuja arvioita käytetyistä materiaaleista ja prosesseista. Ecoinvent 3.8 elinkaaritietokannassa ei ollut sopivaa materiaalia balsapuulle, jota tuulivoimalan lavoissa käytetään. Tätä työtä varten jouduttiin siis valitsemaan rakennepuu (structural timber) korvaamaan balsapuu. Puun materiaalmäärää varten jouduttiin tekemään yksikkömuunnoksia. Vestaksen tuottamassa tutkimuksessa puumateriaalit ovat merkitty ”Muokatuiksi orgaanisiksi luonnonmateriaaleiksi”, joita oli noin 0.172 tonnia [4, s. 48]. SimaPron inventaariota varten rakennepuun määrä täytyi antaa kuutiometreissä, jolloin tässä työssä käytetylle rakennepuulle täytyi löytää tiheys. Tiheyttä varten hyödynnettiin The Engineering ToolBox verkkosivun tietoja eri puumateriaalien ominaisuuksille. Verkkosivulta löytyi tiheystietoja laminoitulle viilupuulle, joka on yleinen rakennepuu tyyppi. Materiaalille annettiin tiheydelle vaihteluväli 400–700 kg/m³ [83]. Tätä työtä varten valittiin käytetyn puumateriaalin tiheydeksi 550 kg/m³, jolloin kaikkia kolmea lapaa varten käytettiin noin 0.3135 m³ rakennepuuta. Sähköä arvioitiin kuluvan 400 kWh yhtä lapaa varten. Arvioon kuuluvat lavan valmistamisen ja viimeistelyn energiankäyttö.

Taulukko 5. *Yhteen lapaan käytetyt materiaalit ja prosessit*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RER}, production	12,616	t
Structural timber {RER}, market for	0,104	m ³
Electricity, medium voltage {DK}	4 320	MJ

Lavat oletettiin valmistettavan Vestaksen tehtaalla Nakskovissa, Tanskassa. Vestaksella on kyseisessä kaupungissa iso tehdasalue, jonka piha-alueilla on varastoituna satelliittikuvien perusteella suuri määrä tuulivoimaloiden lapoja. Lavat oletettiin kuljetettavan Nakskovin tehdasalueelta suoraan Raahen satamaan, sillä tehdasalueella on oma satama. Nakskovin tapaan Raahen satamassa on satelliittikuvien perusteella ollut säilötynä tuulivoimaloiden lapoja, joten työtä varten Raahen satama oletettiin Suomen pääns vastaanottokeskukseksi kaikille lavoille.

Kaikkiin rekoilla tehtäviin kuljetuksiin tuotantoalueille tehtiin oletus, että komponenttikuljetukset tehtiin Euro 4 -päästöluokitelluilla rekoilla. Euro 4 -luokitus tuli voimaan tammi-kuussa 2005 [84]. Luokitusoletus pätee myös kaikille seuraaville komponenteille pois lukien kierrätyksen elinkaari-inventaario. Kierrätyksen rekkakuljetuksiin käytettiin uudempiä Euro-päästöluokitusta.

Taulukko 6. *Lapojen kuljetusmatkat ja -välineet*

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
Nakskov tehdasalue – Raahen satama	1 714	Rahtilaiva
Raahen satama – Isojoen tuulivoimala	370	Rekka (Euro 4, yli 32 tonnia)
Raahen satama – Simon tuulivoimala	155	Rekka (Euro 4, yli 32 tonnia)
Raahen satama – Kalajoen tuulivoimala	52	Rekka (Euro 4, yli 32 tonnia)

Taulukossa 7 esitetyn vähäseoksisen teräksen massan (Steel, low alloyed) ja teräksen valssaamisen (Sheet rolling, steel) arviointiin käytettiin yhtälöä (1). Mallinnuksen yksinkertaistamisen vuoksi tornimoduulit mallinnettiin samanlaisina. Tositilanteessa tornimoduulit kaventuvat sen mukaan mitä korkeammalle tornia rakennetaan. Näin vältytään ylimääräiseltä materiaalin käytöltä. Tornimoduuleita käytettiin tässä työssä kolme kappaletta, jolloin yhden tornimoduulin pituus olisi noin 44,6 metriä, mikäli napakorkeutena käytetään keskimääräisen vuosien 2010–2020 välillä rakennettua tuulivoimalaa Suomessa.

Ecoinvent 3.8 -tietokannassa akryylilakka oli ainut lakkavaihtoehto. Vestas ei ole ilmoittanut suoraan minkä tyyppistä lakkaa ja pinnoitetta torneissa käytetään, mutta V126-3.45-MW -raportissa ilmaistaan, että lakat ovat polymeeri pohjaisia [4, s. 47]. Akryyli kuuluu polymeereihin, joten oletus akryylilakan käytöstä on oikeutettu tässä tapauksessa.

Tietokannasta ei löytynyt vaihtoehtoa kiinnityskestomagneeteille, mutta vaihtoehtoisesti sähkömoottoreita varten valmistettu kestopagneetti löytyi tietokannasta. Työtä varten päätettiin käyttää tämän tyyppistä kestopagneettia yksinkertaistamisen vuoksi, sillä muuten työtä varten olisi täytynyt "rakentaa" oma magneetti tietokantaan, jolloin komponentin elinkaaren virhemarginaali olisi kasvanut merkittävästi. Kiinnityskestomagneetteja käytetään erinäisten sisäkomponenttien kiinnitykseen tornissa. Sisäkomponentit koostuvat pääosin alumiinista ja teräksestä. Alumiini ja magneettiosat oletettiin ostettavan markkinoilta valmiina tuotteina. Alumiinille tehtiin oletus, että tuulivoimalan kokonaisalumiinimäärästä 65 % kuuluu tornin komponenteille ja 35 % kuuluu nasellin komponenteille.

Taulukko 7. *Yhteen tornimoduuliin käytetyt materiaalit ja prosessit*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Steel, low alloyed {ROW}, steel production	135,7	t
Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state, market for	160,92	kg
Permanent magnet, for electric motor {GLO}, market for	57,47	kg
Aluminium, cast alloy {GLO}, market for	1 509,2	kg
Sheet rolling, steel {RoW}, processing	135,7	t

Tornimoduulit oletettiin valmistetuiksi Vestaksen ennen omistamalla tornitehtaalla Pueblo, Coloradossa (Taulukko 8). Tornitehdas otettiin käyttöön 2009 ja se oli käyttöönoton aikaan maailman suurimpia tornimoduulien valmistajia [80]. Valmiit tornimoduulit oletettiin kuljetettavan raide teitse Houstonin satamaan Texasiin. Matkan pituus arvioitiin käyttäen tiedettyjä raideverkostoja ja QGIS-paikkatieto-ohjelmistoa. Raahe oletettiin lapojen tapaan tornimoduulien vastaanottokeskukseksi satelliittikuvien perusteella. Satelliittikuvissa näkyi Raahen sataman piha-alueilla merkittävä määrä tornimoduuleita säilössä.

Taulukko 8. *Tornimoduulien kuljetusmatkat ja -välineet*

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
Pueblo, Colorado, Yhdysvallat – Houston port, Texas, Yhdysvallat	1 565	Rahtijuna, Yhdysvallat
Houston port, Texas, Yhdysvallat – Rotterdam port, Alankomaat – Raahe satama, Suomi	12 420	Rahtilaiva
Raahe satama – Isojoen tuulivoimala	370	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)
Raahe satama – Simon tuulivoimala	155	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)
Raahe satama – Kalajoen tuulivoimala	52	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)

Elinkaarimallin yksinkertaistamisen vuoksi generaattori ja vaihdelaatikko yhdistettiin yhdeksi kokonaisuudeksi (Taulukko 9). Generaattorin massa arvioitiin hyödyntäen Lacal-Aránteguin (2015) tutkimusta, jossa ilmoitettiin, että 2 MW_e kokoluokan tuulivoimalan sähkömagneettigeneraattori koostuu noin 66 % magneettisesta teräksestä, 30 % kupa-

rista ja 3 % silikaateista [28]. Valurautaa (cast iron) varten tehtiin oletus, että tuulivoimalan kokonaisvalurautamäärästä 25 % koostuu generaattorin ja vaihdelaatikon komponenteista, lopun 75 % valuraudan kuuluessa nasellille ja keskiölle. Vestaksen elinkaariraporteissa on ilmoitettu, että seostettu teräs kuuluu pääosin nasellin sisältämiin komponentteihin. EcoInvent-tietokannassa ei ollut saatavilla suoraan yleisesti korkeasti seostetulle teräkselle elinkaarikomponenttia, joten tätä työtä varten päädyttiin käyttämään ruostumatonta terästä (chromium steel 18/8) komponenttina. Tämä kuitenkin lisää merkittävästi virhemarginaalia, sillä seostettuja teräskomponentteja voi olla monia erilaisia ja esimerkiksi generaattorin sähköistyskomponenteissa ei käytetä ruostumatonta terästä vaan piiterästä.

Taulukko 9. *Generaattori- ja vaihdelaatikkoyhdistelmään käytetyt materiaalit*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Copper, cathode {GLO}, market for	3,24	t
Cast iron {GLO}, market for	18,02	t
Steel, chromium steel 18/8 {GLO}, market for	40,55	t
Lubricating oil {RER}, market for	1,31	t
Aluminium, cast alloy {GLO}, market for	2,44	t

Generaattori-vaihdelaatikkoyhdistelmän oletettiin valmistettavan Vestaksen generaattoritehtaalla Travemündessa (Taulukko 10). Vestas on omilla verkkosivuillaan ilmoittanut generaattoritehtaansa sijaitsevan kyseisessä kaupungissa [79]. Valmiit generaattori-vaihdelaatikkoyhdistelmät oletettiin kuljetettavan rekalla Travemünden satamaan, josta komponentit kuljetettiin rahtilaivalla suoraan Vestaksen Lindon nasellitehtaalle.

Taulukko 10. *Generaattori-vaihdelaatikkoyhdistelmän kuljetusmatkat ja -välineet*

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
Generaattori & vaihdelaatikko tehdas, Travemünde – Travemünde satama	2,5	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)
Travemünde satama, Saksa - Lindo, Tanska	280	Rahtilaiva

Nasellin runko koostuu lähes täysin valuteräksestä (Taulukko 11). Runkoon käytetään myös jonkin verran lasikuitua. Lasikuidulle tehtiin oletus, että 10 % koko tuulivoimalan lasikuidusta liittyy nasellin ja keskiön komponentteihin. Tuulivoimalan kaikki sähkö- ja ohjauskomponentit sekä muuntajat päätettiin sijoittaa naselliin elinkaarimallin yksinkertaistamisen vuoksi. Lisäksi naselli sisältää tuulivoimalan jäähdytysjärjestelmiä. Nämä tarvitsevat jäähdytysaineita toimiakseen ja tätä työtä varten jäähdytysaineeksi valikoitui etyleeniglykoli. Vestaksen raporteissa jäähdytysnesteet ja glykolit oli yhdistetty yhdeksi

kokonaisuudeksi, joten tätä työtä varten yksinkertaistamisen vuoksi etyleeniglykolin valitseminen oli oikeutettu.

Taulukko 11. *Naselliin ja keskiöön käytetyt materiaalit*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Cast iron {RER}, production	54,05	t
Electronics, for control units {RER}, production	862,07	kg
Transformer, high voltage use {GLO}, market for	2,59	t
Ethylene glycol {GLO}, market for	551,72	kg
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RER}, production	4,19	t

Naselli ja keskiö oletettiin kuljetettavan laivarahdeilla suoraan kahteen eri satamaan Suomen päässä (Taulukko 12). Isojoen tuulivoimalalle oli järkevämpää rekkarahtien puolesta kuljettaa Rauman sataman kautta, kuin viedä ensiksi Raahen ja sieltä kuljettaa Isojoen tuulivoima-alueelle. Näin säästettiin noin 200 km rekkakuljetuksista.

Taulukko 12. *Nasellin ja keskiön kuljetusmatkat ja -välineet*

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
Lindo, Tanska – Rauman satama, Suomi (Isojoen voimala)	1 410	Rahtilaiva
Lindo, Tanska – Raahen satama, Suomi (Kalajoki ja Simo)	1 830	Rahtilaiva
Rauman satama – Isojoen tuulivoimala	165	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)
Raahen satama – Kalajoen tuulivoimala	50	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)
Raahen satama – Simon tuulivoimala	155	Rekka (Euro 4, >32 tonnia)

4.5.2 Kierrätyksen elinkaari-inventaario

Elinkaari-inventaariot täytyi tehdä myös eri kierrätysmenetelmille. Materiaalista riippuen, se joko kierrätettiin, poltettiin tai loppusijoitettiin kaatopaikalle. Seuraavissa taulukoissa kursivoidut ja alleviivatut komponentit merkkavat kierrätysmenetelmien eri vaiheita tai kierrätysjaetta.

Kemiallisen ja murskauskierrättämisen prosesseissa tehtiin merkittäviä yksinkertaistuksia tietojen puuttellisuuden vuoksi. Elinkaarimalli ei esimerkiksi huomionut ollenkaan, että minkälaisia kemikaaleja kemiallisen kierrätyksen prosessi käyttää, vaan prosessille yleistettiin kirjallisuuden perusteella energiankulutus kuvaamaan kaikkien käytettyjen materiaalien ja prosessien kuluttamista.

Lasikuidun kierrättäminen kemiallisella menetelmällä ei ole kovin tehokasta. Vain noin puolet lavan sisältämästä lasikuidusta pystytään käyttämään uudelleen lopun ollessa käyttökelpotonta Cousins et. al tutkimuksen mukaan [57]. Epoksihartsi taas tutkimuksen

mukaan saataisiin hyvin talteen käyttökelpoisena. Jopa 90 % materiaalista voidaan käyttää uudelleen. Lapojen kemiallisen kierrättämisen materiaali- ja prosessijakeet ovat esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. *Lavan kemiallisen kierrättämisen materiaali- ja prosessijakeet. Kursivointi merkitsee prosessivaihetta.*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Electricity, medium voltage {FI}, market for	975,66	GJ _e
<i>Lasikuidun erotus</i>	7,65	t
Glass fibre {RER}, production	3,81	t
Municipal solid waste {FI}, treatment of, incineration	3,84	t
<i>Epoksi hartsin erotus</i>	5,02	t
Epoxy resin {GLO}, market for epoxy resin	4,49	t
Municipal solid waste {FI}, treatment of, incineration	527,93	kg

Murskauskierrättämisen oletettiin tuottavan ja korvaavan valmista lasikuitua ja epoksi-hartsia markkinoilta (Taulukko 14). Todellisessa tilanteessa murskattu lasikuitukomposiitti on todella matalan arvon materiaali, jonka uudelleenkäyttömahdollisuudet ovat hyvin rajalliset. Mursketta voidaan käyttää muun muassa täyteaineena maarakentamisessa, lisäaineena betonin, etenkin klinkkerin valmistuksessa tai se voidaan polttaa suoraan energiaksi. Oletus korvaushyvityksestä jouduttiin tekemään käytössä olleen Si-maPro Classroom -version rajallisuuksien vuoksi. Mallista olisi tullut liian monimutkainen ja hidas toteuttaa, mikäli malliin olisi otettu mukaan esimerkiksi rinnakkaisprosessointi sementtiteollisuudessa.

Taulukko 14. *Lapojen murskauskierrättämisen materiaali- ja prosessijakeet*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Glass fibre {RER}, production	7,62	t
Epoxy resin {GLO}, market for epoxy resin	4,99	t
Municipal solid waste {FI}, treatment of, incineration	57,47	kg
Electricity, medium voltage {FI}, market for	3,80	GJ _e

Lapojen kierrätyksen oletettiin tapahtuvan Kuusakoski Oy:n Lapuan toimipisteellä. Sateelliittikuvien perusteella alueella on tilaa mahdolliselle laajentumiselle tuulivoimaloiden lapojen kierrätyksen suhteen, joten tulevaisuudessa kyseinen kierrätyskeskus pystyisi teoriassa toimia laajamittaisena tuulivoimaloiden lapojen kierrätyskeskuksena. Kuljetusmatkat ja -välineet ovat esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. *Lapojen kemiallisen ja murskauskierrättämisen kuljetusmatkat ja -välineet*

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
Isojoen tuulivoimala – Kuusakoski Recycling, Lapua	133	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Kalajoen tuulivoimala – Kuusakoski Recycling, Lapua	200	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Simon tuulivoimala – Kuusakoski Recycling, Lapua	155	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)

Lavat oletettiin poltettavan tuulivoimalaa lähimpänä olevalla jätteenpolttolaitoksella. Isojoen tuulivoimalan tapauksessa voimalaitokseksi valikoitui Westenergy, Simon ja Kalajoen tuulivoimaloiden tapauksessa Laanilan ekovoimalaitos (Taulukko 16). Polttoa varten tehtiin oletus, että jätteenpolttolaitokset ovat kykeneviä vastaanottamaan käytöstä poistetut lavat lähes kokonaisina. Lavat pilkottaisiin tuulivoimalan purun yhteydessä pienempiin osiin helpompaa kuljetusta varten. Tätä työtä varten polttoprosessin muita mahdollisia edeltäviä prosesseja kuten lapapalojen pienentämistä tai murskaamista ei mallinnettu elinkaarimallin yksinkertaistamisen vuoksi.

Taulukko 16. *Lapojen polttamisen kuljetusmatkat ja -välineet*

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
Isojoen tuulivoimala – Westenergy, Koivulahti	130	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Kalajoen tuulivoimala – Laanilan ekovoimalaitos, Oulu	130	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Simon tuulivoimala – Laanilan ekovoimalaitos, Oulu	80	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)

Kaikki käytön lopettamisen loppukuljetukset oletettiin tehtävän Euro 6 -päästöluokituksella rekoilla. Euro 6 -luokitus tuli voimaan syyskuussa 2014 [84]. Kyseinen luokitus on tuorein päästöluokitus, uudemman Euro 7 -päästöluokituksen tullessa voimaan 2025. Ecoinvent tietokannassa uusin saatavilla oleva päästöluokitus oli Euro 6. Euro 7 vastaisi todennäköisimmin kierrätyskenaariossa käytettävää rekkaa, mutta tietojen puutteellisuuden vuoksi työssä täytyi käyttää Euro 6 luokkaa. Kaikki käytön lopettamisen loppukuljetukset oletettiin tehtävän Euro 6 päästöluokituksella rekoilla. Muut kuljetukset on esitetty taulukossa 21.

Perustusten oletettiin olevan 95 %:sest kierrätettävissä (Taulukko 17). Murskatun betonin oletettiin kelpaavaan soramurskeeksi maarakentamista varten. Betonimurskeen mallintamiseen siis käytettiin ”Gravel, crushed, production” elinkaaritietoa Ecoinvent tietokannasta. Perustuksissa käytettyjen metallisten komponenttien oletettiin olevan uusio-

käytön kannalta käyttökelpoisia uusien materiaalien kuten ruostumattoman teräksen valmistamiseen. Metallisten komponenttien kuljetusmatkat ja -välineet on esitetty taulukossa 21. Betonimurskeelle ei tehty kuljetusoletuksia, sillä materiaalille on vaikeaa arvioida mahdollisia tulevaisuuden käyttökohteita. Oletettavasti kuitenkin materiaali käytettäisiin mahdollisimman paikallisesti. Perustuksissa oleva pieni määrä lasikuitua oletettiin poltettavan energiaksi ja käyttökelvoton betonimurske oletettiin luokiteltavan betonijätteenksi kaatopaikkaloppusijoitusta varten.

Taulukko 17. *Perustuksien kierrätyksen materiaali- ja prosessijae. Kursivointi merkitsee prosessivaihetta.*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
Kierrätykseen	1 743,72	t
Gravel, crushed {CH}, production	1 633,31	t
Steel, low-alloyed {GLO}, market for	101,88	t
Reinforcing steel {GLO}, market for	8,32	t
Aluminium, wrought alloy {GLO}, market for	119,36	kg
Copper, anode {GLO}, market for copper, anode	39,79	kg
Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}, treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery	82,32	kg
Waste concrete {Europe without Switzerland}, treatment of waste concrete, inert material landfill	91,78	t

Nasellin ja keskiön oletettiin olevan lähes täysin kierrätettävissä metalli- ja sähköistyskomponenttien suhteen. Lasikuitukomponentit ja jäähdytysnesteet oletettiin poltettavan energiaksi (Taulukko 18). Nasellin ja keskiön sisältämä lasikuitu jouduttiin polttamaan energiaksi siksi, että malli olisi yksinkertaisempi. Mikäli elinkaarimallin olisi toteuttanut siten, että lasikuitu erotettaisiin eri kierrätysmenetelmiä varten, malli olisi ollut aivan liian monimutkainen käytetylle SimaPro-versiolle. Todellisessa kierrätystilanteessa nasellin ja keskiön lasikuitu todennäköisesti kierrätettäisiin samoilla menetelmillä mitä tuulivoimalan lavat. Kierrätyskelvoton osa oletettiin olevan inerttiä ja täten se pystyttäisiin loppusijoittamaan kaatopaikalle. Tätä varten jouduttiin käyttämään Sveitsiin mallinnettua kaatopaikkaloppusijoittamista, sillä Suomen tietoja ei ollut saatavilla Ecoinvent-tietokannassa. Naselliin ja keskiöön liittyvät kuljetusmatkat ja -välineet ovat esitetty taulukossa 21.

Taulukko 18. *Nasellin ja keskiön kierrätyksen materiaali- ja prosessijae. Kursivointi merkitsee prosessivaihetta.*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
<i>Kierrätykseen</i>	<i>61,62</i>	<i>t</i>
Cast iron {RER}, production	53,51	t
Electronics, for control units {GLO}, market for	853,45	kg
Transformer, high voltage use {GLO}, production	2,56	t
Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}, treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery	4,69	t
<i>Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill</i>	<i>0,622</i>	<i>t</i>

Generaattori ja vaihdelaatikko koostuvat pääosin metalleista ja täten niiden oletettiin olevan lähes täysin kierrätettävissä (Taulukko 19). Vain komponentissa käytetyt voiteluaineet poltetaan energiaksi (Hazardous waste, for incineration). Generaattori ja vaihdelaatikko oletettiin kuljetettavan nasellin ja keskiön yhteydessä samaan kierrätyspaikkaan, Outokummun terästehtaalle Tornioon. Kuljetusmatkat ja -välineet ovat esitetty taulukossa 21.

Taulukko 19. *Generaattorin ja vaihdelaatikon kierrätyksen materiaali- ja prosessijae. Kursivointi merkitsee prosessivaihetta.*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
<i>Kierrätykseen</i>	<i>64,90</i>	<i>t</i>
Cast iron {GLO}, market for	17,84	t
Steel, chromium steel 18/8 {GLO}, market for	40,15	t
Copper, cathode {GLO}, market for	3,21	t
Aluminium, cast alloy {GLO}, market for	2,41	t
Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}, treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery	1,30	t
<i>Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill</i>	<i>0,66</i>	<i>t</i>

Tornin oletettiin olevan 96-prosenttisesti kierrätettävissä (Taulukko 20). Kaikki tornin metalliset komponentit oletettiin kuljetettavan samaan paikkaan kierrätystä varten. Kuljetusvälineet ja kuljetusmatkat ovat esitetty taulukossa 21. Tornin sisältämät maalit ja lakat oletettiin poltettavan energiaksi (Hazardous waste, for incineration). Elinkaarimallin yksinkertaistamisen vuoksi työssä ei mallinnettu erillistä prosessia lakkojen ja maalien poistoa varten. Tornimoduulien sulattamisen Outokummun tehtaalla oletettiin sisältävän prosessin maalien ja lakkojen energiahyödyntämiselle. Tehdas hyödyntää vuodessa suuren määrän kierrätysterästä, joten oletettavasti tehtaalla on omat prosessit erilaisten pinnoitteiden poistamiseen.

Taulukko 20. *Tornimoduulin kierrätyksen materiaali- ja prosessijae. Kursivointi merkitsee prosessivaihetta.*

Komponentti	Määrä	Yksikkö
<i>Kierrätykseen</i>	131,92	t
Steel, low-alloyed {GLO}, market for	130,26	t
Permanent magnet, for electric motor {GLO}, market for permanent magnet, for electric motor	55,17	kg
Aluminium, cast alloy {GLO}, market for	1 448,83	kg
Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}, treatment of hazardous waste, hazardous waste incineration, with energy recovery	154,48	kg
<i>Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill</i>	5,50	t

Nasellin ja keskiön metalliset komponentit oletettiin kuljetettavan Outokummun terästehtaalle Tornioon. Tehdas on Euroopan suurimpia kierrätysteräksen hyödyntäjiä, jopa 85 prosenttia tuotetusta teräksestä koostuu kierrätetyistä metalleista. Terästehtaan nykyinen tuotantokapasiteetti on noin 1,6 miljoona tonnia ruostumatonta terästä vuodessa, joten tehdas on todennäköisesti tulevaisuudessa kykenevä vastaanottamaan tuulivoimalan metallisia komponentteja. [47]

Elektroniikka- ja sähkölaitteet oletettiin kuljetettavan Vestaksen Lindon tehtaalle takaisin uusiokäyttöä varten. Sähköistyskomponenttien oletettiin tässä työssä olevan mahdollista uusiokäyttää uusissa tuulivoimaloissa tai varaosiksi vanhoihin tuulivoimaloihin. Komponentit oletettiin kuljetettavan rekoilla ja lautoilla. Isojoen tuulivoimalan sähköistyskomponentit oletettiin kuljetettavan rekalla Naantalın kautta lautalla Ruotsiin ja sieltä lopuksi pelkällä rekalla Lindon tehtaalle. Kalajoen ja Simon tapauksessa komponenttien oletettiin kuljetettavan Vaasa–Uumaja-lauttareitin kautta.

Taulukko 21. Tornin, nasellin ja keskiön kuljetusmatkat ja välineet kierrätykseen.

Matkaetappi	Etäisyys [km]	Kuljetusväline
<i>Metalliset komponentit</i>		
Isojoen tuulivoimala – Outokummun tehdas, Tornio	565	Rekka (Euro 6, >32 tonnia)
Kalajoen tuulivoimala – Outokummun tehdas, Tornio	260	Rekka (Euro 6, >32 tonnia)
Simon tuulivoimala – Outokummun tehdas, Tornio	60	Rekka (Euro 6, >32 tonnia)
<i>Elektroniikka- ja sähkölaitteet</i>		
Isojoen tuulivoimala – Lindo, Tanska	1 130	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Kalajoen tuulivoimala – Lindo, Tanska	1 660	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Simon tuulivoimala – Lindo, Tanska	1 890	Rekka (Euro 6, 16–32 tonnia)
Naantali, Suomi – Kapellskär, Ruotsi (Isojoen voimalan komponentit)	206	Rahtilautta
Vaasa, Suomi – Uumaja, Ruotsi (Kalajoen ja Simon voimaloiden komponentit)	96	Rahtilautta

4.6 Kyselytutkimus

Työssä toteutettiin kysely tuulivoimarakentamiseen osallistuvilla sidosryhmillä. Kysely toteutettiin käyttäen Microsoft Forms -palvelua. Kyselyn tarkoituksena oli kartoittaa eri toimijoiden mielipiteitä ja näkemyksiä kestävyys-suhteen. Kyselyä ei toteutettu anonymisti, vaan kyselyssä kysyttiin jokaiselta vastaajalta, mitä yritystä vastaaja edusti. Kyselytutkimus päätettiin kuitenkin lopulta anonymisoida siltä osin, että yritysten nimiä ei kerrota. Kyselytutkimuksen rakenne oli liitteen B mukainen.

Kyselytutkimus lähetettiin sähköpostilla yhteensä 29 yritykselle, joidenka pääasialliset toimenkuvat tuulivoima-alalla on hankekehityksen, omistajuuden, rakennuttajuuden, konsultoinnin ja laitevalmistajana toimimisen piirissä. Yrityksiltä kysyttiin heidän yrityksensä roolista tuulivoima-alalla sekä heidän näkemyksiään tuulivoimaloiden purkujätteen loppukäsittelyyn liittyen. Lisäksi kyselyssä tiedusteltiin, onko yrityksillä olemassa olevia suunnitelmia tuulivoimaloiden kierrätykseen, ja minkälaisena he näkevät kierrätyksen taloudelliset vaikutukset. Kysely lähetettiin pääosin yrityksille, jotka ovat toimineet alalla jo pidempään tai ovat olleet alan pioneereja Suomessa.

Kyselyssä vain kysymykset 1–3 olivat pakollisia. Kaikki muut kysymykset olivat vapaaehtoisia. Kysymys 3 oli ainoa monivalintakysymyksistä, joihin sai valita useamman vaihtoehdon, sillä tuulivoima-alalla toimii yrityksiä, joiden toimenkuva ei rajoitu vain yhteen. Osiin kysymyksistä pyydettiin tarkentavia vastauksia vastaajilta.

Kyselytutkimuksen vastaukset käsiteltiin kysymyskohtaisesti. Niistä analysoitiin yritysten näkemyksiä sekä tehtiin tulkintoja siitä, mikä olisi tuulivoima-alalle edukkainta, kun tuulivoimaloita aletaan purkamaan laajemmin tulevaisuudessa.

Kyselytutkimuksen suunnittelussa ja toteutuksessa huomioitiin tutkimusetiikka ja tietosuojakäytännöt. Vastaajille tarjottiin tietosuojailmoitus (Liite C), joka selvensi kerättävien tietojen käyttötarkoitusta ja vastaajien oikeuksia liittyen heidän antamiinsa tietoihin. Tietosuojailmoituksessa oli ilmoitettu rekisterinpitäjä, yhteyshenkilö tutkimusrekisteriä koskevissa asioissa, sekä tutkimuksen suorittajat.

5. TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA

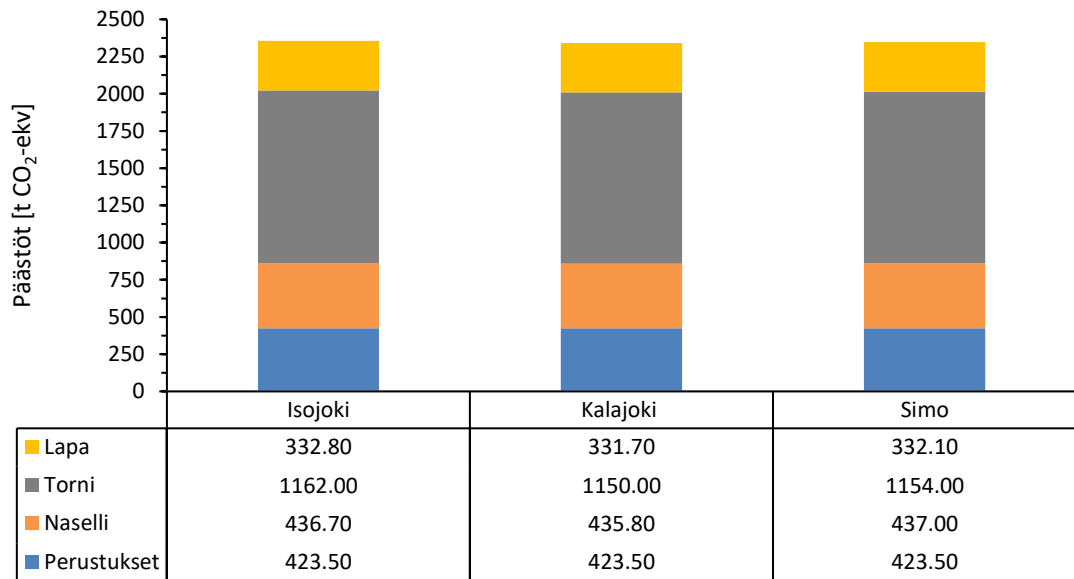
Liitteessä A on esitetty tarkasteltujen tuulivoimaloiden sekä niiden kierrättämisen elinkaariverkostot. Luvussa 5.1 käsitellään liitteistä tärkeimmät tiedot ja tulokset elinkaaren hiilijalanjäljen sekä ympäristövaikutuksien näkökulmasta. Luvussa 5.2 käsitellään kustannusmallinnuksen tuloksia, jonka jälkeen käsitellään sen virhearvioita. Luvussa 5.3 käsitellään toteutetun kyselyn vastauksia. Viimeiseksi luvussa 5.4 pohditaan saatujen tuloksien käypäisyyttä ja jatkotutkimuksen tarpeita.

5.1 Elinkaariarvioinnin tulokset

Tuulivoimalan lapojen kierrätysmenetelmällä on huomattava merkitys tuulivoimalan elinkaaren hiilijalanjälkeen sekä ympäristövaikutuksiin (Kuvat 25–32). Toisaalta voimaloiden valmistamisessa ja kuljetuksessa tuotantopaikoille ei ole kovin suurta eroavaisuutta voimaloiden välillä (Kuva 22). Suurin vaikutustekijä yksittäisen tuulivoimalan elinkaaren hiilijalanjäljessä on kuitenkin elinkaaren aikana tuotettu energiamäärä. Tuulivoimalan sijainnin tuuliolosuhteet vaikuttavat oleellisesti siihen, että kuinka paljon energiaa tuotetaan. Tällöin elinkaaren hiilijalanjälki pienenee mitä enemmän voimalalla tuotetaan energiaa, sillä elinkaaren hiilijalanjäljen yleisesti käytetyssä yksikössä $\text{g CO}_2/\text{kWh}$ tuotettu energiamäärä toimii nimittäjänä eli jakajana. Työssä tarkastelluilla sijainneilla energiantuotanto-odotuksissa oli suurimman ja pienimmän välillä noin 12 % eroa, mikä aiheutti pääosin sen, että isoimman ja pienemmän elinkaaren hiilijalanjäljen välillä oli noin 14 % eroa. LCA:n tuloksista on myös havaittavissa, että joissain tapauksissa kierrättämisestä koituu elinkaaren aikana lisäpäästöjä. Näitä ei kuitenkaan tule huomioida negatiivisina asioina, sillä lähtökohtaisesti kaikista prosesseista koituu aina ympäristövaikutuksia. Kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti materiaaleja ja tuotteita tulisi aina uusioikäyttää tai kierrättää toissijaisiin tarkoituksiin. Näin vähennetään ylikulutusta ja neitseellisten luonnonvarojen kulutusta.

Tässä työssä perustuksien valmistusta paikan päällä tarkasteltiin vain hyvin yksinkertaisesti. Mikäli perustuksiin tuleva materiaali tulee kauempaa kuin paikallisilta toimijoilta, voivat perustuksien päästöt kasvaa huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että perustukset ovat ylivoimaisesti tuulivoimalan painavin komponentti ja täten tarvitsee suurimman määrän kuljetuksia rekkojen ja tiestön rajallisten kantavuuksien vuoksi. Tässä työssä perustuksien kohdalla päädyttiin jättämään kuitenkin perustuksien kuljetukset huomiomatta, sillä perustuksien rakentajayrityksien valmistajatietoja ei ole julkisesti saatavilla.

Tuulivoimaloiden perustuksien rakentajat voivat toimia myös muualla rakennusteollisuudessa, jolloin yrityksen päätoiminen toimenkuva voi olla muualla kuin tuulivoimarakentamisessa.



Kuva 22. Komponenttikohtaiset osuudet kokonaispäästöistä rakentamisvaiheessa.

Kuljetuksien osuus kokonaispäästöistä tuulivoimalan valmistamisesta ja kuljetuksesta tuotantopaikoille oli hyvin pieni, noin 3–4 % päästöistä (Taulukko 22). Lukemassa ei tosin ole huomioitu mahdollisia perustuksiin liittyviä kuljetuksia. Mikäli perustuksien kuljetukset huomioitaisiin, olisivat kuljetuksien kokonaispäästöt suuremmat, mutta vaikutus kokonaispäästöihin olisi maltillinen. SimaPro:lla yksinkertaisesti mallintamalla perustusten betonin kuljetuksia, kuljetusten osuus kokonaispäästöistä nousisi noin 5 %-yksikköön mikäli betoni kuljetettaisiin 100 km etäisyydeltä ja noin 7 %-yksikköön mikäli betoni kuljetettaisiin 300 km etäisyydeltä.

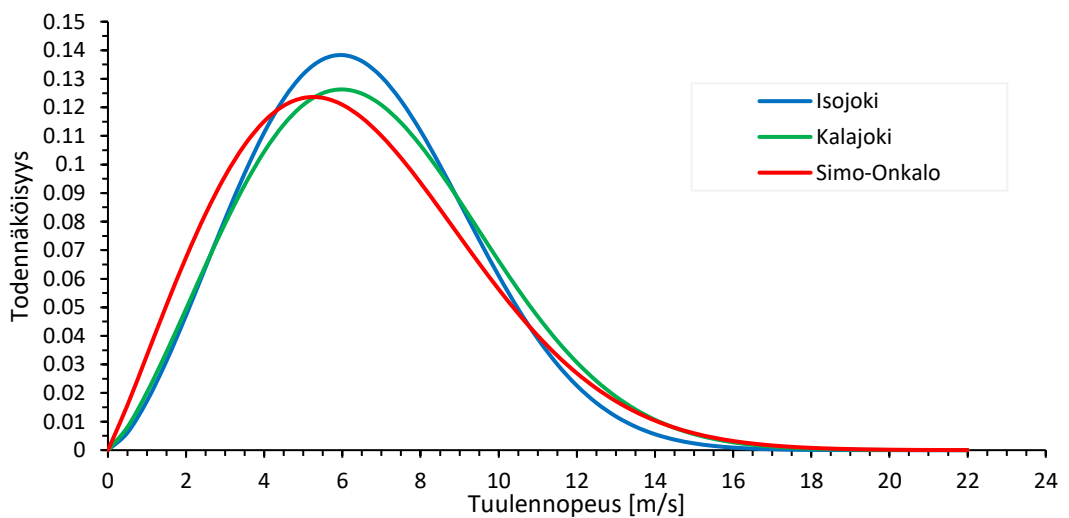
Taulukko 22. Kuljetuksien päästöt tuulivoimalan rakentamisvaiheessa. Lukemissa ei ole huomioitu perustuksia.

Kuljetusmenetelmä	Isojoki [t CO2-ekv]	Kalajoki [t CO2-ekv]	Simo [t CO2-ekv]
Rekka	16,84	2,70	8,40
Laiva	35,09	35,44	35,44
Raide	36,85	36,85	36,85
Yhteensä	88,78	74,99	80,33
Kuljetuksien osuus kaikkien päästöjen kokonaismäärästä	3,77 %	3,20 %	3,42 %

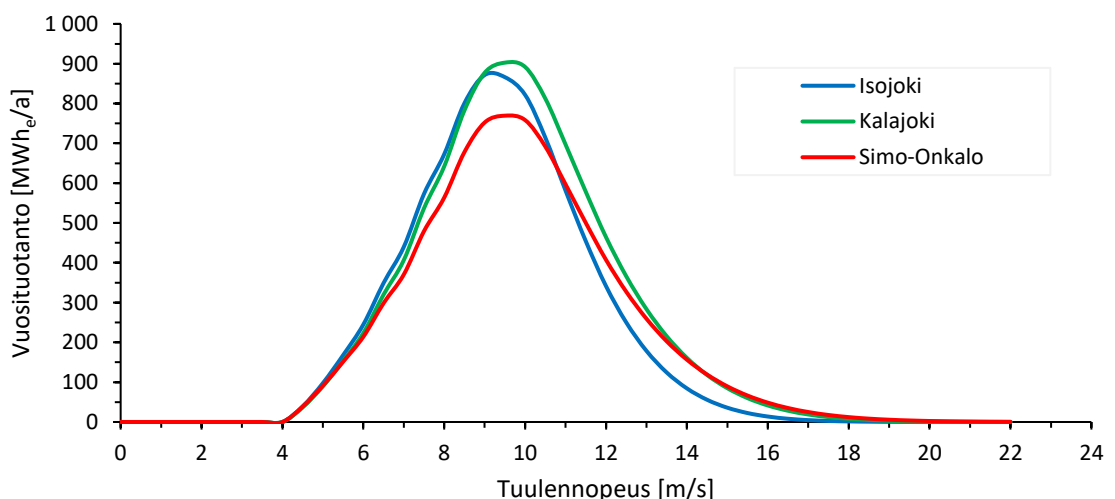
Taulukosta 22 voidaan huomata, että rekkakuljetuksien päästöt kasvavat merkittävästi riippuen siitä, että mihin satamaan komponentit kuljetetaan. Isojoen voimalan torni ja lavat kuljetettiin Raahen sataman kautta, jonka myötä kuljetuskilometrejä rekalla kertyi

muihin voimaloihin verrattuna enemmän. Vaikka Isojoen voimala-alueelle kuljettamisesta koitui eniten päästöjä muihin verrattuna, ei kuljetusten vaikutus tuulivoimalan kokonaispäästöihin ollut kovinkaan merkittävä. Jos kuljetuksien osuutta tuulivoimalan kokonaispäästöistä verrataan keskenään eri sijaintien kesken, voidaan huomata, että sijainti vaikuttaa vain 0,57 %-yksikköä (3,20 % vs. 3,77 %).

Valitut tuulivoimalasijainnit perustuivat suurimpien tuulivoimakeskittymien alueille. Alueiden energiantuotanto-odotuksissa oli selvää eroa, joka näkyy myös elinkaaren hiilijalanjäljen tuloksissa. Kalajoen voimalalle 20 vuoden energiantuotto oli noin 197 GWh, Isojoen voimalalle 177 GWh ja Simon voimalalle 175 GWh (Kuva 23 ja Kuva 24). Tämän vuoksi voimaloiden välillä oli huomattavaa eroa elinkaaren hiilijalanjäljissä (Kuva 28).



Kuva 23. Tarkasteltujen voimalasijaintien tuulennopeuden Weibull-jakaumat

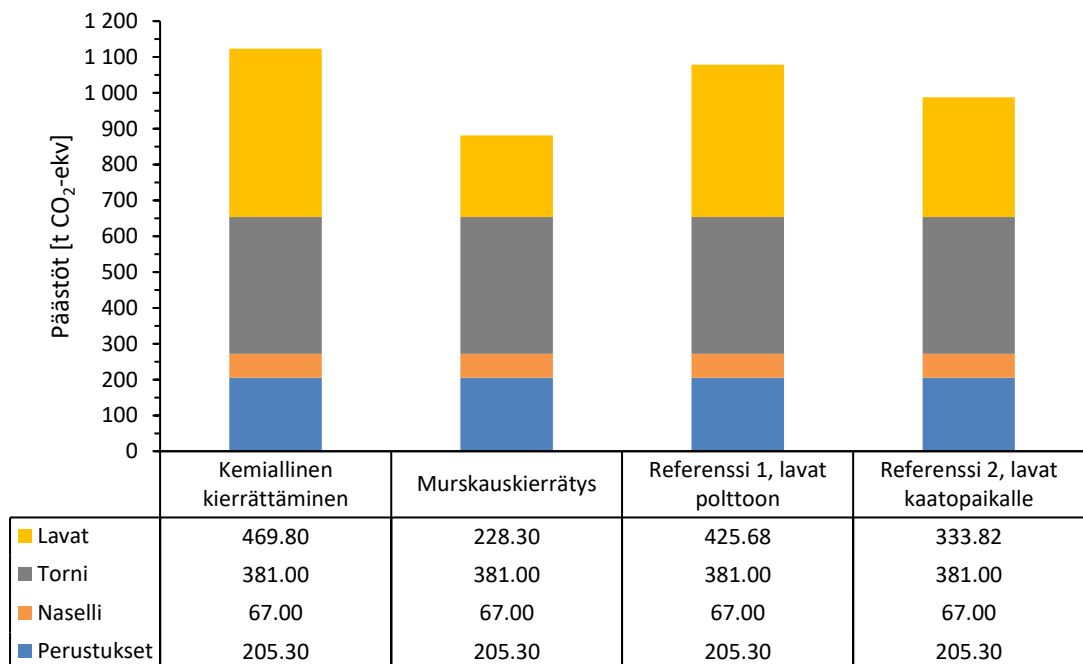


Kuva 24. Tarkasteltujen voimalasijaintien vuosittainen tuotantojakauma

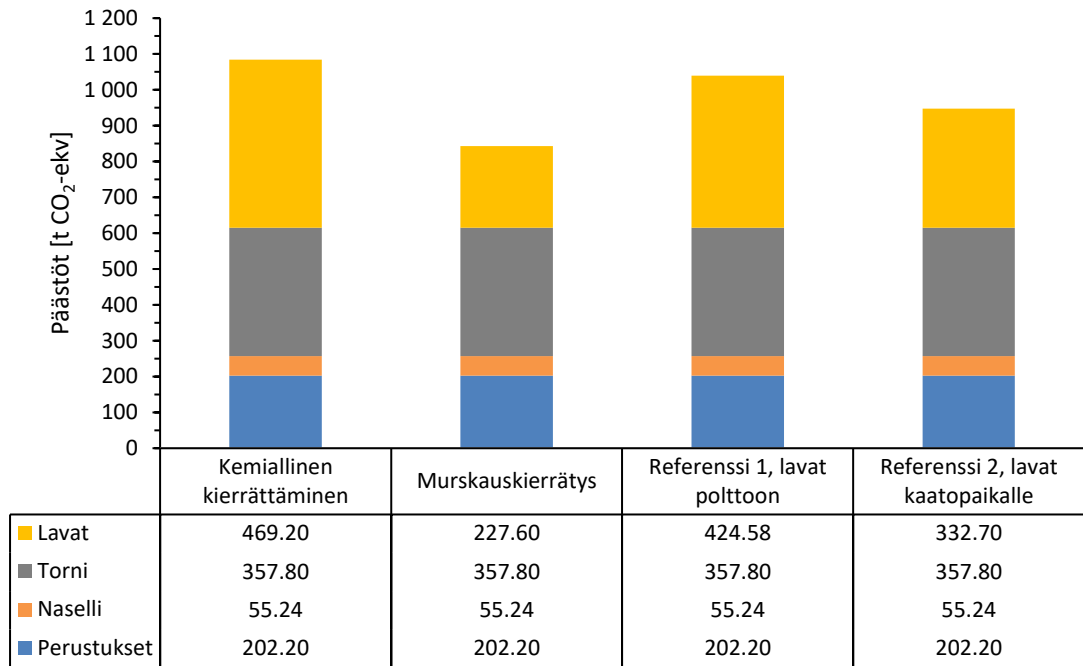
Tuulivoimalan komponenteille asettamalla komponenttikohtaisesti kierrätyshyvitykset käytön päättyessä saatiin vaihtelevia tuloksia (Taulukko 23 ja Kuvat 25–27). Naselliin kohdistui merkittävän suuri määrä kuljetuksista kuormitusta. Naselli mallinnettiin kuljetettavan Isojoelta Outokummun Tornion tehtaalle, jolloin kuljetuskilometrejä tuli yli 500 km (Taulukko 21). Kuljetuksien päästövaikutukset eivät kuitenkaan olleet kierrätyshyvityksen tapauksessakaan merkittävin tekijä kokonaispäästöissä. Voimalasijaintien vertailussa taulukossa 23 voidaan havaita, että kuljetuksien vaikutus on noin 4 % voimaloiden välillä. Kuljetukset ovat loppukäsittelyvaiheessa ainoa merkittävä eroavaisuus voimaloiden välillä. Eri kierrätysmenetelmien elinkaaren päästöissä oli eroavaisuutta Isojoen voimalan tapauksessa 27,39 %, Kalajoen 28,67 % ja Simon 28,19 %. Jokaisen voimalan tapauksessa lapojen kemiallisesta kierrättämisestä koitui suurimmat päästöt ja murskauskierättämisestä pienimmät.

Taulukko 23. *Suurimman ja pienimmän päästön eroavaisuudet kierrätyshyvityksien jälkeisten komponenttien elinkaaren aikana voimalasijaintien välillä.*

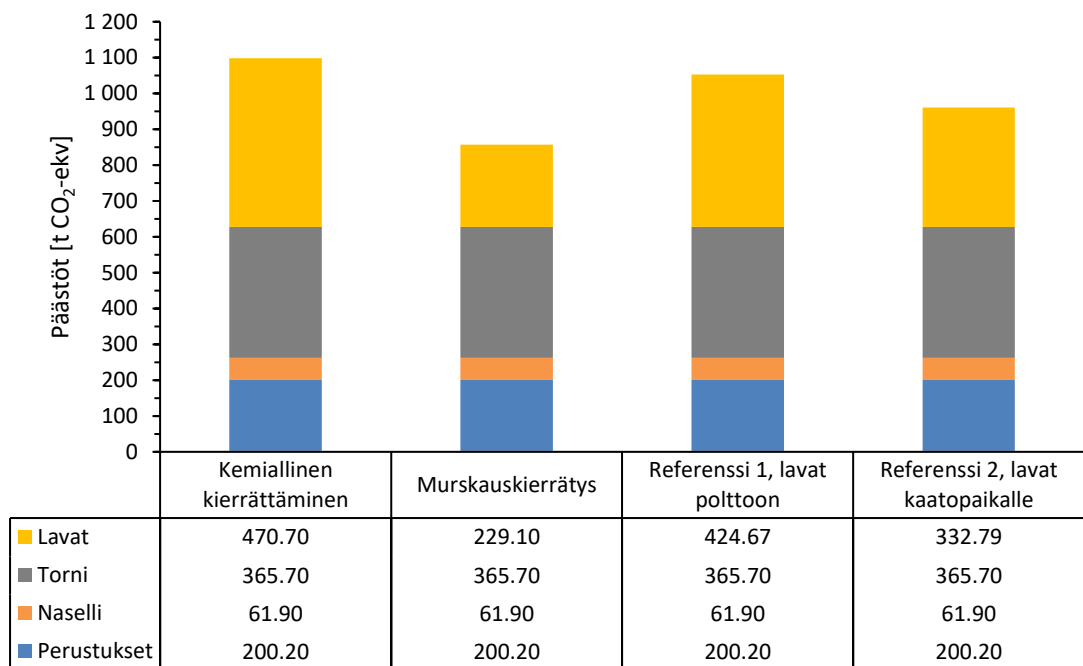
Komponentti	Kemiallinen kierrättäminen	Murskauskierätys	Energiaksi polttaminen	Kaatopaikkajätteenkierrätys
Perustukset	2,55 %	2,55 %	2,55 %	2,55 %
Naselli	21,29 %	21,29 %	21,29 %	21,29 %
Torni	6,48 %	6,48 %	6,48 %	6,48 %
Lavat	0,32 %	0,66 %	0,26 %	0,34 %
Kokonaispäästöt	3,57 %	4,60 %	3,77 %	4,13 %



Kuva 25. *Isojoen tuulivoimalan komponenttikohtaiset päästöt, kun komponenteille on asetettu kierrätyshyvitys.*



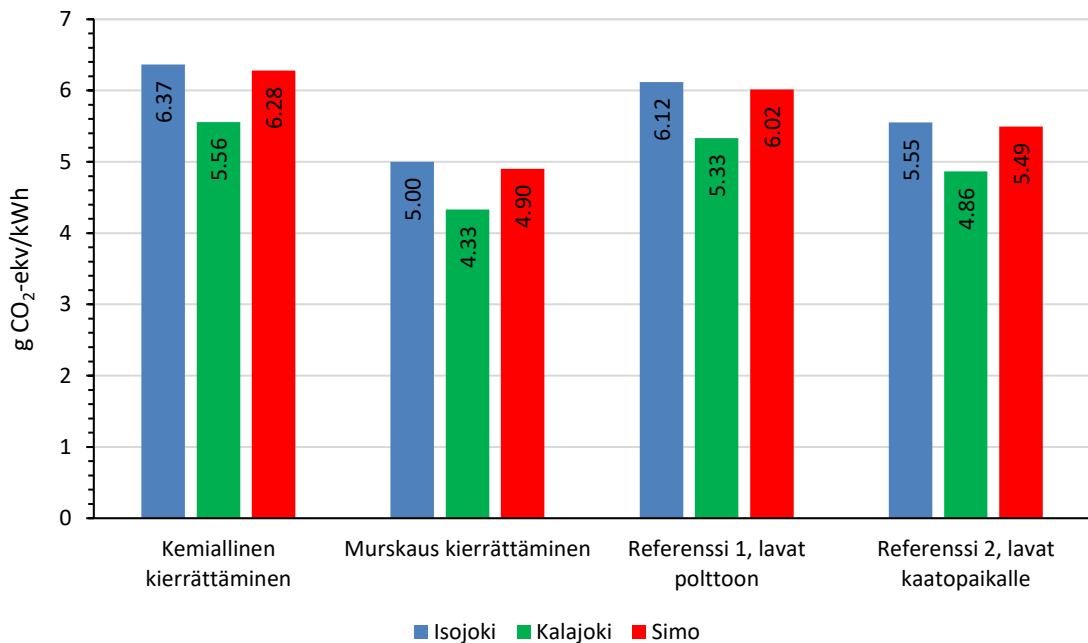
Kuva 26. Kalajoen tuulivoimalan komponenttikohtaiset päästöt, kun komponenteille on asetettu kierrätysyhyvitys.



Kuva 27. Simon tuulivoimalan komponenttikohtaiset päästöt, kun komponenteille on asetettu kierrätysyhyvitys.

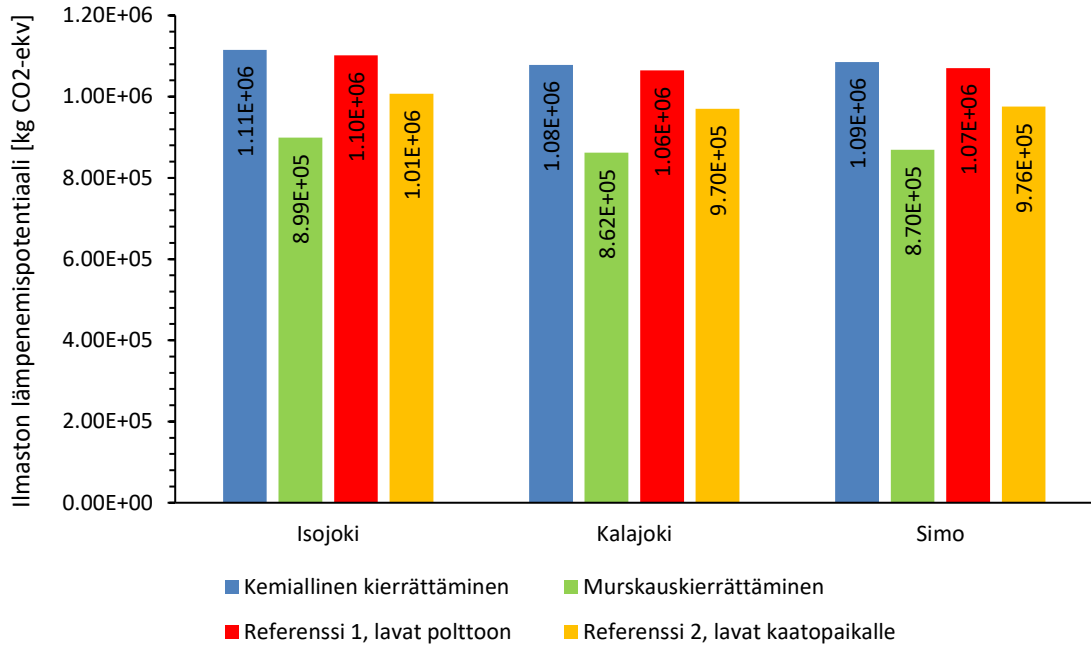
Elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttaa eniten voimalalla tuotettu energiamäärä. Tuulivoimalan rakentamisesta koituvien päästöjen eroavaisuus sijaintien kesken oli vain noin 0,60 %, kun taas sijaintien välisissä energiantuotanto-odotuksissa oli jopa 12,35 % eroa. Sijainnin vaikutus tuulivoimalan kokonaiselinkaaren hiilijalanjälkeen oli keskimäärin noin 15 % (Kuva 28). Pienin ero oli kemiallisen kierrättämisen tapauksessa, jolloin sijainnin

vaikutus oli noin 14 %. Suurin ero taas oli murskauskierrättämisellä, milloin ero oli noin 16 %. Kierrätysmenetelmien noin yhden prosenttiyksikön eroon vaikuttaa pääosin menetelmien energiankäytön ero. Lavan kemiallisessa kierrätyksessä käytetty 77 MJ/kg energiantarve tuo huomattavaa kuormitusta ympäristöön verrattuna murskauskierrätyksen 0,3 MJ/kg energiantarpeeseen. Kemiallisella kierrätyksellä saadaan kuitenkin paljon parempaa materiaalia uusiokäyttöön. Lasikuitua ja hartsimateriaalia voidaan hyvin rajallisesti käyttää hyväksi murskauskierrättämisellä. Lähtökohtaisesti murskaamalla saadaan erittäin matala-arvoista materiaalia, jota voidaan käyttää hyväksi vain polttoaineena tai lisäaineena esimerkiksi betonin valmistuksessa. Kemiallisella kierrättämisellä uusiokäyttöpotentiaali voi jopa ylittää siihen, että lasikuitua ja hartsia käytetään uudestaan uusien lapojen tai muiden lasikuitukomposiittien valmistamisessa.

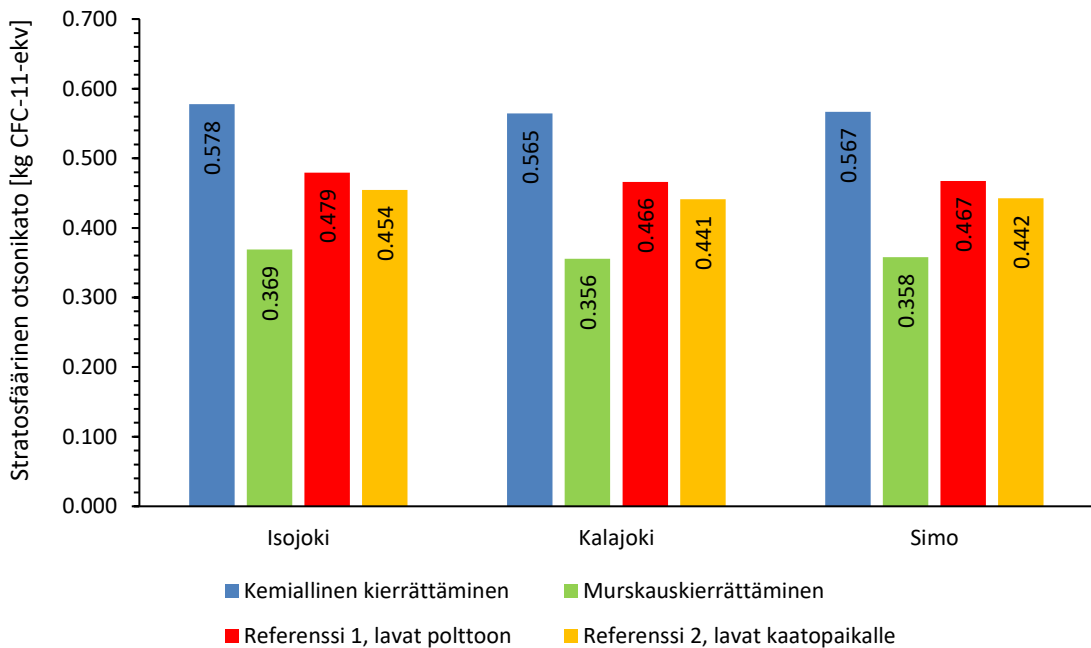


Kuva 28. Tuulivoimalan ja perustuksien elinkaaren hiilijalanjälki eri lapojenkäsittelymenetelmillä.

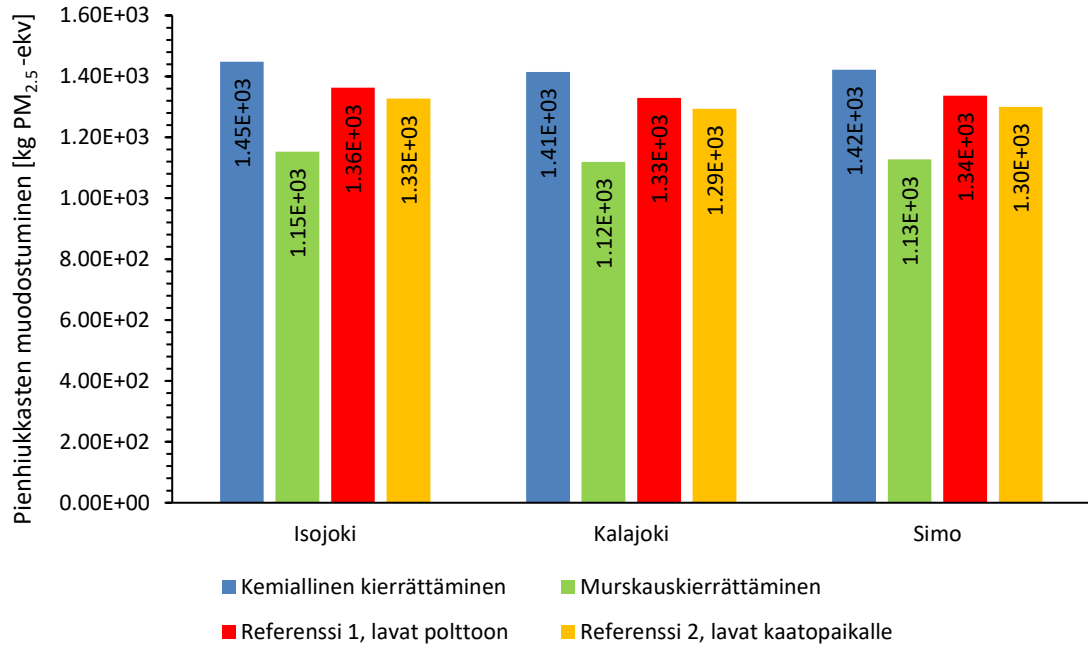
LCA:ta varten valittiin tarkasteltaviksi eräitä ympäristövaikutuskategorioita. Tuulivoimaloiden ympäristövaikutuskategorioiden vertailu eri lapojenkäsittelymenetelmillä ovat esitetty kuvissa 29–32.



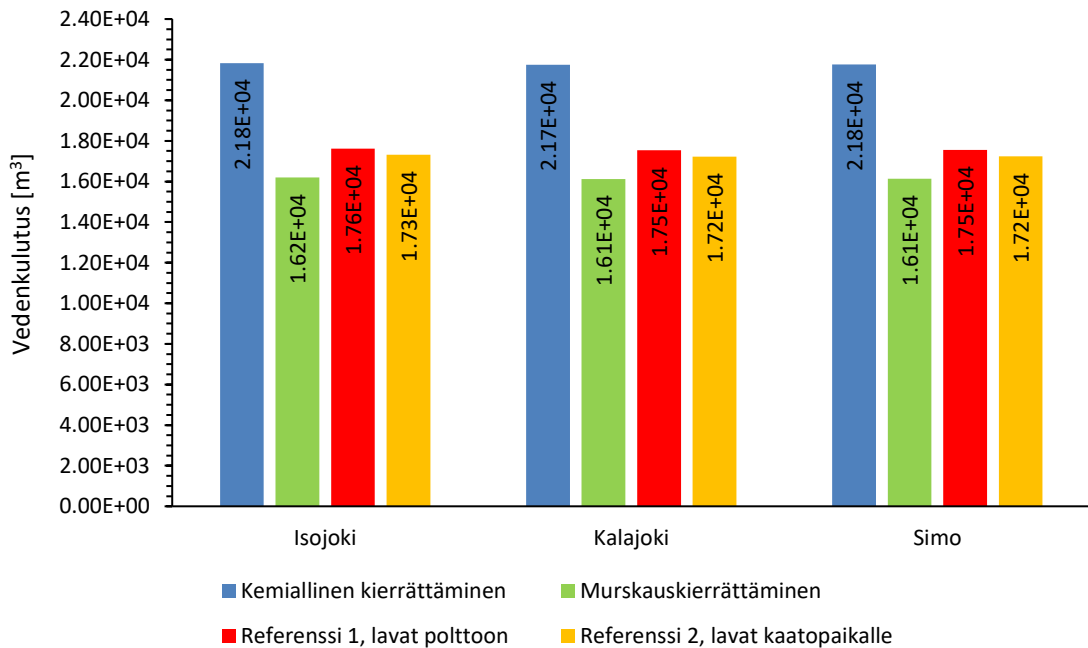
Kuva 29. Ilmaston lämpenemispotentiaali eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.



Kuva 30. Stratosfäärinen otsonikato eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.



Kuva 31. Pienhiukkasten muodostuminen eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä.



Kuva 32. Vedenkulutus eri sijaintien ja kierrätysmenetelmien välillä

Vaikutuskategorioista voidaan nähdä, että tällä hetkellä murskauskierrättäminen on ympäristön kannalta paras vaihtoehto. Kierrätysmenetelmällä on jokaisessa valitussa vaikutuskategoriassa pienin ympäristövaikutus. Vastaavasti voidaan nähdä, että lapojen kemiallisella kierrättämisellä on suurimmat ympäristövaikutukset. Vaikka kierrätysmene-

telmällä onkin suuremmat vaikutukset verrattuna helpommin toteutettaviin vaihtoehtoihin, on menetelmän kiertotalousindeksi nykytiedon mukaan merkittävästi parempi. Lisäksi kemiallinen kierrättäminen on teoriassa kuvassa 12, esitetyn jätehierarkian mukaisesti parempi vaihtoehto verrattuna muihin.

Elinkaariarvioinnin kaikissa tuloksissa täytyy ottaa huomioon, että tulokset ovat absoluuttisia, eivätkä ota huomioon sitä, että kun tuulivoimaa rakennetaan, se todennäköisesti korvaa jotain toista energiantuotantomenetelmää. Jos elinkaariarvioinnissa olisi huomioitu, että tuulivoimala korvaisi jotain toista energiantuotantomenetelmää, kuten esimerkiksi maakaasua, olisi tuulivoimalan rakentaminen ympäristöpositiivista. Ympäristöpositiivisuus aiheutuu eri energiantuotantomenetelmien päästökertoimista. Tuulivoimalle yleinen hiilijalanjälki on noin 6–10 g CO₂-ekv/kWh, kun taas maakaasulle se on noin 128–434 g CO₂-ekv/kWh.

Elinkaariarvioinnissa on havaittavissa eroa muihin tutkimuksiin tuulivoimaloiden päästöistä. Tulokset eroavat Vestaksen omista ja Etha Windin tutkimuksista. Ero on pahimmillaan noin 31,6 % tämän tutkimuksen hyväksi elinkaaren päästöjen kannalta, kun verrataan hyvin samankaltaiseen Vestaksen tutkimukseen. Etha Windin tutkimuksessa käytetty tuulivoimala on toisaalta suurempi ja myös malliltaan huomattavasti uudempi, joten sen käyttöikä on pidempi. Vestaksen tutkimuksessa yhden voimalan hiilijalanjälki oli 6,4 g CO₂-ekv/kWh, kun Etha Windin tutkimuksessa yhden voimalan hiilijalanjälki oli 6,9 g CO₂-ekv/kWh 35 vuoden käyttöiällä ja noin 12,0 g CO₂-ekv/kWh 20 vuoden käyttöiällä [4], [73]. Vestaksen tutkimuksessa suuret yksimateriaaliset osat kuten torniosat ja valurautaosat nasellissa oletettiin kierrätettävän 98-prosenttisesti ja muut pääkomponentit kuten generaattori, vaihdelaatikko, kaapelit sekä pitch- ja yaw-järjestelmät oletettiin kierrätettävän 95-prosenttisesti [4]. Tuulivoimalan muut osat oletettiin Vestaksen tutkimuksessa kierrätettävän taulukon 24 mukaisesti.

Taulukko 24. Vestas V126 LCA:n kierrätysjäte [4].

Materiaali	Loppukäsittely
Teräs	92 % kierrätykseen ja 8 % kaatopaikalle
Alumiini	92 % kierrätykseen ja 8 % kaatopaikalle
Kupari	92 % kierrätykseen ja 8 % kaatopaikalle
Polymeerit	50 % polttoon ja 50 % kaatopaikalle
Voiteluaineet	100 % polttoon ilman energiantalteenottoa
Muut materiaalit mukaan lukien betoni	100 % kaatopaikalle

Vestaksen tutkimuksessa käytettiin todella yksityiskohtaisia tietoja komponenteista. Vestas V126-3.45MW tuulivoimalamallin LCA raportissa todetaan, että LCA toteutettiin tuo-

malla tuulivoimalamallin täydellisen materiaaliluettelon GaBi elinkaarimallinnusohjelmaan. Raportissa todetaan, että materiaaliluettelossa on noin 25 000 osaa yhtä tuulivoimalaa kohti. Lisäksi materiaaliluettelo sisältää jokaisen osan valmistusprosessien tiedot, mikä tarkoittaa sitä, että Vestaksen tuottama LCA on paljon tarkempi verrattuna tähän työhön. [4, ss. 40–41] Tässä työssä komponentit ovat vain yleistetty tietynlaisiksi materiaalikoostumuksiksi, jotka ostetaan vapailta markkinoilta ja prosessit määritellään tapauskohtaisesti. Yleistys jouduttiin tekemään yliopiston omistaman SimaPro Classroom lisenssin rajallisten ominaisuuksien ja kyvykkyyksien takia. Vaikka tässä työssä toteutettu elinkaarimalli on hyvin yksinkertainen, oli se hyvin raskas pyörittää. Työn teon aikana oli monesti vaiheita, jolloin elinkaarimallin avaaminen SimaPro Classroom ohjelmalla kesti 1,5 tuntia ja ohjelma kaatui erittäin herkästi muuttaessa mallinnusparametreja.

Vestaksen tutkimuksissa käytettiin myös eri elinkaaritietokantaa tähän työhön verrattuna. Vestaksen V126-3.45MW mallin LCA raportissa käytettiin Thinkstep 2016 tietokantaa, kun tässä työssä käytettiin Ecoinvent 3.8 tietokantaa. Lisäksi Vestaksen tutkimuksissa on käytetty eri keskipistekarakterisointia verrattuna tähän työhön. Tässä työssä käytettiin ReCiPe Midpoint (H) karakterisointia kun Vestas on käyttänyt CML (2016) karakterisointia. Tietokantojen ja karakterisointimethodien valinnalla on suuri merkitys LCA:sta saataviin tuloksiin. Pauer et al. (2020) mukaan Ecoinvent tietokantaa käyttämällä useimmiten ympäristövaikutukset ovat merkittävästi korkeammat verrattuna muihin tietokantoihin [85]. Tämän vuoksi tämän työn tuloksia tulee tarkastella vain suuntaa antavina eikä totuuksina.

Betonin osalta Vestas käytti kolmea eri laatuluokitusta, C12, C30 ja C45 [4, s. 102], kun taas tämä työ nojasi SimaPro:n Ecoinvent tietokannan ”Concrete, sole plate and foundation” -datasettiin, mikä vaikutti sopivimmalta vaihtoehdolta kuvaamaan perustuksien betonia. Tällä voi olla suuri vaikutus päästöissä, koska betonia käytetään suuri määrä perustuksissa, eikä betonin tarkasta laadusta ole tietoa Ecoinvent 3.8 tietokannassa. Tietokannassa todetaan, että perustukseen voi käyttää CEM I, CEM II/A tai CEM II/B luokan betonia, ja että betonityyppi on soveltuva paalutusperustuksiin kuivissa sekä märissä ja vaativissa olosuhteissa [86].

Komposiittimateriaalien osalta Vestas käytti datasettejä kuten ”Epoxy resin ts” ja ”Glass fibres ts”. Tässä työssä käytettiin Ecoinvent 3.8 kirjastossa ollutta ”Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded” datasettiä. Käytetyssä SimaPro versiossa tämä vaikutti parhaimmalta vaihtoehdolta työtä varten. Muuhun kirjallisuuteen verrattuna päästöt olivat lapojen kohdalla hyvin samanlaiset. Tässä tutkimuksessa yhden lavan valmistamisesta koituu noin 100 t CO₂-ekv päästöjä, kun Morini et al. (2021) tutkimuksessa

samankokoisen lavan päästöt olivat 111,6 t CO₂-ekv [58]. Diez-Cañamero & Mendozan (2023) tutkimuksessa käytettiin eri tuulivoimalavalmistajan mallia, joka oli myös kooltaan suurempi. Tässä työssä käytettiin 126 m roottorihalkaisijan tuulivoimalaa, kun heidän tutkimuksessaan käytettiin 145 m roottorihalkaisijan voimalaa. Diez-Cañamero & Mendozan LCA:ssa yhden lavan hiilijalanjäljeksi tuli noin 150–250 t CO₂-ekv riippuen lavan loppukäsittelymenetelmästä.

5.2 Kustannuslaskennan tulokset

Toteutetussa kustannuslaskennassa (Taulukko 25) todettiin, että lapojen loppukäsittely on kallein kustannustyyppi tuulivoimalan purkamisessa, riippuen siitä, miten tuulivoimalan perustusten loppukäsittely toteutetaan. Mikäli perustukset voidaan maisemoida paikalleen, koituu niistä hyvin minimaaliset kulut. Toisaalta mikäli perustukset joudutaan käsittelemään jätehuollon kautta, on niiden kustannus merkittävästi suurin.

Taulukko 25. *Tuulivoimalan kustannusmallinnuksen tulokset materiaalien hyötyarvolle. Negatiivinen merkki tarkoittaa kustannuksia materiaalin käsittelystä purkajalle. Positiivinen merkki tarkoittaa purkamisesta saatavaa rahallista hyötyä.*

Materiaali	Massa [t]	Yksikköhinta [€/t]		Yhteensä (pyöristetty)	
		Min	Max	Min	Max
Betoni	1719,3	-2	-80	-3 500 €	-137 600 €
Teräs	635,7	+100	+170	+63 600 €	+108 100 €
Alumiini	7,1	+600	+1 100	+4 300 €	+7 900 €
Kupari	3,3	+4 000	+6 000	+13 200 €	+19 700 €
Öljy ja nesteet	1,9	-100	-850	-200 €	-1 600 €
Elektroniikka	3,4	0	0	0 €	0 €
Magneetit	0,2	0	0	0 €	0 €
Muut	0,6	-40	-170	-23 €	-97 €
Lasikuitukomposiitti (murskauskierrätys)	42,2	-200	-300	-8 500 €	-12 700 €
Lasikuitukomposiitti (kemiallinen kierrätys)	42,2	-480	-530	-20 300 €	-22 400 €
Lasikuitukomposiitti (energiaksi polttaminen)	42,2	-40	-170	-1 690 €	-7 200 €
Lasikuitukomposiitti (kaatopaikkajätteeksi)	42,2	-40	-170	-1 690 €	-7 200 €
Yhteensä (murskauskierrätys)	2413,6	-29,4	+51,2	-70 900 €	+123 500 €
Yhteensä (kemiallinen kierrätys)	2413,6	-33,4	+46,3	-80 600 €	+111 700 €
Yhteensä (energiaksi polttaminen)	2413,6	-27,1	+54,0	-65 400 €	+130 300 €
Yhteensä (kaatopaikkajätteeksi)	2413,6	-27,1	+54,0	-65 400 €	+130 300 €

Taulukko 26. *Tuulivoimalan purkamisen kokonaiskustannukset eri lapojen loppukäsittelymenetelmillä. Negatiivinen merkki tarkoittaa purkamisen myyntitulojen jälkeen saatavaa tuottoa purkamisesta.*

Kustannustyyppi	Yhteensä (pyöristetty)	
	Min	Max
Purkamisen valmistelu	47 800 €	60 500 €
Nasellin ja roottorin purku	24 800 €	28 700 €
Tornin purku	31 800 €	32 200 €
Kuljetuksien hinta	18 000 €	28 000 €
Murskauskierrätyksen kokonaiskustannus	-1 100 €	220 300 €
Kemiallisen kierrätyksen kokonaiskustannus	10 700 €	230 000 €
Referenssi 1, energiaksi polttamisen kokonaiskustannus	-7 900 €	214 800 €
Referenssi 2, kaatopaikkajätteeksi kokonaiskustannus	-7 900 €	214 800 €

Kustannusmallinnuksen tuloksista voidaan havaita, että betonin loppukäsittelyn kustannuksilla on merkittävä vaikutus siihen kuinka suuri tuulivoimalan purkamisen kokonaiskustannus on. Jos esimerkiksi tuulivoimalan perustukset voidaan maisemoituna jättää paikalleen, voidaan tuulivoimalan purkamisesta jopa saada voittoa.

AFRY Finlandin purkamiskustannusten raportissa arvioitiin, että mikäli betonijäte jalostetaan ja käytetään hyödyksi murskeena maarakentamisessa lähialueilla, olisi yksikköhinta betonin käsittelylle noin 20 €/t [46]. Jos näin tehtäisiin, olisivat purkamisen kustannukset taulukon 27 mukaiset.

Taulukko 27. *Purkamisen ja kierrättämisen kokonaiskustannukset, mikäli perustuksien betoni käytetään hyödyksi murskeena maarakentamisessa*

Lapojen loppukäsittelymenetelmä	Minimikustannus	Maksimikustannus
Murskauskierrätys	29 800 €	117 000 €
Kemiallinen kierrätys	41 600 €	126 700 €
Referenssi 1, energiaksi polttaminen	23 000 €	111 500 €
Referenssi 2, kaatopaikkajätteeksi	23 000 €	111 500 €

Vaikka tuulivoimalan lapojen kemiallinen kierrättäminen on niin kustannuksien kuin myös ympäristövaikutuksien kannalta suurin, on se kuitenkin myös kiertotalouden näkökulmasta paras. Lapojen kemiallisella kierrättämisellä voidaan vähentää neitseellisten luonnonvarojen kulutusta, mikä on erittäin tärkeää kestävä kehityksen näkökulmasta.

Kustannuslaskennan tulokset ovat lähtökohtaisesti samassa linjassa muun kirjallisuuden kanssa (Taulukko 28). Tämän tutkimuksen kustannushaitari on toisaalta merkittävästi suurempi verrattuna muihin tutkimuksiin ja raportteihin. Kustannuksien vaihtelevuus tässä tutkimuksessa johtuu pääosin betonin käsittelykustannuksista. Mikäli betonia voidaan hyödyntää tuulivoimalan lähialueilla maarakennuksen täyteaineena ovat purkamisen kustannukset täysin linjassa verrattuna muuhun kirjallisuuteen.

Taulukko 28. *Purku- ja kierrätyskustannukset kirjallisuudessa. Luvut pyöristettyjä. * merkitsee, että lukuun on käytetty kurssimuunnosta 1 \$ = 0,94 €.*

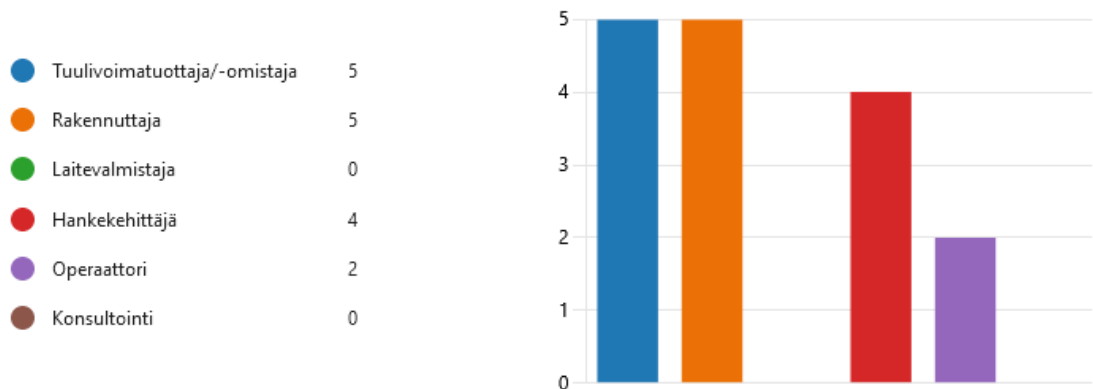
Tutkimus tai raportti	Hinta [€/voimala] (pelkkä purku)	Hinta [€/voimala] (kierrätyksellä)
Tämä tutkimus lapojen murskauskierrätyksellä	Ei huomioitu	-1 100–220 300
Tämä tutkimus lapojen kemiallisella kierrättämisellä	Ei huomioitu	10 700–230 000
Tämä tutkimus betonin käsittelyn yksikköhinnan ollessa 20 €/t	Ei huomioitu	29 800–126 700
STY Purkuraportti 2014 [87]	111 400–123 800	59 300–79 700
STY Purkuraportti 2023 [46]	125 400–153 900	7 900–84 400
Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options * [67]	126 500	Ei huomioitu
Lincoln Land Wind Power project * [88]	129 300	72 000
Decommissioning Plan for the Buffalo Ridge Wind Energy Facility * [89]	110 400	Ei huomioitu
Wind Project Decommissioning Plan - PrairieWinds SD1 (Crow Lake Wind Project) * [90]	183 400	131 600
Rail Tie Wind Project - Decommissioning Plan * [91]	137 600	69 600
Plum Creek Wind Farm - Decommissioning Plan * [92]	164 400	75 700
Canisteo Wind Energy Center - Decommissioning Assessment * [93]	146 700	77 100
Walleye Wind Project - Decommissioning Plan and Reclamation Cost Estimate * [94]	83 900	Ei huomioitu

Taulukossa 28 esitetyissä purkukustannuksissa vain STYn vuoden 2023 purkukustannusraportti huomioi lapojen kierrättämisen kustannuksia. Kaikissa muissa raporteissa ja tutkimuksissa tuulivoimalan komponenteista kierrätettiin vain metalliset osat sekä sähkökomponentit.

5.3 Kierrättäminen tuulivoimatoimijoiden näkökulmasta

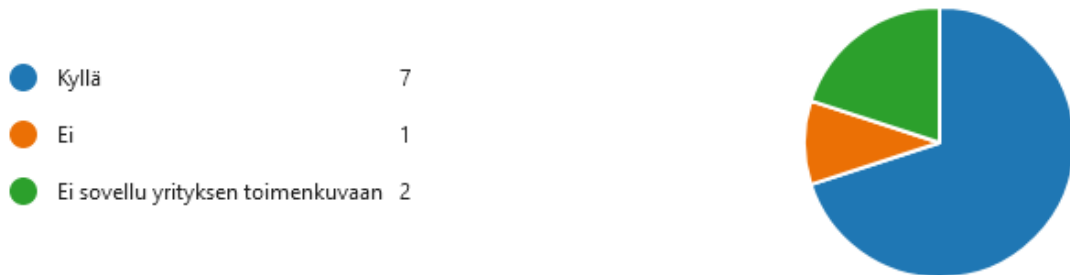
Kyselyyn saatiin vastauksia 10 kappaletta eri toimijoilta. Kysely lähetettiin sähköpostin välityksellä 29 yritykselle. Kyselyn täyttäneet yritykset vastasivat lähes kaikkiin kysymyksiin. Seuraavaksi käsitellään kysymyskohtaisesti saatuja vastauksia. Kysymykset ”1. Mitä yritystä edustat?” ja ”2. Saako yrityksen nimeä käyttää diplomityössä?”, jätetään käsittelemättä anonymisoinnin vuoksi.

Kysymys 3. Mitä tuulivoiman sidosryhmää edustat?



Kysymyksen 3 perusteella kyselyyn saatiin hyvin vastauksia eri näkökulmista tuulivoimalalla. Vain konsultointiyrityksiltä ja laitevalmistajilta ei saatu kyselyyn vastausta. Toisaalta laitevalmistajista vain Nordex SE:llä oli julkinen yhteydenottokanava, minkä vuoksi kyseinen laitevalmistaja oli ainoa, johon otettiin yhteyttä.

Kysymys 4. Onko yrityksellä olemassa olevaa suunnitelmaa tuulivoimaloiden purkujätteen käsittelyyn?



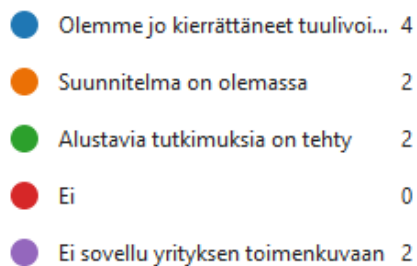
Kysymyksen 4 perusteella yritykset ovat suhteellisen hyvin varautuneet purkujätteen käsittelyyn. Monilla vastanneilla yrityksillä on joko olemassa olevia sopimuksia kierrätysyrityksien kanssa, ovat toteuttaneet aikaisemmin purkuprojekteja tai ovat tehneet jo alustavia selvityksiä potentiaalsiin yhteistyökumppaneihin ja prosesseihin.

Yritykset, jotka vastasivat ”Ei” tai ”Ei sovellu yrityksen toimenkuvaan” olivat toimenkuvaltaan hankekehittäjiä ja rakennuttajia. Yritykset, jotka pääosin toimittavat tuulipuistoja avaimet käteen -periaatteella eivät todennäköisesti osallistu tuulipuiston käytön päättyessä purkuprojektiin. Tämän vuoksi joillakin hankekehittäjillä tai rakennuttajilla ei ole vielä tai ei tule olemaan suunnitelmaa tuulivoimaloiden purkujätteen käsittelylle.

Kysymykseen 4 vastanneista yhdeltä yritykseltä tuli erittäin hyvä näkökulma suunnitelman olemassaoloon. Yritys vastasi: ”Yleinen purkusunnitelma on jokaiselle hankkeelle. Hankkeiden purkamisen ajankohtaista 10 vuoden päästä, jonka takia yksityiskohtaista suunnitelmaa ei järkevää tehdä teknologian kehittyessä. Lisäksi on kysymysmerkki, että

ovatko puistot enään meidän nimissä niiden purkuvaiheessa.” Näkökulma kierrättämisen teknologiseen kehitykseen on erittäin tärkeä, sillä yksityiskohtaisen suunnitelman tekeminen tietylle kierrätysmenetelmälle etukäteen voi osoittautua vanhentuneeksi purkamisen ajankohtana. Esimerkiksi jos alalle ilmestyy suunnitelman teon ja purkamisen toteuttamisen välissä niin kutsuttu murroksellinen teknologia, joka muuttaa oleellisesti alan käytäntöjä, voi aikaisemmin tehty suunnitelma olla turha.

Kysymys 5. Onko yrityksenne tehnyt valmisteluja tuulivoimaloiden kierrättämistä varten?



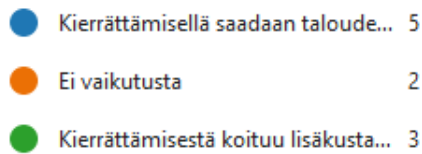
Kysymyksen 5 perusteella kyselyyn vastanneet yritykset ovat hyvin varautuneet tuulivoimaloiden kierrättämiseen. Kysymykseen ”Ei sovellu yrityksen toimenkuvaan” vastanneet olivat taas hankekehittäjä ja rakennuttaja, kuten kysymyksessä 4.

Kysymys 6. Näettekö, että tuulivoimaloiden lapoja tullaan kierrättämään tulevaisuudessa laajamittaisesti?



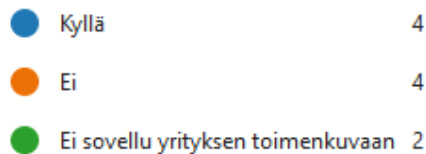
Kyselyyn vastanneista yrityksistä kaikki olivat sitä mieltä, että tuulivoimaloiden lapoja tullaan kierrättämään laajamittaisesti tulevaisuudessa.

Kysymys 7. Minkälaisia kustannusvaikutuksia tuulivoimalan kierrättämisellä on?



Kysymykseen 7 saatiin vaihtelevia vastauksia yritysten näkemyksistä kierrättämisen kustannuksien suhteen. ”Ei vaikutusta” vastanneet olivat taas toimenkuvaltaan hankekehittäjä ja rakennuttaja. Yksi yrityksistä, joka vastasi ”Kierrättämisestä koituu lisäkustannuksia” on jo aikaisemmin toteuttanut kierrättämistä, jossa yritys toimitti rikkoutuneita lapoja tutkimushankkeisiin. Kyseisellä yrityksellä voi olla tässä tapauksessa kustannuksien näkökulmasta enemmän tietoa verrattuna muihin yrityksiin. Toisaalta kysymykseen vastasi myös toinen jo aikaisemmin kierrätystä toteuttanut yritys ”Kierrättämällä saadaan taloudellista hyötyä”. Vastauksista voidaan siis päätellä, että kierrätyksen kustannuksista ei olla toimijoiden kesken samaa mieltä.

Kysymys 8. Huomioitko tällä hetkellä mahdollisia tuulivoimalan purku- ja kierrätyskustannuksia investointipäätöksissä?



Kyselyyn vastanneet yritykset ottavat vaihtelevasti huomioon mahdolliset purku- ja kierrätyskustannukset investointipäätöksissä. Yritykset, jotka vastasivat ”Ei sovellu yrityksen toimenkuvaan” olivat toimenkuvaltaan hankekehittäjä ja rakennuttaja.

Kysymys 9. Jos vastasitte ”Kyllä (kysymykseen 8), mitä otatte huomioon tehdessänne investointipäätöstä?

Yritykset, jotka vastasivat kysymykseen 8 ”Kyllä”, ovat lähtökohtaisesti perustaneet purkurahastoja tai asettaneet ennallistamisvakuuksia purkuun liittyen. Eräs yrityksistä arvioi investointipäätöksissä purkukustannuksia samalla huomioiden kierrättämisen.

Kysymys 10. Jos vastasitte ”Ei” (kysymykseen 8), näettekö, että tulevaisuudessa mahdollisia kierrätyskustannuksia täytyy ottaa huomioon investointipäätöstä tehdessä?

Yritykset, jotka vastasivat kysymykseen 8 ”Ei”, totesivat pääosin, että huomiointi on harkinnanarvoista tapauskohtaisesti investointipäätöksissä. Yksi yrityksistä totesi, että kierrätyskustannuksia otettaisiin mahdollisesti huomioon, mikäli investointia tehtäessä nähtäisiin selvästi, että puisto olisi vielä purkuvaiheessa investoinnin tehneen yrityksen omistuksessa. Eräs yrityksistä totesi: *”Uuden tuulivoimaprojektin investointipäätös pohjautuu allekirjoitettuun PPA-sopimukseen ja 30 vuoden käyttöaikaan. Tässä vaiheessa on liian aikaista ja todella vaikeaa arvioida tuulivoimaloiden kierrätysarvoa 30 vuoden päässä. Oletuksena että voimaloiden arvo otetaan huomioon purkukustannuksissa hyvityksinä purkajalle.”* Vastauksesta voidaan päätellä, että investointipäätökseen tulee merkittävä määrä epävarmuutta, mikäli mahdollisia kierrätyskustannuksia otetaan huomioon.

Kysymys 11. Media tuo esiin välillä lapojen tämänhetkisen huonon kierrätettävyyden esille huonossa valossa. Näettekö, että julkisen mielipiteen ja/tai poliittisten vaikuttajien painostuksen johdosta tuulivoimaloiden purkujätteen käsittelyyn tulee tulevaisuudessa muutoksia?



Vastanneet yritykset olivat lähtökohtaisesti samaa mieltä, että tuulivoimaloiden purkujätteen käsittelyyn on tulossa tulevaisuudessa muutoksia yhteiskunnallisen painostuksen myötä.

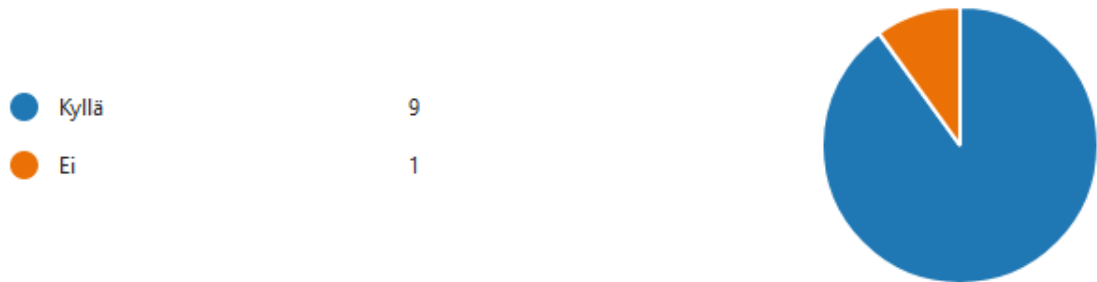
Kysymys 12. Miten hallitsette kannattavuus- ja kustannusriskejä poliittisiin tai lakimuutoksiin liittyen?

Kysymykseen 12 saatiin vain neljä vastausta, mutta jokaisessa vastauksessa oli erilaisia näkökulmia kannattavuus- ja kustannusriskien hallintaa. Eräs yritys hallitsee riskejä purkurahastoilla, kun toinen yritys tekee riskianalyysseja.

Vastanneista yrityksistä kaksi voitaisiin teemoittaa yhteen, sillä kummassakin vastauksessa teemana oli viestintävaikuttaminen. Toinen yrityksistä pyrkii olemaan keskusteluissa osallisena ja läsnä, jotta yritys pystyisi tuomaan asiantuntemusta alalta poliittisiin keskusteluihin. Toinen yritys viestintävaikuttamisen teemasta vastasi: *”Poliittiset kannat voivat muuttua neljän vuoden välein eduskuntavaalien jälkeen sekä nejän vuoden välein*

kunnallisvaalien jälkeen. Näiden hallitseminen on mahdotonta. Viestintävaikuttamisen (lobbauksen) kautta pyritään tulevia päättäjiä pitämään informoituneina alan tarpeista ja uhkakuvista.” Vastauksista voidaan päätellä, että tuulivoimatoimijan näkökulmasta olisi erittäin tärkeää, että heidät osallistettaisiin tulevaisuudessa mahdollisesti käytäviin keskusteluihin.

Kysymys 13. Näettekö, että laitevalmistajien omat järjestelmät voimaloiden purkujätteen käsittelylle auttaisivat tuulivoimaloiden purkamisessa?



Kyselyyn vastanneet yritykset olivat lähtökohtaisesti samaa mieltä siitä, että laitevalmistajien itsetarjoamat järjestelmät voimaloiden purkujätteen käsittelylle auttaisivat tuulivoimaloiden purkamisessa. Tässä kysymyksessä oli mukana saateteksti esimerkkitapauksesta, jota monet aurinkopaneelivalmistajat toteuttavat. Monet aurinkopaneelivalmistajat tarjoavat omille paneeleilleen erilaisia loppukäsittelyjärjestelmiä arvomateriaalien talteenottoa varten. Saatetekstissä annettiin esimerkki, että samanlaisia järjestelmiä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi tuulivoimaloiden sähköistyskomponenttien talteenottoon ja mahdollisuuksien mukaan uusiokäyttöön.

Kaksi yritystä antoi tarkentavana kommenttina, että lavat mitä todennäköisimmin menisivät murskauskierätyksen kautta sementinvalmistukseen. Täten lavat olisivat todennäköisesti laitevalmistajien tarjoamien järjestelmien ulkopuolella, ellei heillä ole yhteistyösopimuksia murskaajien ja sementtiä valmistavien yritysten kanssa. Yksi yrityksistä totesi, että laitevalmistajat tietävät parhaiten mitä tuulivoimaloiden valmistamiseen on käytetty, jolloin he olisivat parhain taho kierätyksen järjestelmälliseen toteuttamiseen.

Kysymys 14. Miten vastuullisuus näkyy yrityksenne toiminnassa?

Vastuullisuus näkyi kaikkien vastanneiden toiminnassa vahvasti. Yrityksillä on esimerkiksi omia ESG-organisaatioita ja vastuullisuusohjelmia sekä vastuullisuudesta kirjauksia yrityksen strategiassa. Eräällä yrityksellä on vastuullisuustavoitteena komponenttien täysi kierrätettävyyden lopussa ja yritys raportoi tavoitteista vuosittain vastuullisuuskertomuksessa. Eräs yritys toteaa, että heidän toimintansa seuraa standardoituja ympäristö- ja vastuullisuusjärjestelmiä ja vaatii kaikilta yhteistyökumppaneiltaan konkreettisia osoituksia vastuullisuudesta.

Kysymys 15. Ohjaatteko asiakkaitanne tuulivoimaloiden loppukäsittelyn kestävyden suhteen?



Kyselyyn vastanneet yritykset, jotka vastasivat, että he eivät ohjaa asiakkaitaan tuulivoimaloiden loppukäsittelyn kestävyden suhteen olivat pääosin tuulivoimatuottajia/-omistajia ja rakennuttajia. On ymmärrettävää, että heidän tapauksessaan ei ole järkevää ohjata asiakkaitaan tuulivoimaloiden loppukäsittelyn kestävyden suhteen, sillä he ovat joko itse loppukäsittelyhankkeen toimeksiantajia tai rakennuttajan tapauksessa he keskittyvät vain puiston rakennukseen muun muassa avaimet käteen periaatteella.

Kysymys 16. Edistättekö tuulivoimaloiden kierrättämistä ja/tai tuotteita asiakkailleen esille erilaisia loppukäsittelyvaihtoehtoja?



Kysymyksen 16 voidaan soveltaa samanlaista tulkintaa kuin kysymyksen 15 tapauksessa. Kysymykset ovat hyvin samankaltaisia teemaltaan, joten yritykset ovatkin vastanneet kysymyksiin hyvin samanlailla kuin aikaisempaan kysymykseen. Pieniä eroavaisuuksia kuitenkin on sillä muutamalla yrityksellä ovat vastaukset kääntyneet päikseen. Eräs hankekehittäjä vastasi kysymykseen 15 ”Kyllä”, mutta kysymykseen 16 ”Ei”, kun taas eräs rakennuttaja vastasi kysymykseen 15 ”Ei”, mutta kysymykseen 16 ”Kyllä”.

Kysymys 17. Voitteko tarkentaa minkälaisia edistyksiä tai vaihtoehtoja tuotte esille?

Eräs rakennuttajayritys totesi kysymykseen 17, että koska he tuottavat palveluita hankkeen omistajalle/rakentajalle, heillä ei ole vaikuttamismahdollisuutta kierrättämisen suhteen. Eräs toinen rakennuttajayrityksistä toteaa, että heidän toiminnastaan lähes kaikki

materiaalit kierrätetään. Yksi yrityksistä, jonka pääasiallinen toimenkuva on omistajuuden, operoinnin ja hankekehityksen puolella, antaa yleisiä ohjeita asiakkailleen ja pyrkii mahdollistamaan maksimaalisen kierrättämisen elinkaaren lopussa.

5.4 Tuloksien pohdinta ja jatkotutkimuksien tarve

5.4.1 Elinkaariarviointi

Elinkaariarvioinnin osalta havaittiin, että tuulivoimalan sijainnilla on havaittavissa oleva, mutta ei merkittävä vaikutus rakentamisen päästöihin. Työssä kuitenkin tehtiin merkittävä oletus perustuksien suhteen, sillä perustuksien valmistamisen kuljetukset jätettiin kokonaan huomioimatta. Oletus tehtiin, sillä kuljetusmatkoista ei ollut varmaa tietoa saatavilla, kun taas tuulivoimalan muitten komponenttien valmistuspaikoista oli saatavilla hyvin tietoa. Tuulivoimalan perustukset ovat massallisesti suurin komponentti kokonaisuudesta tuulivoimalasta, jolloin myös lähtökohtaisesti sille kohdistuu suurin kuljetuskuorma ympäristön näkökulmasta. Yhtä perustusta varten joutuu tekemään kymmeniä rekkakuljetuksia, jolloin tuulivoimalan sijainnilla on havaittavissa oleva vaikutus rakentamisen päästöihin. Riippuen siitä, että kuinka kaukaa perustuksien betonia tuodaan, voi kuljetuksien osuus tuulivoimalan rakentamisen kokonaispäästöistä kasvaa jopa 5 %-yksikköä. Perustuksien päästöjen minimoimiseksi olisi täten järkevintä, että betoni hankittaisiin mahdollisimman läheltä tuulivoima-aluetta.

Tämän työn elinkaariarvioinnin tulokset olivat hyvin linjassa muiden vastaavien tutkimuksien kanssa. Elinkaaren aikaiset päästöt olivat muita tutkimuksia hieman alhaisemmat, mutta tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tämän työn elinkaarimalli toteutettiin vain yhdelle tuulivoimalalle. Tuulivoimaloita lähtökohtaisesti rakennetaan useampia kappaleita tuulivoima-alueelle, jolloin kokonaisuudesta muodostuu tuulipuisto. Tuulipuistot sisältävät useita kilometrejä voimajohtoja sekä niissä on yleensä myös vähintään yksi iso sähköasema. Tämän vuoksi tästä työstä olisi hyvä suorittaa jatkotutkimus kokonaiselle tuulipuistolle. Jatkotutkimuksella saisi todenmukaisemman tuloksen kierrätyksen vaikutuksesta tuulivoimalan kierrättämiselle, sillä käytön päättyessä sähköasemat todennäköisesti purettaisiin myös, jos alueelle ei ole kaavailtu uutta tuulivoimatuotantoa.

Jatkotutkimuksessa olisi myös hyvä ottaa huomioon infrastruktuurin rakentaminen tuulipuistolle. Tuulipuistojen välittömässä läheisyydessä ei välttämättä ole aina valmista tietoa tai sähköverkkoa, johon liittyä. Jatkotutkimuksia olisi myös hyvä toteuttaa käytöstä poistuville merituulivoimaloille.

5.4.2 Kustannuslaskenta

Kustannuslaskennasta saatiin tulokseksi, että tuulivoimalan purkamisen kokonaiskustannukset ovat erittäin riippuvaisia siitä, että miten perustusten betoni loppukäsittely toteutetaan. Mikäli perustukset voidaan jättää maisemoituna paikalleen, voidaan tuulivoimalan purkamisella ja kierrättämisellä jopa saada taloudellista hyötyä, mikäli tuulivoimalan metallisten osien yksikköhinta on tarpeeksi korkea.

Lapojen kierrätyksen osalta tulokset tuovat esille, kuinka haasteellista on löytää tehokkaita ja taloudellisesti kannattavia kierrätysmenetelmiä. Lavan komposiittimateriaalit ovat kestäviä mutta samalla vaikeasti kierrätettäviä. Tämän hetken edistyneisin kierrätysmenetelmä lavoille, kemiallinen kierrättäminen, on kiertotalouden kannalta lupaavin, mutta myös samalla kallein menetelmä. Lapojen kemiallinen kierrättäminen on jopa kaksi kertaa kalliimpaa, verrattuna murskauskierrätykseen, mutta kun lapojen kierrättämisen kustannukset suhteutetaan mahdollisesti ongelmallisen betonin kustannuksiin, ei lapojen loppukäsittelykustannus ole maksimissaan kuin viidesosa betonin mahdollisista kustannuksista. Tässä tapauksessa on kuitenkin merkittävä oletus siinä, että betonisia perustuksia ei saa jättää maahan mikä on nykylainsäädännön nojalla täysin sallittua. Mikäli perustuksia ei saa jättää maahan ja betonin joutuu loppukäsittelyyn jätetuollon kautta voivat pelkän betonin loppukäsittelyn kustannukset kattaa puolet purkamisen kokonaiskustannuksista.

Tuulivoimalan purkamisen ja kierrättämisen kustannuksia tulisi seurata säännöllisesti. Tämä työ voi jatkossa toimia vertailukohtana purkamisen ja kierrättämisen kustannuksille. Tämän työn pohjalta on myös hyvä toteuttaa jatkotutkimusta purun ja kierrättämisen kustannuksien vaikutuksessa tuulivoiman LCOE:hen.

5.4.3 Kyselytutkimus

Kyselyyn vastanneet yritykset olivat hyvin varautuneet tuulivoimaloiden purkamiseen ja kierrätykseen tulevaisuudessa. Jotkut kyselyyn vastanneista yrityksistä olivat jo toteuttaneet aikaisemmin tuulivoimaloiden purkamista ja kierrättämistä. Kaikki vastanneista yrityksistä näki, että tuulivoimaloiden lapoja tullaan kierrättämään laajamittaisesti tulevaisuudessa. Suuri osa yrityksistä näki, että tulevaisuudessa purkujätteen käsittelyyn voi tulla julkisen mielipiteen tai poliittisten vaikuttajien toimesta muutoksia. Vastausten perusteella pystyttiin tulkitsemaan, että yritykset olivat hyvin sitoutuneita kestävä kehityksen periaatteisiin.

Lähes kaikki yritykset näkivät, että laitevalmistajien omat kierrätysjärjestelmät voimaloille auttaisivat tuulivoimaloiden purkamisessa. Tuulivoima-ala voisi tämän tiedon pohjalta ottaa mallia aurinkovoima-alalta, jossa laitevalmistajilla on jatkuvasti yleistymässä omat kierrätysjärjestelmät heidän valmistamilleen aurinkopaneeleilleen. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että massasuhteutettuna aurinkopaneeleissa käytetään merkittävä määrä enemmän arvomateriaaleja verrattuna tuulivoimaloihin. Arvomateriaalien talteenotto on todennäköisesti ollut ajavana tekijänä aurinkopaneelivalmistajien omiin kierrätysjärjestelmiin.

Vastanneiden organisaatioiden näkemys tuulivoimaloiden kierrättämisen kustannuksiin oli vaihtelevaa. Puolet vastanneista yrityksistä näki, että tuulivoimalan kierrättämisellä saadaan taloudellista hyötyä, kun osa koki, että kierrättämisestä koituu lisäkustannuksia. Osa vastanneista yrityksistä ovat jo sisällyttäneet aikaisemmin purku- ja kierrätyskustannukset suunnitelmiinsa, kun osa yrityksistä pitää harkinnanvaraisena purku- ja kierrätyskustannuksien huomiointia esimerkiksi investointipäätöstä tehtäessä. Eräät yritykset eivät huomio kierrätyskustannuksia sen takia, että tuulivoimaloiden käyttöään vuoksi lopukäsittelymenetelmiä voi kehittyä käytön aikana, jolloin on voitu tehdä turhia suunnitelmia purkamisen ja kierrättämisen suhteen. Näkemyksien eroavaisuudet yritysten välillä heijastaa epävarmuutta tulevaisuuden kustannusrakenteista ja materiaaliarvoista sekä teknologian kehityksestä.

Kyselytutkimuksen tuloksia ei tule tulkita alan yleisnäkemysnä. Suomen Tuulivoimayhdistys ry:llä on organisaatiojäseniä noin 200 kappaletta. Tämä tarkoittaisi, sitä että tilastollisesti kyselyyn olisi pitänyt vastata noin 42 organisaatiota, jos alan yleisnäkemys olisi halunnut saada 85 ± 10 % varmuudella.

6. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia tuulivoimalan kierrättämisen ympäristö- ja kustannusvaikutuksia sekä kartoittaa alan näkemystä tuulivoimaloiden purkuun ja kierrätykseen. Työ kattoi tuulivoimalan kierrättämisen kirjallisuuskatsauksen, kierrättämisen elinkaarimallinnuksen ja kustannuslaskennan, sekä kyselyn alalla toimiville yrityksille. Kirjallisuuskatsauksessa etsittiin tuulivoimalan materiaaleille kierrätystapoja, keskittyen pääosin lapojen ja muiden vaikeasti kierrätettävien materiaalien käsittelytapoihin. Lisäksi kirjallisuuskatsauksessa tulkittiin tuulivoimaloiden purkuun ja kierrättämiseen liittyvää lainsäädäntöä. Kirjallisuuskatsauksen viimeisessä vaiheessa selvitettiin elinkaariarvioinnin toteuttamisvaiheita sekä esitettiin aikaisempien elinkaariarviointien tuloksia tuulivoimaloista sekä niiden mahdollisesta kierrättämisestä.

Elinkaariarvioinnin toteuttamisen kannalta oli oleellista selvittää ja määrittää mistä tuulivoimala koostuu ja miten tuulivoimalan komponentit valmistetaan. Tuulivoimalat koostuvat pääosin teräksestä, mikä on suhteellisen helposti kierrätettävä materiaali. Tuulivoimalan lavat ovat kuitenkin vaikeasti kierrätettäviä lapojen monimutkaisuuden sekä niiden lujuuden vuoksi. Kerätty tieto materiaaleista ja niiden käsittelyprosesseista kasattiin elinkaari-inventaarioon. Elinkaari-inventaariota hyödynnettiin elinkaariarvioinnin tuloksien saamiseen ja tulkitsemiseen.

Elinkaariarviointia varten valittiin kolme voimalasijaintia, jotka sijaitsevat lähellä suurimpia tuulivoimalakeskittymiä Suomessa. Sijainnit valittiin merkittävillä etäisyyksillä toisistaan, jotta pystyttiin selvittämään, onko tuulivoimalan sijainnilla kuinka suuri merkitys tuulivoimalan ympäristövaikutuksiin sen elinkaaren aikana. Tulokseksi saatiin, että sijainnin vaikutus ei ole kovinkaan merkittävä, mikäli tarkastellaan voimalakohtaisesti kokonaispäästöjä. Kuljetuksien päästöt erosivat voimaloiden välillä noin 14 t CO₂-ekv, mutta kun kuljetuksien päästöjen eroavaisuudet suhteutti voimalan kokonaispäästöihin, oli ero käytännössä olematon. Elinkaariarvioinnissa ei toisaalta huomioitu perustusten kuljetuksia, sillä luotettavaa tietoa ei ollut saatavilla siitä, että kuinka kaukaa perustuksien betoni kuskattaisiin voimalasijainnille. Työtä varten tehtiin toteutetun elinkaariarvioinnin ulkopuolella yksinkertaistettu herkkyysanalyysi siitä, että mikäli perustuksien kuljetukset huomioitaisiin, kuinka paljon voimalan kokonaispäästöt muuttuisivat. Ympäristövaikutuksien kasvu oli huomattavissa, mutta ei kuitenkaan merkittävä. Mikäli perustusten betoni kuskattaisiin voimalasijainnille 100 km päästä kasvaisi kuljetusten osuus kokonaispäästöistä

noin 5 %-yksikköön ja 300 km etäisyydeltä 7 %-yksikköön. Toteutetussa elinkaariarvioinnissa tuulivoimalan komponenttien kuljetusten osuus kokonaispäästöistä oli noin 3 %-yksikköä.

Elinkaariarvioinnissa todettiin, että voimaloiden rakennusvaiheessa tuulivoimalan tornista koituu suurimmat päästöt, noin 1 100 t CO₂-ekv, kun torni on noin 134 m korkea. Tuulivoimalan nasellista ja perustuksista koituvat hyvin samanlaiset päästöt noin 420–430 t CO₂-ekv, kun tuulivoimalan lavoista koituu päästöjä noin 330 t CO₂-ekv. Tutkitun voimalan roottorihalkaisija oli 126 m. Kun tuulivoimalan komponenteille asetettiin kierrätysyhvytys, tuulivoimalan tornin elinkaari-päästöt tippuivat noin 370 t CO₂-ekv lukemaan, nasellin noin 60 t CO₂-ekv lukemaan ja perustusten noin 200 t CO₂-ekv lukemaan. Lapojen kohdalla havaittiin kierrätysyhvytyksien jälkeen merkittävää vaihtelua eri loppukäsittelymenetelmien välillä. Lapojen kemiallisella kierrättämiselle päästöt nousivat noin 470 t CO₂-ekv lukemaan, kun taas murskauskierrättämällä päästöt laskivat noin 230 t CO₂-ekv lukemaan. Valituissa referenssikäsittelymenetelmissä, lapojen poltossa ja kaatopaikkaamisessa, päästöt kasvoivat noin 430 t CO₂-ekv lukemaan polttamisen tapauksessa, kun kaatopaikkaamalla lapojen päästöt pysyivät noin 330 t CO₂-ekv lukemassa.

Elinkaariarvioinnista saatiin tulokseksi, että kun tuulivoimala kierrätetään, on tuulivoimalan hiilijalanjälki noin 4,3–6,4 g CO₂-ekv/kWh. Pienin elinkaaren hiilijalanjälki saatiin lapojen murskauskierrätyksellä, kun taas suurin hiilijalanjälki oli kemiallisella kierrätyksellä. Voimalan sijainti vaikutti merkittävästi tuloksiin, mutta eroavaisuus ei tullut kuljetusten aiheuttamista päästöistä, vaan sijainnin tuuliolosuhteista. Kalajoen voimalalla pystyttiin tuottamaan 20 vuoden aikana noin 20 GWh enemmän sähköä, mikä koitui merkittäväksi eduksi verrattuna Isojoen ja Simon voimaloihin. Keskimäärin Kalajoen voimalalla oli elinkaaren hiilijalanjälki noin 15 % pienempi verrattuna muihin voimaloihin.

Kustannuslaskennan tulokseksi saatiin, että tuulivoimalan perustusten loppukäsittelykulu vaikuttaa merkittävästi purun ja kierrätyksen kokonaiskustannuksiin. Nykylainsäädännön nojalla tuulivoimalan perustukset voidaan jättää maisemoituna maaperään, jolloin perustusten loppukäsittelykustannukset ovat todennäköisesti alhaiset. Toisaalta mikäli lainsäädännössä tapahtuu seuraavien vuosien aikana muutoksia, voidaan perustusten betoni joutua käsittelemään jätehuolto-yhtiöiden kautta. Tässä tapauksessa perustusten käsittelykustannus olisi suurin kulu tuulivoimalan purkamisessa ja kierrätyksessä. Toiseksi eniten loppukäsittelykuluja koituu lapojen käsittelystä. Käsittelykustannus eri menetelmillä hyvin vaihtelevaa. Jos lavat murskataan, on käsittelykustannus noin 8 500–12 700 €, kun taas jos lavat kierrätetään kemiallisesti, on käsittelykustannus noin 20 300–22 400 €. Valituissa referenssitilanteissa käsittelykustannukset olivat noin

1 690–7 200 €. Kustannuslaskennassa tehtiin myös selvitys siitä, että kuinka paljon tuulivoimalan purkaminen ja kierrättäminen maksaisi, mikäli perustusten betoni voitaisiin hyötykäyttää murskeena lähialueen maarakentamisessa. Riippuen lapojen loppukäsittelymenetelmästä purku ja kierrätyskustannukset voivat vaihdella minimiarvossaan 23 000–41 600 € välillä ja maksimiarvossaan 111 500–126 700 € välillä. Työssä toteutettu kustannuslaskennan tulokset olivat hyvin linjassa alan muun kirjallisuuden kanssa.

Työn kyselytutkimusosaan osallistuneet yritykset olivat hyvin valmistautuneet tuulivoimaloiden purkamiseen ja kierrätykseen. Jotkut kyselyyn vastanneista yrityksistä olivat jo toteuttaneet purku- ja kierrätysprojekteja. Kyselyyn vastanneet uskoivat, että tuulivoimaloiden lapojen kierrätys tulee olemaan yleinen käytäntö tulevaisuudessa. Suuri osa myös näki, että tulevaisuudessa voi tulla muutoksia purkujätteen käsittelyyn yhteiskunnan painostuksen myötä. Kyselyyn vastanneista yrityksistä lähes kaikki näkivät, että laitevalmistajien itsetarjoamista kierrätysjärjestelmistä voisi olla apua tuulivoimaloiden purkuvaiheessa. Tuulivoima-ala voisi tiedon pohjalta ottaa mallia aurinkovoima-alalta, jossa jatkuvasti yleistyväämpää on ollut, että laitevalmistajat tarjoavat asiakkailleen loppukäsittelyjärjestelmiä omille paneeleilleen.

Kyselytutkimuksen tuloksia ei pidä yleistää alan yleismielipiteeksi. Vastanneita organisaatioita ei ollut kuin vain 10 kappaletta mikä ei riitä kattamaan riittävällä varmuudella Suomessa toimivien organisaatioiden yleismielipidettä. Esimerkiksi kyselyyn vastanneet yritykset olivat eriävää mieltä siitä, että koituuko tuulivoimalan purkamisesta taloudellista hyötyä vai haittaa ja yrityksien käytännöt purkamisen suhteen olivat erilaisia.

LÄHTEET

- [1] Motiva Oy, ”Syöttötariffi eli takuuhintajärjestelmä”, Motiva. Viitattu: 26. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjaukskeinot/syottotariffi_eli_takuuhintajarjestelma
- [2] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, ”Tuulivoimahankkeet Suomessa 11/2022”, marras 2022. Viitattu: 16. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet_syksy_2022_11.pdf
- [3] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, ”Tuulivoimatilastot 2022”, Suomen Tuulivoimayhdistys. Viitattu: 13. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankoh-taista/tilastot-2/tuulivoimatilastot-2022>
- [4] P. Razdan ja P. Garrett, ”Life Cycle Assessment of electricity production an Onshore V126-3.45 MW Wind Plant”, Vestas Wind Systems A/S, heinä 2017.
- [5] P. Garrett ja K. Rønde, ”Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V126-3.3 MW Wind Plant”, Vestas Wind Systems A/S, kesä 2014.
- [6] P. Breeze, *Wind Power Generation*. [Verkossa]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04850-2>
- [7] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, ”Eri tuulivoimalatyyppejä”, Suomen Tuulivoimayhdistys. Viitattu: 8. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/eri-voimalatyyppeja>
- [8] F. Castellani, D. Astolfi, M. Peppoloni, F. Natili, D. Buttà, ja A. Hirschl, ”Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use”, *Machines*, vsk. 7, s. 35, touko 2019, doi: 10.3390/machines7020035.
- [9] Rasul, *Clean Energy for Sustainable Development*. Viitattu: 9. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://learning.oreilly.com/library/view/clean-energy-for/9780128054246/XHTML/B9780128054239000090/sec-s0015.xhtml>
- [10] Oikeusministeriö, *Valtioneuvoston asetus tuulivoimaloiden ulkomelutason ohjearvoista 1107/2015*, vsk. 1107/2015. Oikeusministeriö, 2015. Viitattu: 9. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151107>
- [11] K. A. Adeyeye, N. Ijumba, ja J. Colton, ”The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vsk. 801, nro 1, s. 012020, kesä 2021, doi: 10.1088/1755-1315/801/1/012020.
- [12] A. Nordmann, *English: Illustration of a wind turbine*. 2007. Viitattu: 19. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_int.svg
- [13] P. Breeze, ”Chapter 5 - Drive Trains, Gearboxes, and Generators”, teoksessa *Wind Power Generation*, P. Breeze, Toim., Academic Press, 2016, ss. 41–48. doi: 10.1016/B978-0-12-804038-6.00005-0.
- [14] H. Polinder, J. A. Ferreira, B. B. Jensen, A. B. Abrahamsen, K. Atallah, ja R. A. McMahon, ”Trends in Wind Turbine Generator Systems”, *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vsk. 1, nro 3, ss. 174–185, syys 2013, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2280428.
- [15] Vestas Wind Systems A/S, ”Reports & Ratings”. Viitattu: 13. heinäkuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/sustainability/reports-and-ratings>
- [16] T. M. Letcher, Toim., *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, First. San Diego, US: Elsevier Science & Technology, 2017. Viitattu: 8. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4858115>
- [17] P. Breeze, ”Chapter 3 - The Anatomy of a Wind Turbine”, teoksessa *Wind Power Generation*, P. Breeze, Toim., Academic Press, 2016, ss. 19–27. doi: 10.1016/B978-0-12-804038-6.00003-7.
- [18] Peikko Group, ”Tuulivoimaloiden perustukset vaihteleviin maaperiin”. Viitattu: 19. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.peikko.fi/tuotteet/tuulivoimaloiden-perustusratkaisut/kuvaus/>
- [19] C. Lavanya ja N. D. Kumar, ”Foundation Types for Land and Offshore Sustainable Wind Energy Turbine Towers”, *E3S Web Conf.*, vsk. 184, s. 01094, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202018401094.
- [20] ”Piled raft foundation.jpg”. Viitattu: 23. tammikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/File:Piled_raft_foundation.jpg

- [21] P. Totaro, "Segmented Wind Turbine Towers Are the Lowest Cost Tall Tower Alternative | LinkedIn". Viitattu: 1. syyskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/segmented-wind-turbine-towers-lowest-cost-tall-tower-philip-totaro/>
- [22] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, "Selvitys: Tuulivoimalan purkukustannukset ovat pysyneet samana". Viitattu: 1. syyskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/selvitys-tuulivoimalan-purkukustannukset-ovat-pysyneet-samana>
- [23] T. Stehly ja P. Duffy, "2020 Cost of Wind Energy Review", National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), NREL/TP-5000-81209, joulukuuta 2021. doi: 10.2172/1838135.
- [24] T. M. Letcher, Toim., *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Second. Academic Press, 2023. doi: 10.1016/B978-0-323-99353-1.00040-2.
- [25] Airtècnics, "Cooling in wind turbines". Viitattu: 8. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.airtecnics.com/news/cooling-in-wind-turbines>
- [26] J. P. Jensen ja K. Skelton, "Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vsk. 97, ss. 165–176, joulukuuta 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.041.
- [27] A. Gherissi *ym.*, "Wind turbine blades structure based on palm cellulose fibers composite material", *Építőanyag*, vsk. 73, nro 3, ss. 109–114, tammi 2021, doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.16.
- [28] R. Lacal-Arántegui, "Materials use in electricity generators in wind turbines – state-of-the-art and future specifications", *Journal of Cleaner Production*, vsk. 87, ss. 275–283, tammi 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.047.
- [29] D. Al. Katsaprakakis, N. Papadakis, ja I. Ntintakis, "A Comprehensive Analysis of Wind Turbine Blade Damage", *Energies*, vsk. 14, nro 18, s. 5974, syyskuuta 2021, doi: 10.3390/en14185974.
- [30] M. Adaramola, *Wind Turbine Technology: Principles and Design*. Oakville, CANADA: Apple Academic Press, Incorporated, 2014. Viitattu: 6. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1576516>
- [31] S. Wollrab, M. Sheahan, C. Steitz, ja M. Sheahan, "Siemens Energy's shares tumble as wind turbine troubles deepen", *Reuters*, 23. kesäkuuta 2023. Viitattu: 5. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.reuters.com/business/energy/siemens-energy-ceo-setback-turbine-troubles-more-severe-than-thought-possible-2023-06-23/>
- [32] C. Steitz ja A. Hübner, "Siemens Energy books \$2.4 billion in charges on wind turbines", *Reuters*, 7. elokuuta 2023. Viitattu: 5. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.reuters.com/business/energy/siemens-energy-books-24-bln-charges-wind-turbine-issues-2023-08-07/>
- [33] M. Lewis, "What's the problem with Siemens Gamesa's onshore wind turbines? [Update]", *Electrek*, 18. syyskuuta 2023. Viitattu: 5. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://electrek.co/2023/09/18/siemens-gamesa-onshore-wind-turbines/>
- [34] P. Brøndsted, H. Lilholt, ja A. Lystrup, "Composite Materials for Wind Power Turbine Blades", *Annual Review of Materials Research*, vsk. 35, nro 1, ss. 505–538, 2005, doi: 10.1146/annurev.matsci.35.100303.110641.
- [35] S. Mali ja P. Garrett, "LCA of Electricity Production from an onshore EnVentus V162-6.2 MW Wind plant". Viitattu: 28. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/LCA%20of%20Electricity%20Production%20from%20an%20onshore%20EnVentus%20V162-6.2.pdf.coredownload.inline.pdf>
- [36] J. Jensen, "Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines", syyskuuta 2018, doi: 10.1002/we.2287.
- [37] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, "Tuulivoimaloiden purku ja kierrätys", Suomen Tuulivoimayhdistys. Viitattu: 5. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimaloiden-purku-ja-kierratys>
- [38] T. Stehly ja P. Duffy, "2021 Cost of Wind Energy Review [Slides]", National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), NREL/PR-5000-84774, tammi 2023. doi: 10.2172/1907623.
- [39] Ramboll Oy, "TUULIVOIMAN ALUETALOUSVAIKUTUKSET - TYÖLLISYYSLUVUT JA ALUETALOUSVAIKUTUKSET ERI ELINKAAREN ERI VAIHEISSA", huhti 2019.

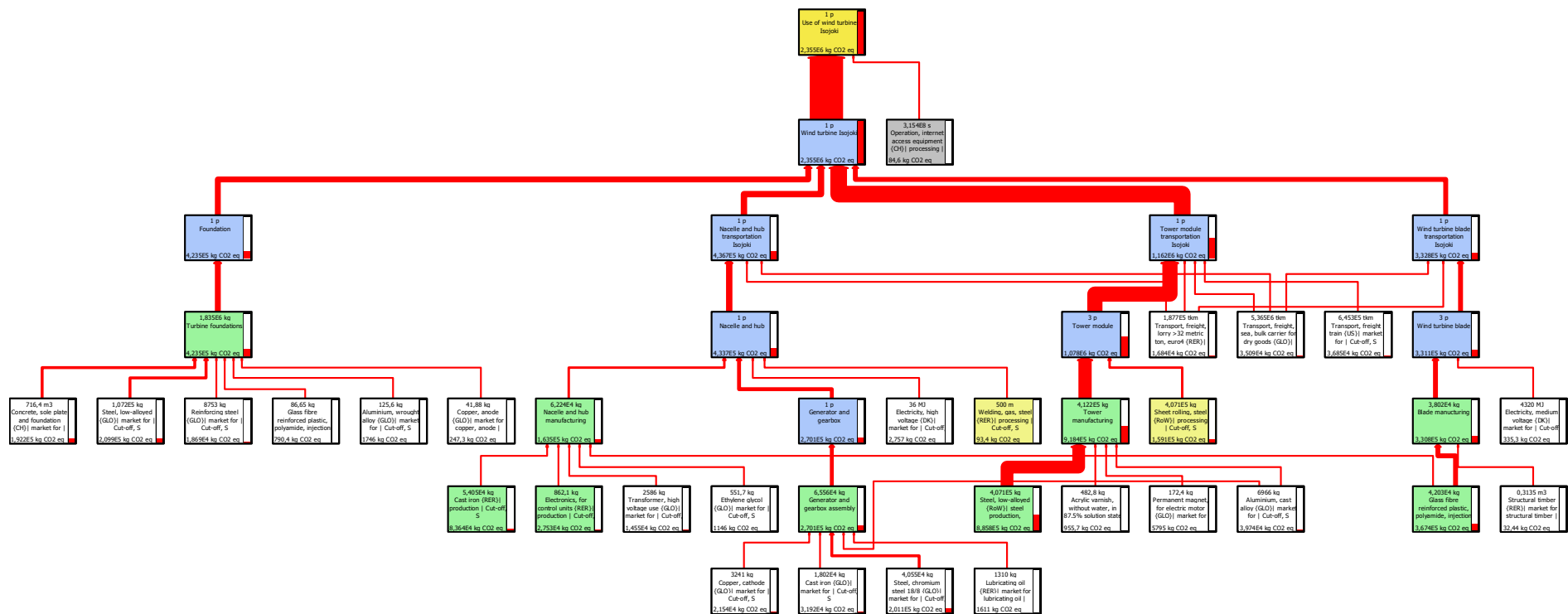
- [40] Ympäristöministeriö, *Jätelaki 646/2011*. Oikeusministeriö, Edita Publishing Oy, 2012. Viitattu: 6. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646>
- [41] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, "Tuulivoima hankkeesta tiedottaminen", Suomen Tuulivoimayhdistys. Viitattu: 19. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/hankkeesta-tiedottaminen>
- [42] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, "Neuvottelut maanomistajan kanssa", Suomen Tuulivoimayhdistys. Viitattu: 19. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/neuvottelut-maanomistajan-kanssa>
- [43] Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK ry, "Tuulivoimaopas maanomistajille". 1. kesäkuuta 2022. Viitattu: 19. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.mtk.fi/documents/20143/0/MTK_tuulivoimaopas_0507_LQ+%281%29.pdf/a9ec980c-d86e-2363-5b8e-d525dcd9f126?t=1657013499722
- [44] Vestas Wind Systems A/S, "Zero-Waste". Viitattu: 13. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/zero-waste>
- [45] E. L. Delaney *ym.*, "An integrated geospatial approach for repurposing wind turbine blades", *Resources, Conservation and Recycling*, vsk. 170, s. 105601, heinä 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105601.
- [46] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, "Tuulivoimalan purkamisen kustannukset", elo 2023. Viitattu: 11. elokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimalaraportti-9.8.2023_final.pdf
- [47] M. Vuorinen, "Outokummun terästehdas on Euroopan suurin materiaalien kierrätyslaitos – Teräksen valmistuksessa pitää olla oikeat mausteet | Teknologiateollisuus". Viitattu: 19. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://teknologiateollisuus.fi/fi/ajankohtaista/yritystarina/outokummun-terastehdas-euroopan-suurin-materiaalien-kierratyslaitos>
- [48] B. K. Reck ja T. E. Graedel, "Challenges in Metal Recycling", *Science*, vsk. 337, nro 6095, ss. 690–695, elo 2012, doi: 10.1126/science.1217501.
- [49] European Aluminium, "Enabling the circular economy with aluminium", European Aluminium. Viitattu: 29. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://european-aluminium.eu/blog/enabling-the-circular-economy-with-aluminium/>
- [50] S. Christofyllidis, "Circularity and Recycling in the EU - Copper Alliance", <https://copperalliance.org/>. Viitattu: 29. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://copperalliance.org/resource/circularity-and-recycling-in-the-eu/>
- [51] The secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change, "Global Warming Potentials (IPCC Fourth Assessment Report) | UNFCCC". Viitattu: 29. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/frequently-asked-questions/global-warming-potentials-ipcc-fourth-assessment-report>
- [52] Muoviteollisuus ry, "KiMuRa loppuraportti", Muoviteollisuus Ry. Viitattu: 20. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://muovitekartta.fi/wp-content/uploads/2023/01/KiMuRa_loppuraportti.pdf
- [53] J. Chen, J. Wang, ja A. Ni, "Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vsk. 38, nro 12, ss. 567–577, kesä 2019, doi: 10.1177/0731684419833470.
- [54] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, ja S. Zafar, "A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades", *Composites Part B: Engineering*, vsk. 215, s. 108768, kesä 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.
- [55] neocomp GmbH, "neocomp GmbH - Services". Viitattu: 4. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.neocomp.eu/de/Leistungen>
- [56] European Circular Economy Stakeholder Platform, "Neocomp: recycling glass-fibre-reinforced plastics", European Circular Economy Stakeholder Platform. Viitattu: 4. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/neocomp-recycling-glass-fibre-reinforced-plastics>
- [57] D. S. Cousins, Y. Suzuki, R. E. Murray, J. R. Samaniuk, ja A. P. Stebner, "Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades", *Journal of Cleaner Production*, vsk. 209, ss. 1252–1263, helmi 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.
- [58] A. A. Morini, M. J. Ribeiro, ja D. Hotza, "Carbon footprint and embodied energy of a wind turbine blade—a case study", *Int J Life Cycle Assess*, vsk. 26, nro 6, ss. 1177–1187, kesä 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01907-z.

- [59] H. Ucar Sokoli, "Chemical Solvolysis as an Approach to Recycle Fibre Reinforced Thermoset Polymer Composites and Close the End-of the Life Cycle", Ph.D, Aalborg Universitetsforlag, 2016. [Verkossa]. Saatavissa: <https://doi.org/10.5278/vbn.phd.engsci.00171>
- [60] Vestas Wind Systems A/S, "Vestas unveils circularity solution to end landfill for turbine blades", 8. helmikuuta 2023. Viitattu: 13. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2023/vestas-unveils-circularity-solution-to-end-landfill-for-c3710818>
- [61] H. Paalatie, "Käytöstä poistuneet lavat – mitä niille voidaan tehdä?", Tuulivoima. Viitattu: 5. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimalehti.fi/kaytosta-poistuneet-lavat-mita-niille-voidaan-tehda/>
- [62] D. Blom ja K. Dufva, "LUJITEMUOVIJÄTTEEN MATERIAALIN JA ENERGIAN KIERRÄTYS SEMENTTIUUNISSA", *MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU*, 2016.
- [63] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, ja H. de Wit, "Recycling of composite materials", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vsk. 51, ss. 53–68, tammi 2012, doi: 10.1016/j.cep.2011.09.007.
- [64] Ympäristöministeriö, *Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013*. Oikeusministeriö, Edita Lakitieto Oy, 2013. Viitattu: 5. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331>
- [65] M. Cotton, "An update on Casper's landfill wind turbines project", *https://www.wyoming-newsnow.tv*, 24. syyskuuta 2020. Viitattu: 22. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.wyomingnewsnow.tv/2020/09/24/an-update-on-caspers-landfill-wind-turbine-project/>
- [66] K. Griffith, "Hundreds of fiberglass wind turbine blades pile up in landfills", *Mail Online*, 6. toukokuuta 2020. Viitattu: 22. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-8294057/Hundreds-non-recyclable-fiberglass-wind-turbine-blades-pictured-piling-landfills.html>
- [67] A. Cooperman, A. Eberle, ja E. Lantz, "Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options", *Resources, Conservation and Recycling*, vsk. 168, s. 105439, touko 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105439.
- [68] Vattenfall AB, "Vattenfall commits to landfill ban and to recycle all wind turbine blades by 2030", Vattenfall. Viitattu: 5. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2021/vattenfall-commits-to-landfill-ban-and-to-recycle-all-wind-turbine-blades-by-2030>
- [69] Vestas Wind Systems A/S, "Sustainability Strategy". Viitattu: 5. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/sustainability/sustainability-strategy>
- [70] Ympäristöministeriö, "Selvitys: Näin käytöstä poistettujen tuulivoimaloiden sääntelyä voisi kehittää", Ympäristöministeriö, marras 2023. Viitattu: 13. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/selvitys-nain-kaytosta-poistettujen-tuulivoimaloiden-saantelya-voisi-kehittaa>
- [71] O. Jolliet, M. Saade-Sbeih, S. Shaked, A. Jolliet, ja P. Crettaz, *Environmental Life Cycle Assessment*. Baton Rouge, UNITED STATES: Taylor & Francis Group, 2015. Viitattu: 6. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4096988>
- [72] E. Williams ja S. Eikenaar, "Finding your way in multifunctional processes and recycling", *PRé Sustainability*, heinä 2022, Viitattu: 13. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://pre-sustainability.com/articles/finding-your-way-in-allocation-methods-multifunctional-processes-recycling/>
- [73] Etha Wind, "Hiilikädenjälkilaskenta Takakangas-Pihlajaharjun hankkeelle", elo 2022. Viitattu: 27. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Liite_16_Hiilikadenjalkilaskenta_2022.pdf
- [74] United Nations Economic Commission for Europe, "Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources", United Nations, huhti 2022. doi: 10.18356/9789210014854.
- [75] B. Diez-Cañamero ja J. M. F. Mendoza, "Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives", *Waste Management*, vsk. 164, ss. 94–105, kesä 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.03.041.
- [76] Vestas Wind Systems A/S, "Life Cycle Assessments". Viitattu: 12. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/lifecycle-assessments>

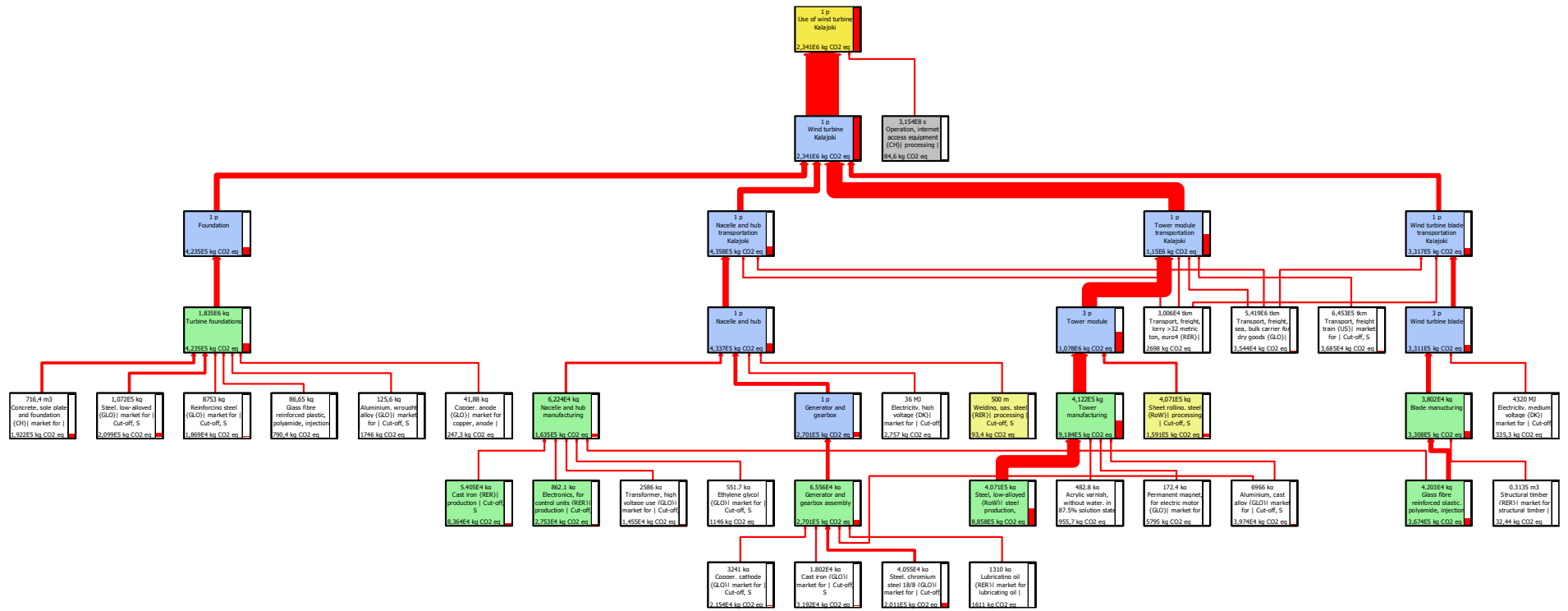
- [77] wind-turbine-models.com, "Vestas V126-3.45 - 3,45 MW - Wind turbine". Viitattu: 17. toukokuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1249-vestas-v126-3.45>
- [78] Vestas Wind Systems A/S, "Blade production progressing at Nakskov factory". Viitattu: 21. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://us.vestas.com/en-us/products/offshore/V236-15MW/prototype/blade-production-nakskov-factory>
- [79] Vestas Wind Systems A/S, "Production". Viitattu: 13. kesäkuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/about/our-locations/production>
- [80] Vestas Wind Systems A/S, "CS Wind to acquire Vestas' Pueblo tower factory to strengthen local job creation and wind energy supply chain", 3. kesäkuuta 2021. Viitattu: 14. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.vestas.com/en/media/company-news/2021/cs-wind-to-acquire-vestas--pueblo-tower-factory-to-stre-c3359965>
- [81] S. E. Battersby, M. P. Finn, E. L. Usery, ja K. H. Yamamoto, "Implications of Web Mercator and Its Use in Online Mapping", *Cartographica*, vsk. 49, nro 2, ss. 85–101, kesä 2014, doi: 10.3138/cart0.49.2.2313.
- [82] Pirkanmaan Jätehuolto Oy, "Jätetaksa 1.1.2024 alkaen". Viitattu: 20. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://pjhoy.fi/wp-content/uploads/2023/12/Jatetaksa-1.1.2024-valmis.pdf>
- [83] The Engineering ToolBox, "Wood, Panel and Structural Timber Products - Mechanical Properties". Viitattu: 14. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html
- [84] Autotuoja ja -teollisuus ry, "Euro-päästöluokat - Autotuoja". Viitattu: 19. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.autotuoja.fi/uutishuone/autoalan_termistoa/euro-paastoluokat
- [85] E. Pauer, B. Wohner, ja M. Tacker, "The Influence of Database Selection on Environmental Impact Results. Life Cycle Assessment of Packaging Using GaBi, Ecoinvent 3.6, and the Environmental Footprint Database", *Sustainability*, vsk. 12, nro 23, s. 9948, marras 2020, doi: 10.3390/su12239948.
- [86] ecoinvent, "ecoinvent Version 3.8". Viitattu: 13. maaliskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.8>
- [87] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, "Tuulivoimalan purkamisen kustannukset". Suomen Tuulivoimayhdistys ry, 3. marraskuuta 2014. Viitattu: 6. huhtikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimalan-purkaminen-kustannukset-final-mod-24042015.pdf>
- [88] Patrick Engineerin Inc., "Lincoln Land Wind Project - Decommissioning Plan Review". elokuuta 2020. [Verkossa]. Saatavissa: http://morgancounty-il.com/documents/commissioners/LLWF_siting_review_reports.pdf
- [89] Atwell, LLC, "Buffalo Ridge Wind Project - Decommissioning Cost Estimate". 29. toukokuuta 2020. Viitattu: 2. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://mn.gov/eera/web/project-file/11408/>
- [90] Barr Engineering Co., "Wind Project Decommissioning Plan - PrairieWinds SD1 (Crow Lake Wind Project)". toukokuuta 2021.
- [91] Westwood, "Rail Tie Wind Project - Decommissioning Plan". 1. helmikuuta 2021. Viitattu: 2. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.railtiwind.com/wp-content/uploads/2021/03/Appendix_J-1_Decommissioning_Plan.pdf
- [92] Westwood, "Plum Creek Wind Farm - Decommissioning Plan". 8. marraskuuta 2019. Viitattu: 2. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://apps.commerce.state.mn.us/eera/web/project-file/11353>
- [93] Energy Ventures Analysis, "Canisteo Wind Energy Center - Decommissioning Assessment". elokuuta 2019.
- [94] Tetra Tech, Inc., "Walleye Wind Project - Decommissioning Plan and Reclamation Cost Estimate". 2. elokuuta 2020. Viitattu: 2. marraskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://mn.gov/eera/web/project-file/11450/>

LIITE A: SIMAPRO ELINKAARIVERKOSTOT CASE-TUTKIMUKSEN TUULIVOIMALOILLE

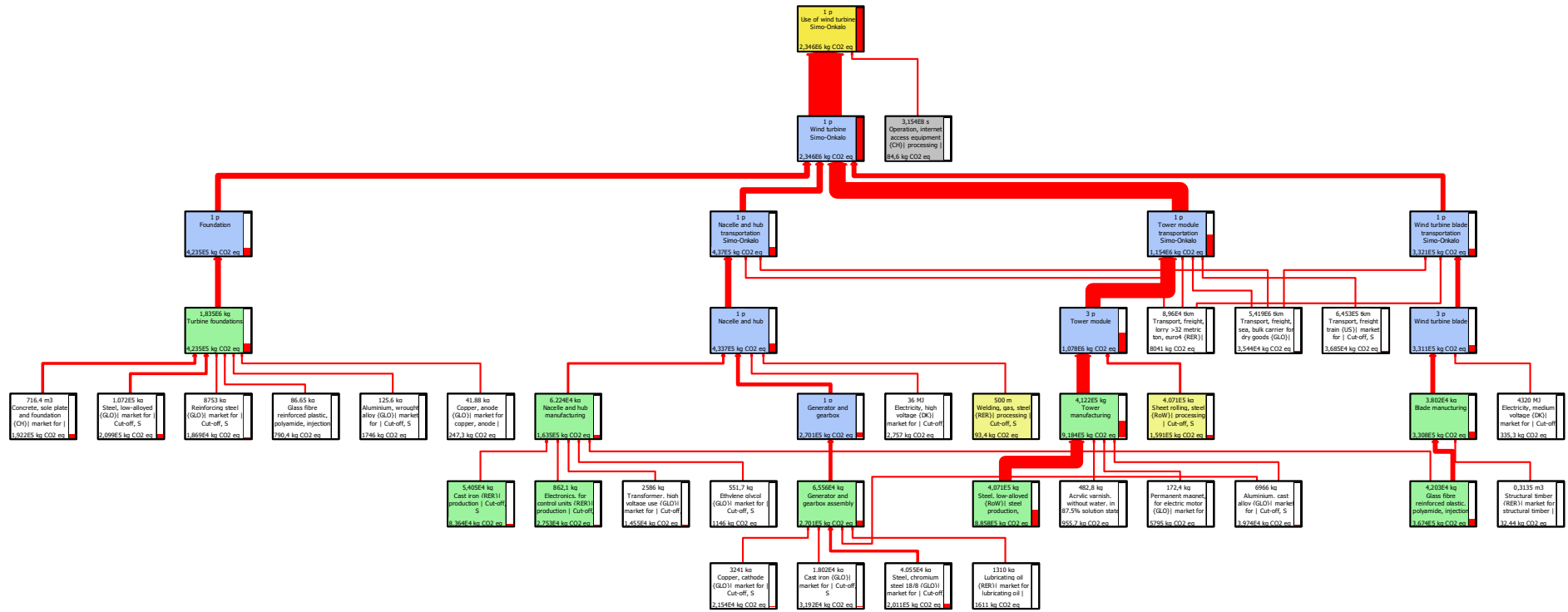
Isojen voimalan elinkaariverkosto



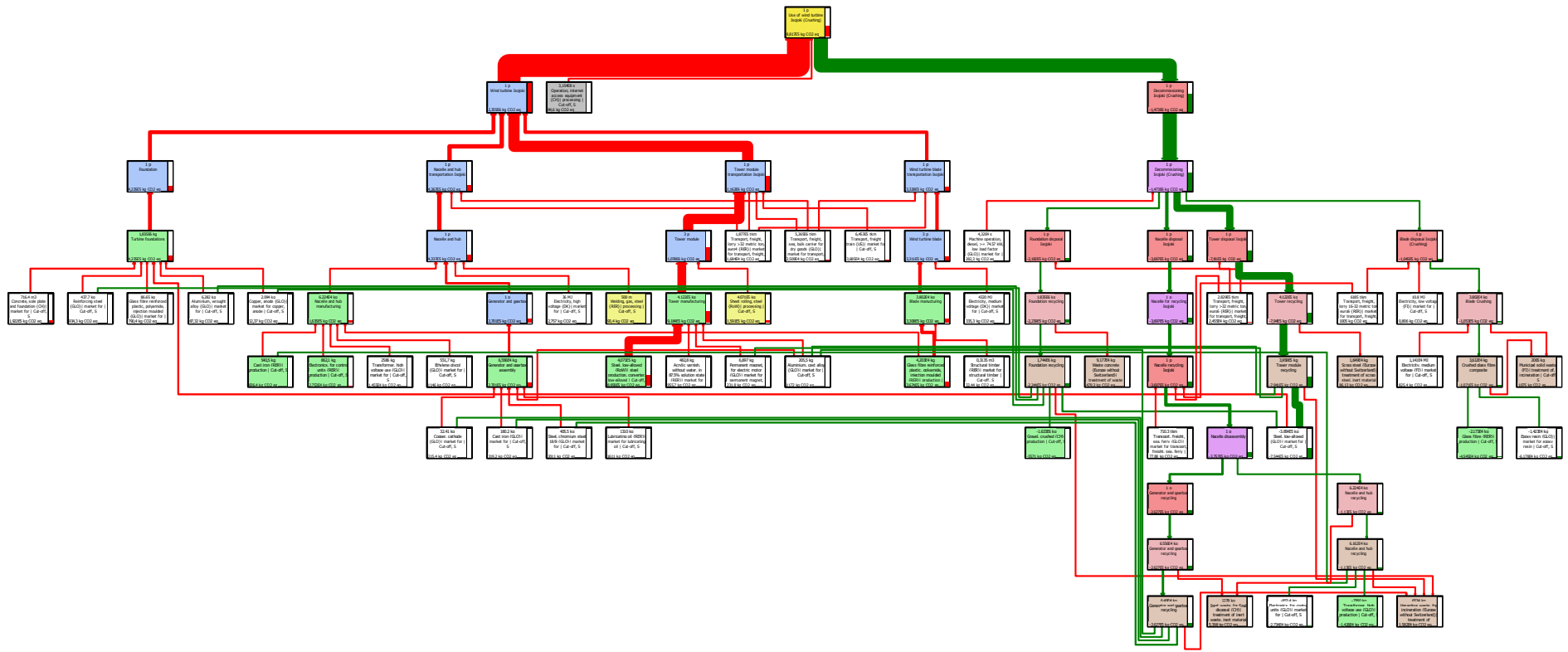
Kalajoen voimalan elinkaariverkosto



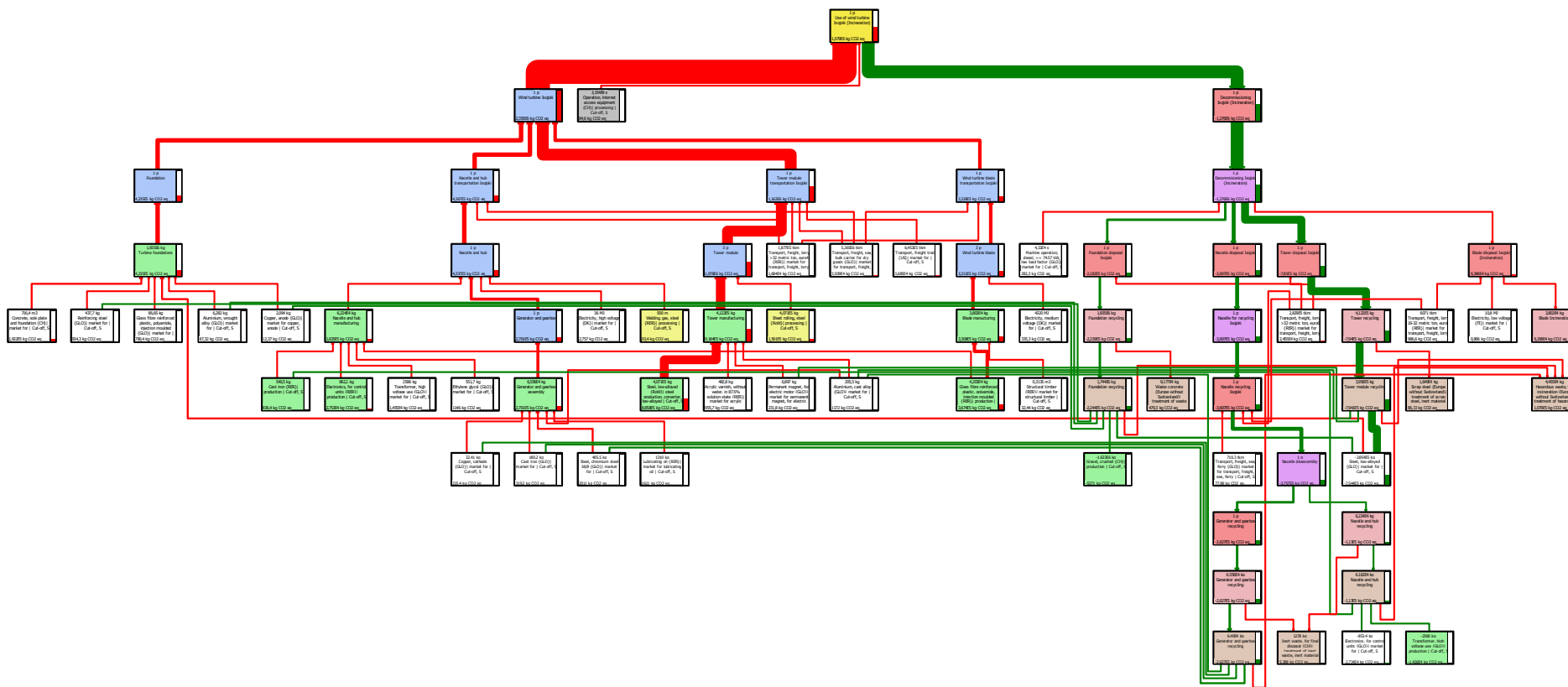
Simon voimalan elinkaariverkosto



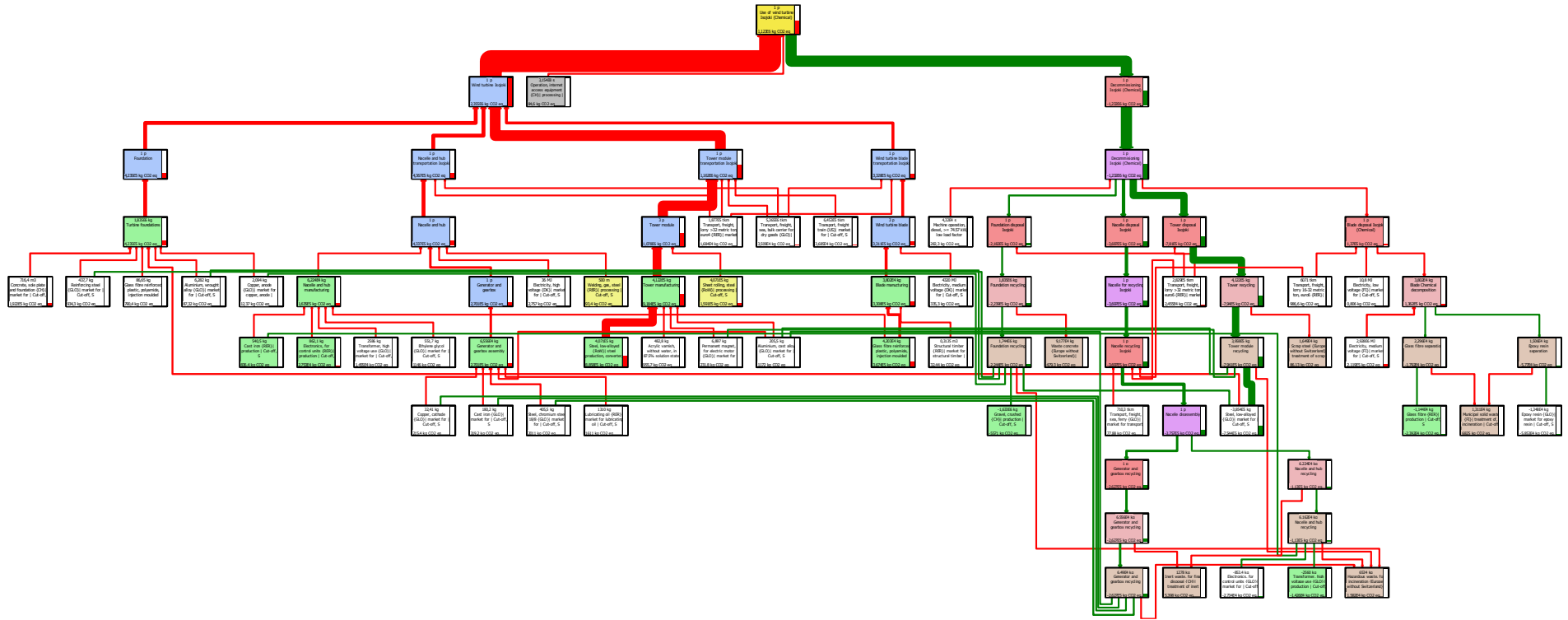
Isojen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto murskauskierityksellä



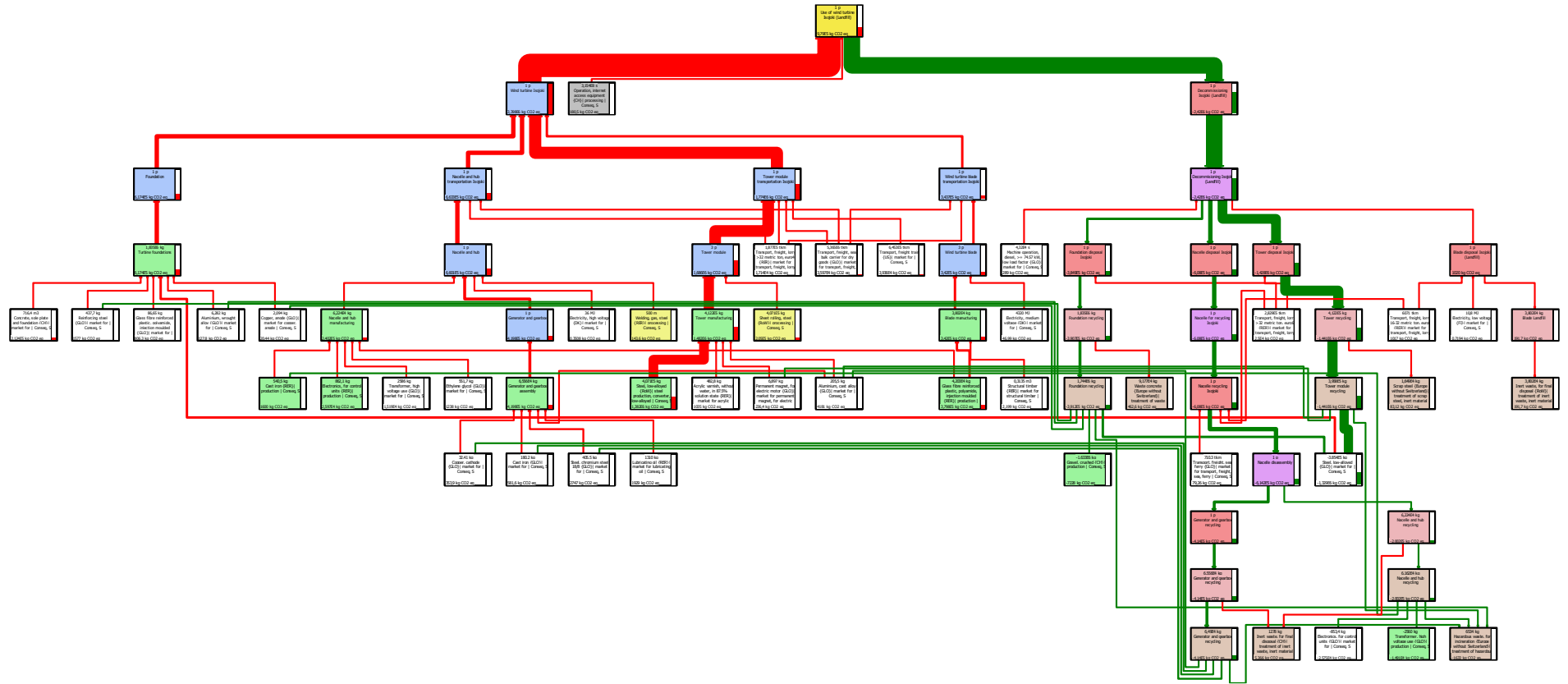
Isojoen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto energiaksi poltolla



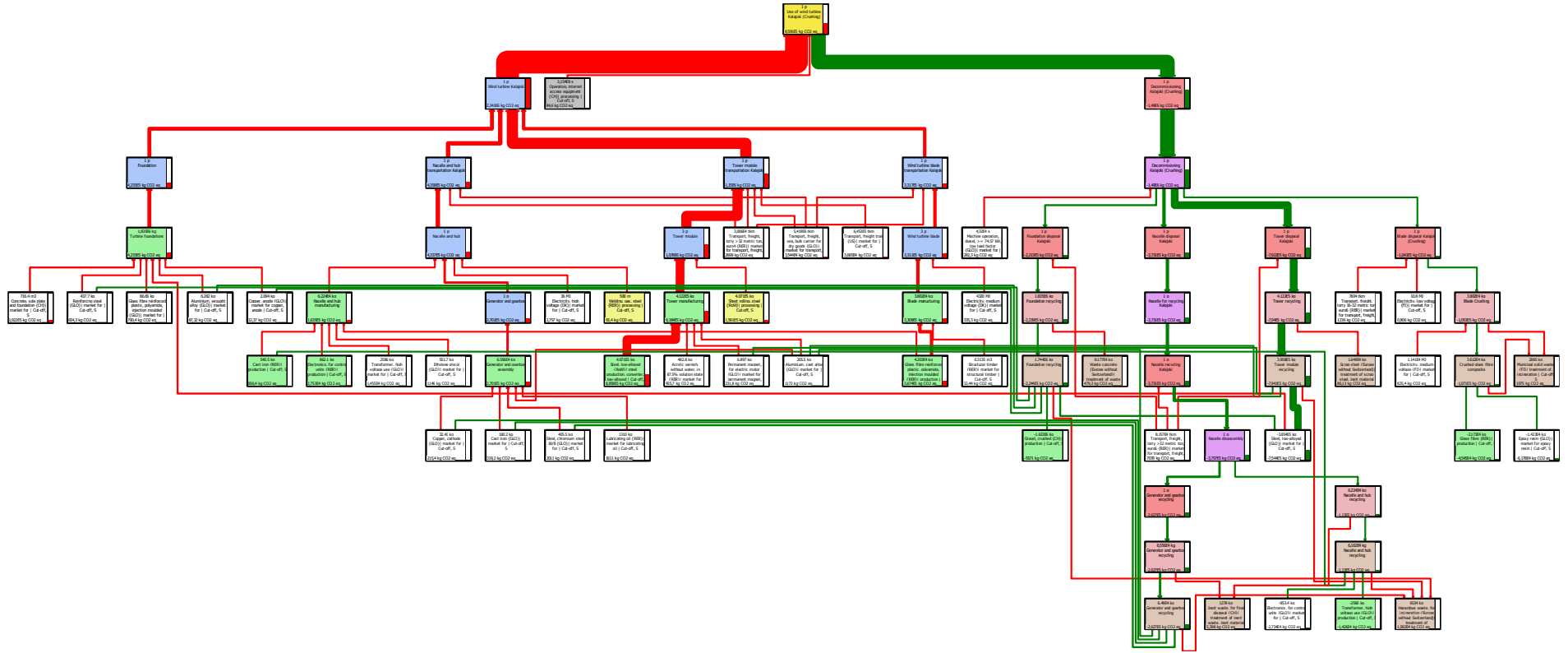
Isojen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto kemiallisella kierrätyksellä



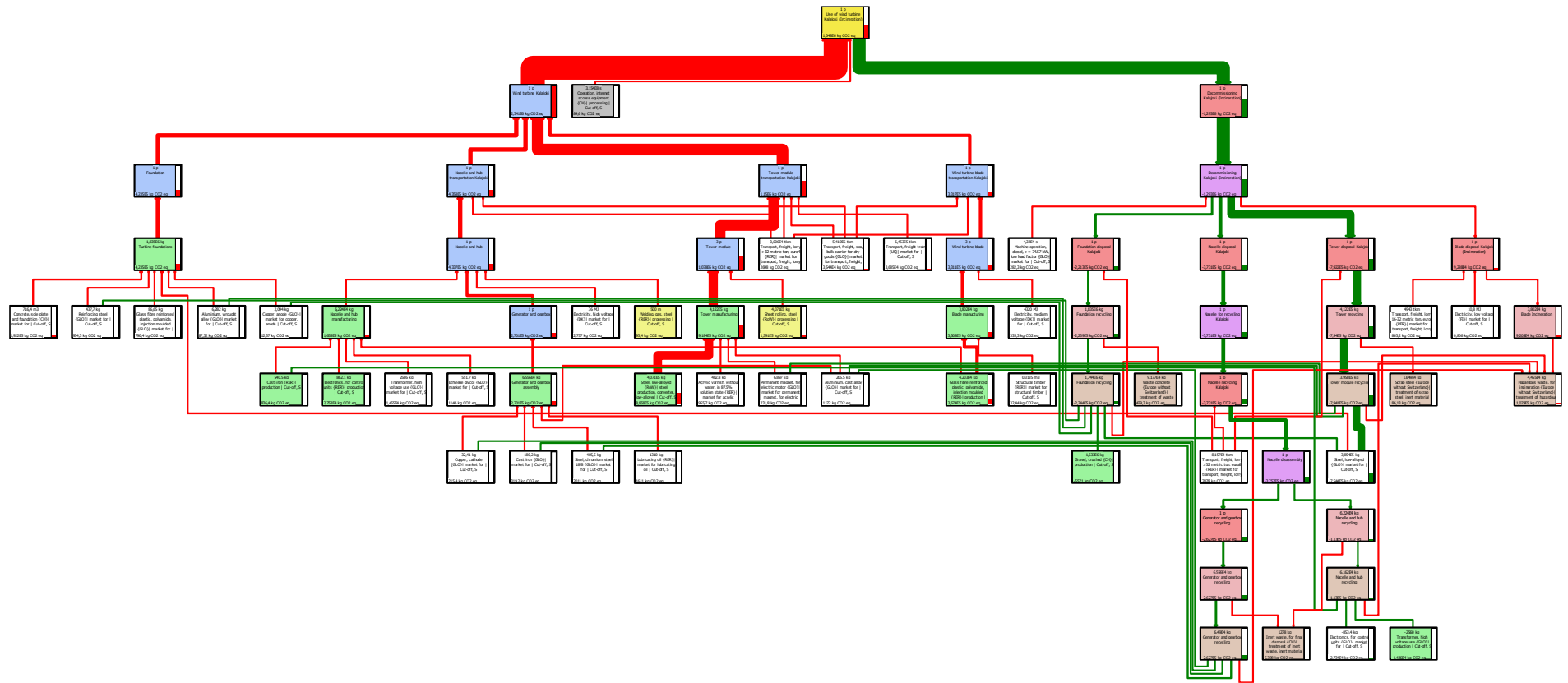
Isojoen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto kaatopaikkaloppusijoituksella



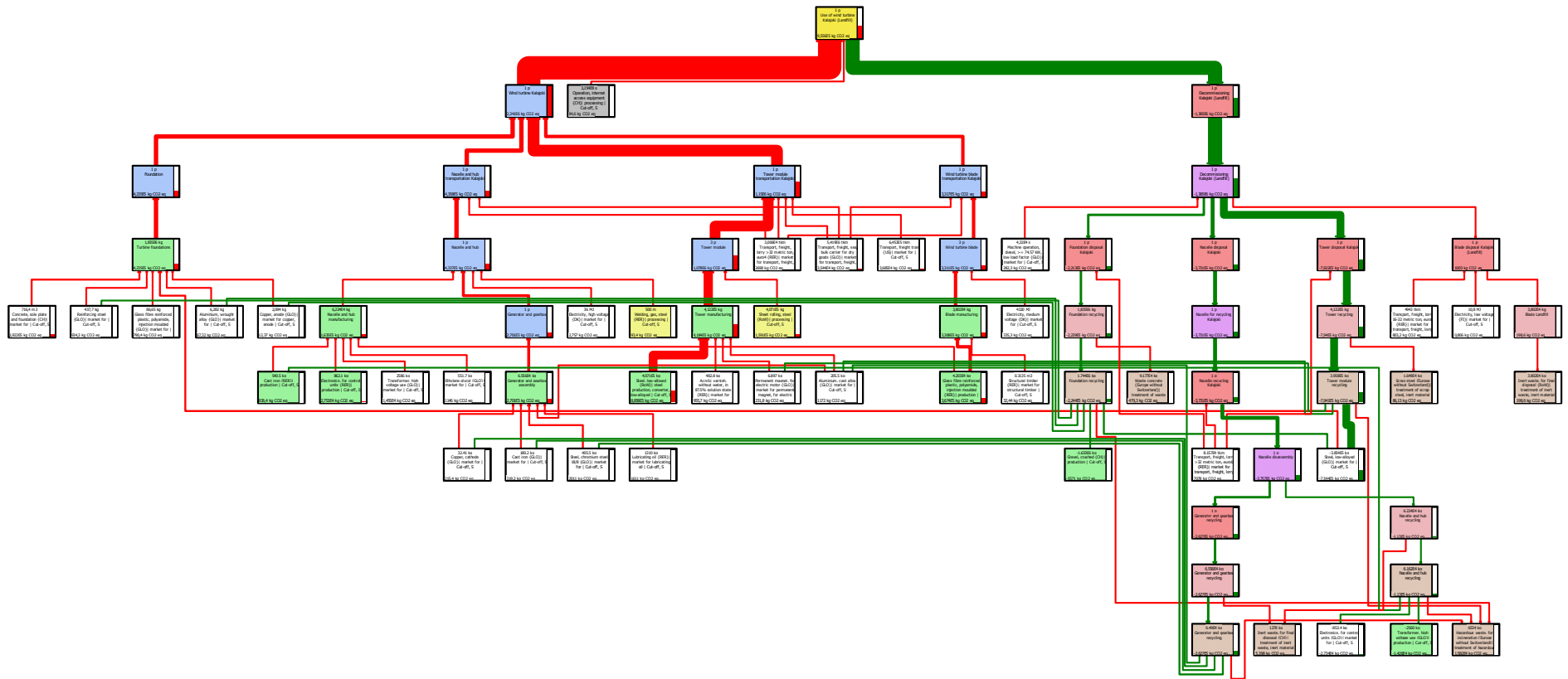
Kalajoen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto murskauskierityksellä



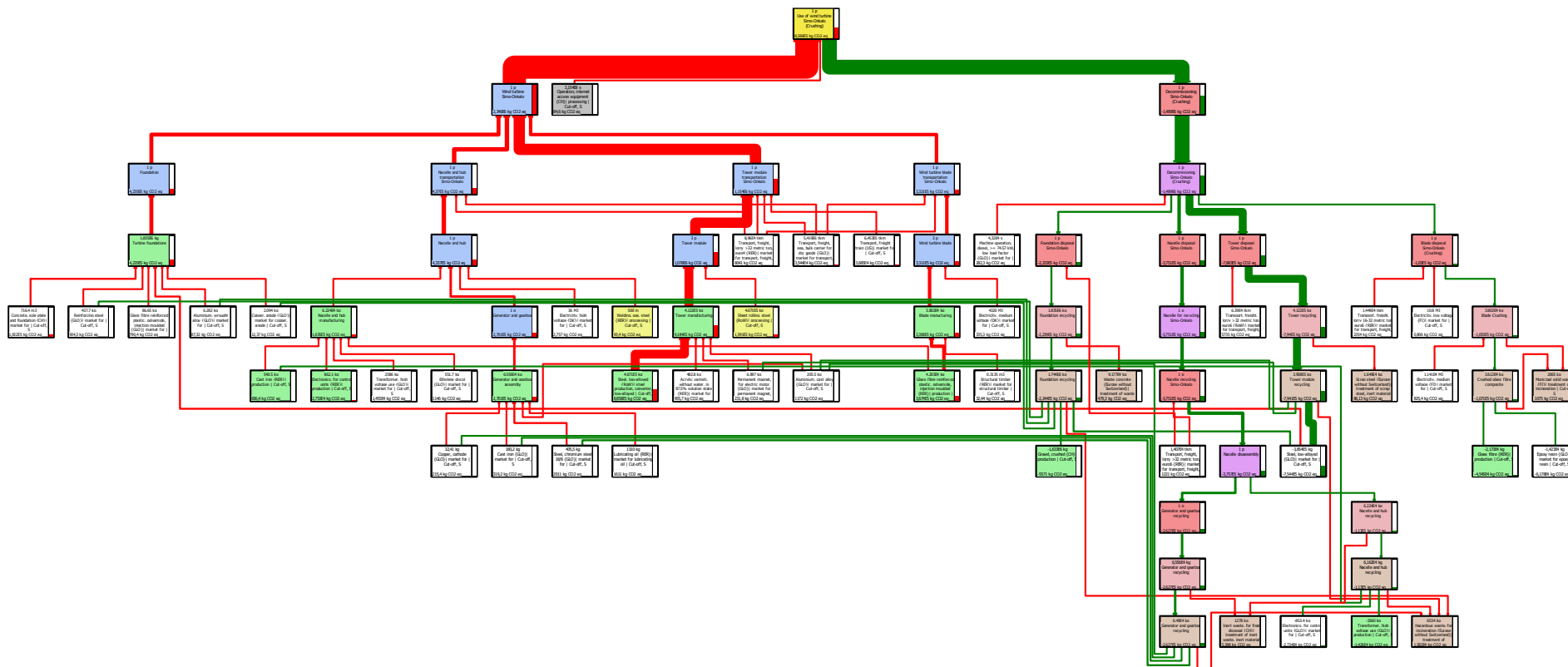
Kalajoen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto energiaksi poltolla



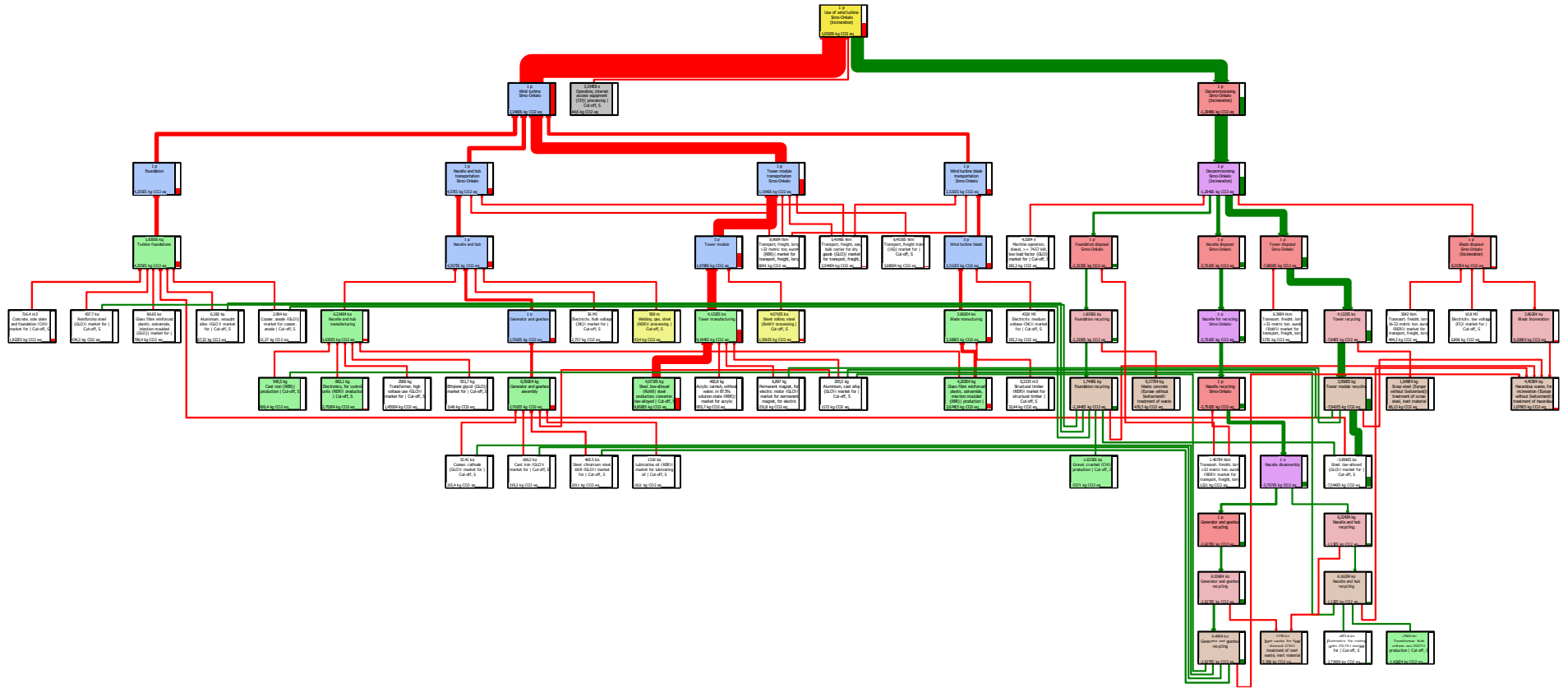
Kalajoen voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto kaatopaikkaloppusijoituksella



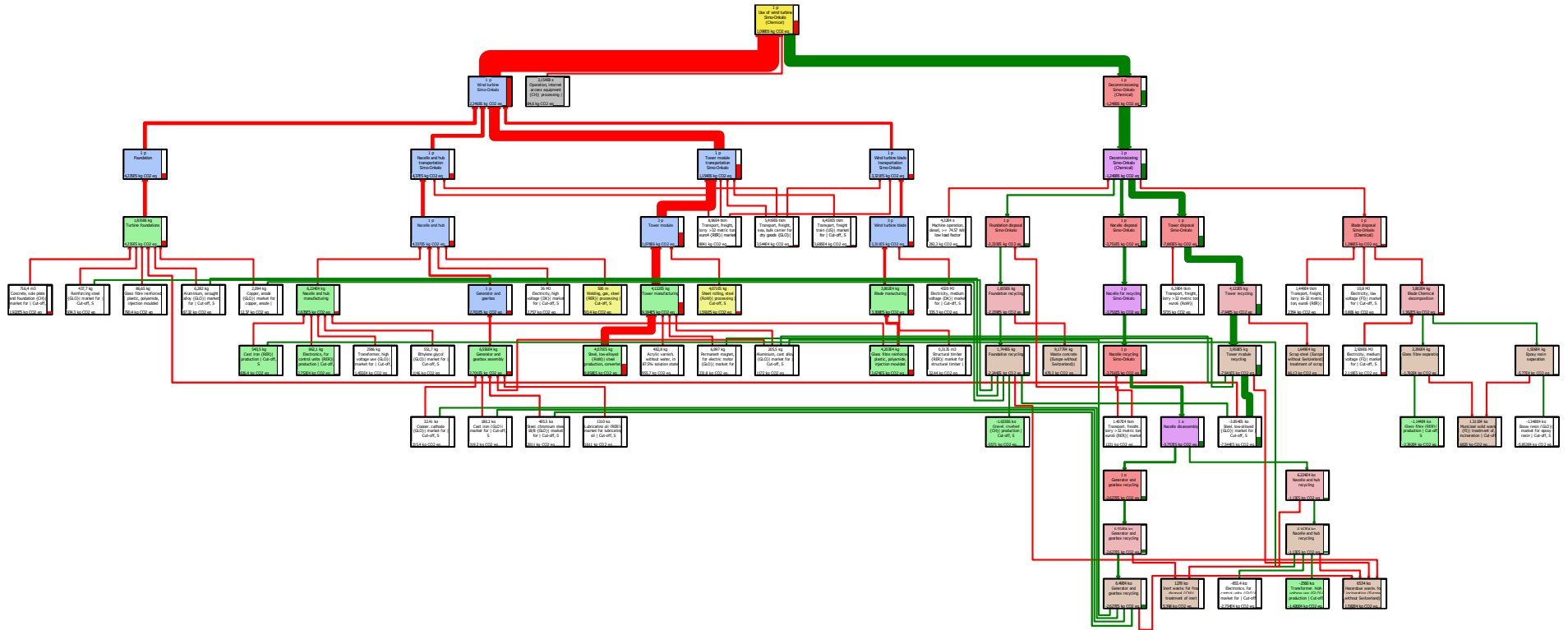
Simon voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto murskauskierityksellä



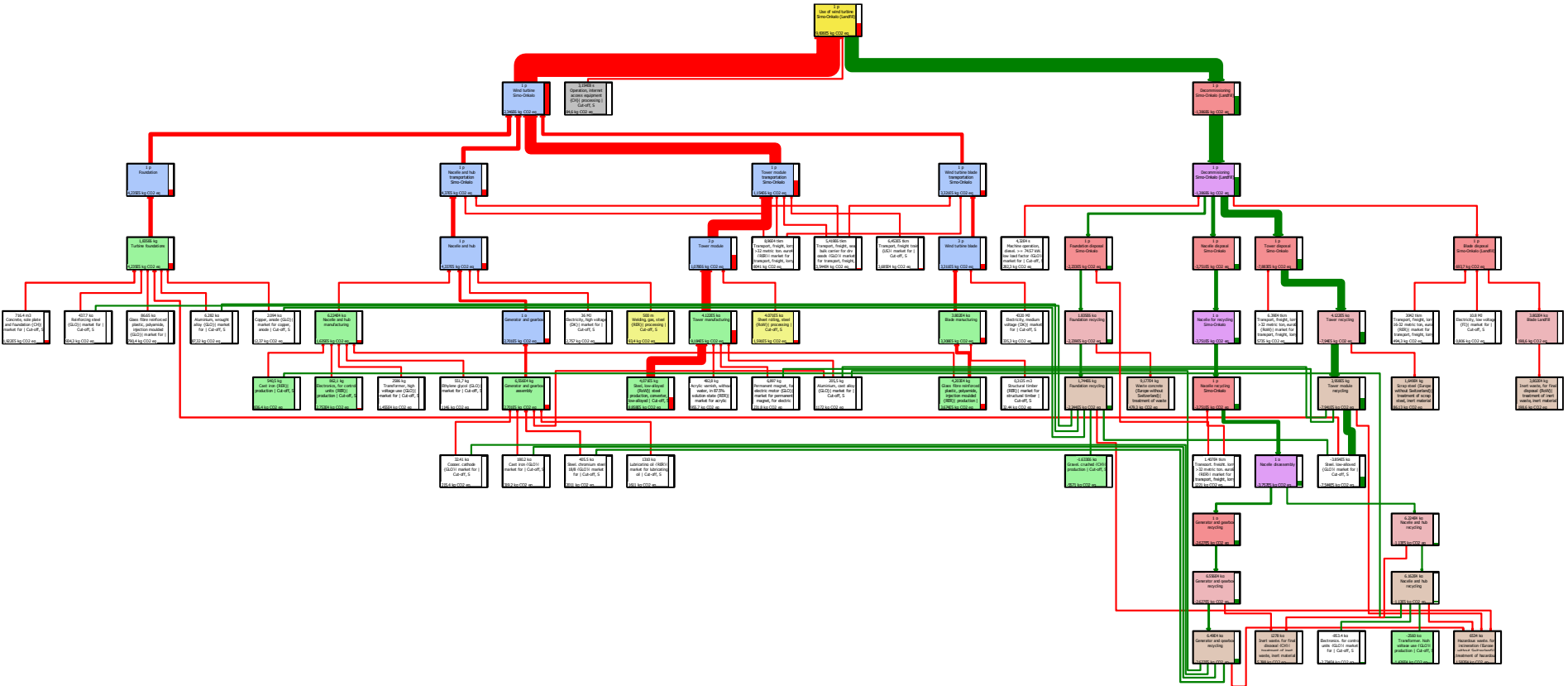
Simon voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto energiaksi poltolla



Simon voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto kemiallisella kierrätysellä



Simon voimalan 20 vuoden elinkaariverkosto kaatopaikkaloppusijoituksella



LIITE B: KYSELYTUTKIMUKSEN KYSYMYKSET

1. Mitä yritystä edustat?
2. Saako yrityksen nimeä käyttää diplomityössä?
 - a. Kyllä
 - b. Ei
3. Mitä tuulivoiman sidosryhmää edustat?
 - a. Tuulivoimatuottaja/-omistaja
 - b. Rakennuttaja
 - c. Laittevalmistaja
 - d. Hankekehittäjä
 - e. Operaattori
 - f. Konsultointi
4. Onko yrityksellä olemassa olevaa suunnitelmaa tuulivoimaloiden purkujätteen käsittelyyn?
 - a. Kyllä
 - b. Ei
 - c. Ei sovellu yrityksen toimenkuvaan
5. Onko yrityksenne tehnyt valmisteluja tuulivoimaloiden kierrättämistä varten?
 - a. Olemme jo kierrättäneet tuulivoimaloiden osia
 - b. Suunnitelma on olemassa
 - c. Alustavia tutkimuksia on tehty
 - d. Ei
 - e. Ei sovellu yrityksen toimenkuvaan
6. Näettekö, että tuulivoimaloiden lapoja tullaan kierrättämään tulevaisuudessa laajamittaisesti?
 - a. Kyllä
 - b. Ei
7. Minkälaisia kustannusvaikutuksia tuulivoimalan kierrättämisellä on?
 - a. Kierrättämisellä saadaan taloudellista hyötyä
 - b. Ei vaikutusta
 - c. Kierrättämisestä koituu lisäkustannuksia
8. Huomioitko tällä hetkellä mahdollisia tuulivoimalan purku- ja kierrätyskustannuksia investointipäätöksissä?
 - a. Kyllä
 - b. Ei
 - c. Ei sovellu yrityksen toimenkuvaan

9. Jos vastasitte "Kyllä" (kysymykseen 8), mitä otatte huomioon tehdessänne investointipäätöstä?
10. Jos vastasitte "Ei" (kysymykseen 8), näettekö, että tulevaisuudessa mahdollisia kierrätyskustannuksia täytyy ottaa huomioon investointipäätöstä tehtäessä?
11. Media tuo esiin välillä lapojen tämänhetkisen huonon kierrätettävyyden esille huonossa valossa. Näettekö, että julkisen mielipiteen ja/tai poliittisten vaikuttajien painotuksen johdosta tuulivoimaloiden purkujätteen käsittelyyn tulee tulevaisuudessa muutoksia?
12. Miten hallitsette kannattavuus- ja kustannusriskejä poliittisiin tai lakimuutoksiin liittyen?
13. Näettekö, että laitevalmistajien omat järjestelmät voimaloiden purkujätteen käsittelylle auttaisivat tuulivoimaloiden purkamisessa?
14. Miten vastuullisuus näkyy yrityksenne toiminnassa?
15. Ohjaatteko asiakkaitanne tuulivoimaloiden loppukäsittelyn kestävyys suhteen?
 - a. Kyllä
 - b. Ei
16. Edistättekö tuulivoimaloiden kierrättämistä ja/tai tuotteko asiakkailenne esille erilaisia loppukäsittelyvaihtoehtoja?
 - a. Kyllä
 - b. Ei
17. Voitteko tarkentaa minkälaisia edistyksiä tai vaihtoehtoa tuotte esille?

LIITE C: KYSELYTUTKIMUKSEN TIETOSUOJAILMOITUS

Tieteellisen tutkimuksen
tietosuojailmoitus 25.09.2023

1(4)

EU:n tietosuoja-asetus (EU 2016/679), art. 12, 13, 14

1. Tutkimuksen nimi, luonne ja kesto

Tutkimuksen nimi: Tuulivoimalan kierrättämisen Elinkaari- ja Kustannusvaikutus

- Kertatutkimus
 Seurantatutkimus

Tutkimuksen kestoaika: 01.09.2023 - 31.12.2023

Tietojenkäsittelyaika: 01.09.2023 – 30.04.2024, tai siihen asti, kunnes diplomityö on valmis

2. Rekisterinpitäjä

- Tutkimus tehdään työsuhteessa Tampereen yliopistona toimivaan Tampereen korkeakoulusäätiöön, jolloin rekisterinpitäjä on Tampereen korkeakoulusäätiö.

Tampereen korkeakoulusäätiö sr
33014 Tampereen yliopisto
Kalevantie 4, 33100 Tampere
Y-tunnus 2844561-8

- Kyseessä on opiskelijatutkimus (rekisterinpitäjä ei työsuhteessa Tampereen korkeakoulusäätiöön), jolloin rekisterinpitäjä on opiskelija.

Mikael Ahtonen, 0408257751, mikael.ahtonen@tuni.fi

- Kyse on yhteisrekisteristä, ja rekisterinpitäjiä on useita.

3. Yhteyshenkilö tutkimusrekisteriä koskevissa asioissa

Nimi Mikael Ahtonen
Puhelinnumero +358408257751
Sähköpostiosoite mikael.ahtonen@tuni.fi

4. Tutkimuksen vastuullinen johtaja tai siitä vastaava ryhmä

Nimi Mikael Ahtonen
Puhelinnumero 0408257751
Sähköpostiosoite mikael.ahtonen@tuni.fi

5. Tutkimuksen suorittajat

Mikael Ahtonen, AFRY Finland Oy, Tampereen Yliopisto

6. Tutkimusrekisterin tietosisältö

Tieteellisen tutkimuksen
tietosuojailmoitus 25.09.2023 2(4)

EU:n tietosuoja-asetus (EU 2016/679), art. 12, 13, 14

Rekisterissä käsitellään yritysten nimeen liitettäviä tietoja kuten: Yrityksen nimi, toimiala, yrityksen mielipide sekä toimet tuulivoimaloiden kierrättämiseen nyt ja tulevaisuudessa.

7. Yritystietojen tietolähteet

Mistä tiedot saadaan tai mistä ne kerätään: Tiedot saadaan Microsoft Forms kyselyllä. Yritykselle lähetään linkki kyselyyn sähköpostilla. Yrityksen edustaja vastaa valinnaisiin kysymyksiin parhaimman mukaan.

8. Yritystietojen käsittelyn tarkoitus

Tietoja hyödynnetään osana diplomityön kyselytutkimusosaa. Kyselyn tarkoituksena on saada selville mikä on tuulivoima-alalla toimivien yritysten tämänhetkinen näkemys tuulivoimaloiden kierrätykseen. Kysely on olennainen osa diplomityötä työn aihealueen vuoksi.

9. Yhteistyöhankkeena tehtävän tutkimuksen osapuolet ja vastuunjako

Mikael Ahtonen tekee tutkimuksessa kaiken tietojenkäsittelyn. Mikael Ahtosella on oikeus jakaa tutkimukseen liittyviä tietoja AFRY Finland Oy:lle tuotekehitystä ja tuulivoima-alan yleisnäkemyksen kartoittamista varten.

Kaikki tähän tutkimukseen liittyvät pyynnöt (mukaan lukien tietosuoja-asetuksen III luvussa tarkoitettut rekisteröidyn oikeuksien käyttämistä koskevat pyynnöt) toimitetaan alla olevalle yhteyshenkilölle:

Mikael Ahtonen, 0408257751, mikael.ahtonen@tuni.fi

Yhteyshenkilö välittää pyynnön tarvittaessa myös muille yhteisrekisterinpitäjinä toimiville organisaatioille.

10. Yritystietojen siirto tai luovuttaminen EU:n/ETA-alueen ulkopuolelle

Siirretäänkö rekisterin tietoja kolmanteen maahan tai kansainväliselle järjestölle EU:n tai ETA-alueen ulkopuolelle:

Ei

Kyllä, mihin:

Kuvaus käytettävistä suojatoimista:

11. Automatisoitu päätöksenteko

Automaattisia päätöksiä ei tehdä.

Tieteellisen tutkimuksen
tietosuojailmoitus 25.09.2023

3(4)

EU:n tietosuoja-asetus (EU 2016/679), art. 12, 13, 14

12. Rekisterin suojauksen periaatteet

Digitaalisen aineiston suojaaminen (esim. tietojärjestelmät ja laitteet):

- käyttäjätunnus
- salasana
- kaksivaiheinen käyttäjän tunnistus (MFA)
- pääsynhallinta verkko-osoitteiden avulla (IP-osoitteet)
- käytön rekisteröinti (lokitietojen kerääminen)
- kulunvalvonta
- muu, mikä:

Suorien tunnistetietojen käsittely:

- Suorat tunnistetiedot poistetaan analysointivaiheessa
- Aineisto on pseudonymisoitu
- Aineisto analysoidaan suoraan tunnistetiedoin, koska: Yrityksen toimenkuva ja nimi tarvitaan hyvälaatuisen datan saamiseksi. Julkisesti julkaistavaan diplomityöhön yrityksen tahdosta voidaan jättää yritys mainitsematta.

13. Tietojen käsittely tutkimuksen päättymisen jälkeen

- Tutkimusrekisteri hävitetään
- Tutkimusrekisteri arkistoidaan anonymisoituna ilman tunnistetietoja
- Tutkimusrekisteri arkistoidaan tunnistetiedoin

Mihin aineisto arkistoidaan ja miten pitkäksi aikaa: Aineisto arkistoidaan Microsoft Forms, Excel ja OneDrive ohjelmistoihin. Aineisto pidetään 30.04.2024, tai kunnes diplomityö on valmis.

14. Rekisteröidyn oikeudet ja niiden mahdollinen rajoittaminen

Rekisteröidyllä on, ellei tietosuojalainsäädännöstä muuta johdu:

- Tietojen tarkastusoikeus (oikeus saada pääsy henkilö- ja yritystietoihin)
 - o Rekisteröidyllä on oikeus tietää, käsitelläänkö hänen tietojaan vai ei, ja mitä tietoja hänestä on tallennettu.
- Oikeus tietojen oikaisemiseen
 - o Rekisteröidyllä on oikeus vaatia, että häntä koskevat virheelliset, epätarkat tai puutteelliset tiedot oikaistaan tai täydennetään ilman aiheetonta viivytystä. Lisäksi on oikeus vaatia, että tarpeettomat tiedot poistetaan.
- Oikeus tietojen poistamiseen
 - o Rekisteröidyllä on poikkeustapauksissa oikeus saada tietonsa kokonaan poistettua rekisterinpitäjän rekistereistä (oikeus tulla unohtetuksi).
- Oikeus käsittelyn rajoittamiseen
 - o Rekisteröidyllä on tietyissä tilanteissa oikeus pyytää tietojensa käsittelyn rajoittamista siksi aikaa, kunnes tiedot on asianmukaisesti tarkistettu ja korjattu tai täydennetty.
- Vastustamisoikeus
 - o Vastaajalla on oikeus milloin tahansa vastustaa tietojensa käsittelyä.
- Oikeus siirtää tiedot järjestelmästä toiseen
 - o Rekisteröidyllä on tietyissä tilanteissa oikeus saada häntä koskevat tiedot, jotka on toimittanut rekisterinpitäjälle, jäsenellyssä, yleisesti käytetyssä ja koneellisesti luettavassa muodossa, ja oikeus siirtää tiedot toiselle rekisterinpitäjälle.
- Oikeus tehdä valitus valvontaviranomaiselle
 - o Rekisteröidyllä on oikeus tehdä valitus erityisesti vakinaisen asuin- tai työpaikkansa sijainnin mukaiselle valvontaviranomaiselle, jos hän katsoo, että tietojen käsittelyssä rikotaan EU:n yleistä tietosuojasetusta (EU) 2016/679. Rekisteröidyllä on lisäksi oikeus käyttää hallinnollisia muutoksenhakukeinoja sekä muita oikeussuojakeinoja.

Yhteystiedot:

Tietosuojavaltuutetun toimisto
Käyntiosoite: Ratapihantie 9, 6. krs, 00520 Helsinki
Postiosoite: PL 800, 00521 Helsinki
Vaihde: 029 56 66700
Faksi: 029 56 66735
Sähköposti: tietosuoja@om.fi

Rekisteröidyn oikeuksien käyttämisestä koskevissa pyynnöissä noudatetaan rekisterinpitäjän tietopyyntöprosessia.