



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SAMULI SIEVI-KORTE
AURINKOSÄHKÖN JA TUULIVOIMAN
ELINKAARIARVIOINTI JA HIILIJALANJÄLKI

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
2. helmikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Samuli Sievi-Korte: Aurinkosähkön ja tuulivoiman elinkaariarviointi ja hiilijalanjälki

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 30 Sivua

Huhtikuu 2018

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Aurinkosähkö, tuulivoima, elinkaari, elinkaariarviointi, hiilijalanjälki

Usein aurinkosähkö ja tuulivoima mielletään energiantuotantomuotoina, jotka eivät aiheuta ympäristöön hiilidioksidipäästöjä laisinkaan. Kyseinen väite pitää pääasiassa paikkaansa niiden toimintavaiheen osalta, mutta sivullisia ympäristövaikutuksia syntyy eri vaiheissa niin aurinkosähkön, kuin tuulivoimankin elinkaarta.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan aurinkosähkön ja tuulivoiman hiilijalanjälkiä koko niiden elinkaaren osalta. Tarkastelu tapahtuu elinkaariarvioinnin avulla, jossa kummankin energiantuotantomuodon elinkaari jaetaan eri osaprosesseihin. Kunkin osaprosessin aiheuttamia ympäristövaikutuksia erikseen tarkastelemalla, voidaan muodostaa arvio aurinkosähkön ja tuulivoiman koko elinkaaren aikana muodostuvista hiilijalanjäljistä.

Tässä työssä hiilijalanjäljen suuruutta kuvataan hiilidioksidiekvivalentin avulla, suhtautamalla se tuotettuun energiamäärään nähden, saaden eri lähteistä kootuista tuloksista vertailukelpoisia keskenään. Työssä on koottuna tuloksia eri lähteistä, usean erilaisen aurinkosähköjärjestelmän ja tuulivoimalan osalta. Tulokset ovat hyvin tapauskohtaisia, mutta laskemalla niistä keskiarvo, voidaan saada jonkinlainen arvio tuulivoiman ja aurinkosähkön koko elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljistä.

Aurinkosähkön osalta tuloksia on esitettyä yksikiteisten- ja monikiteisten piikkenojen osalta, sekä kadmium-telluuri – ohutkalvokennon suhteen. Tuulivoiman osalta tulokset on eriteltyä mantereella sijaitseviin onshore-tuulivoimaloihin, sekä mantereen ulkopuolisiin offshore-tuulivoimaloihin. Tuloksissa on huomioituna muun muassa kunkin systeemin maantieteellinen sijainti, valmistumisvuosi ja kokoluokka.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	ELINKAARIARVIOINNIN PERUSPERIAATTEET.....	2
3.	AURINKOSÄHKÖN ELINKAARIARVIOINTI.....	4
	3.1 Aurinkosähkön elinkaari.....	4
	3.2 Eliniän vaikutus elinkaariarviointiin.....	9
4.	AURINKOSÄHKÖN HIILIJALANJÄLKI.....	10
	4.1 Hiilijalanjälki ja siihen vaikuttavat tekijät.....	10
	4.2 Hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttaminen.....	15
5.	TUULIVOIMAN ELINKAARIARVIOINTI.....	16
	5.1 Tuulivoiman elinkaari.....	16
	5.2 Eliniän vaikutus elinkaariarviointiin.....	19
6.	TUULIVOIMAN HIILIJALANJÄLKI.....	21
	6.1 Hiilijalanjälki ja siihen vaikuttavat tekijät.....	21
	6.2 Hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttaminen.....	24
7.	YHTEENVETO.....	25
	LÄHTEET.....	27

1. JOHDANTO

Maapallon väkiluvun kasvaessa ja teknologian levitessä yhä syrjäisimmillekin alueille, myös planeettamme energiantarve on kasvanut kehityksen myötä. Lainsäädäntö, eri maiden väliset sopimukset ja huoli energiavarojen riittävydestä ovat ajaneet energiantuotantoa kohti kestävämpiä ja ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja. Uusiutuvat energiantuotantomenetelmät ovat kasvattaneet osuuttaan maailman kokonaisenergiantuotannosta vuosi vuodelta, ja varsinkin tuuli- ja aurinkoenergia ovat nousseet eräiksi potentiaalisimmista vaihtoehdoista fossiilisen energiantuotannon korvaamiseksi [1].

Aurinkosähkö ja tuulivoima usein mielletään täysin saasteettomiksi energiantuotantomuodoiksi, mikä pitääkin suurimmalta osin paikkansa niiden operointivaiheen kannalta. Kuitenkin jos tarkastellaan kyseisiä menetelmiä niiden koko elinkaaren osalta, eli raaka-aineiden hankinnasta aina loppusijoitukseen saakka, havaitaan päästöjen syntymistä tietyissä vaiheissa kokonaisuutta. Tämän työn tarkoituksena onkin analysoida aurinkosähkön ja tuulivoiman elinkaarten rakennetta, sekä lisäksi tarkastella niiden aiheuttaman hiilijalanjalan suuruutta koko elinkaaren ajalta.

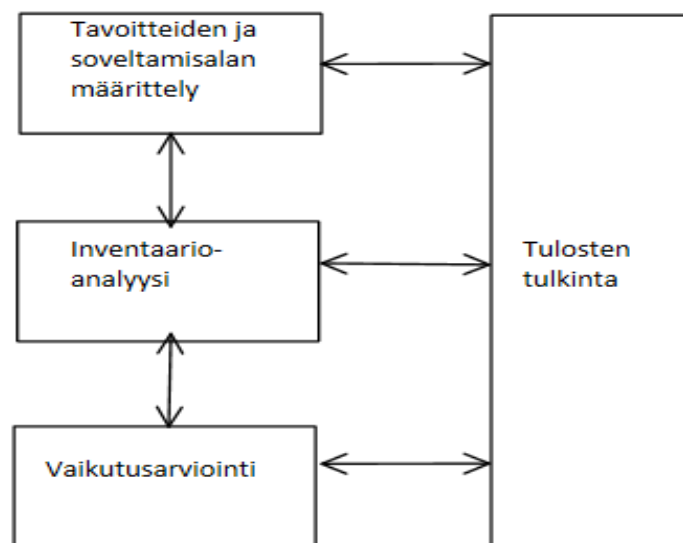
Kandidaatintyön alussa käsitellään elinkaariarviointia käsitteenä, sekä avataan siihen liittyviä tekijöitä ja eri osa-alueita. Luku kolme keskittyy aurinkosähkön elinkaarianalyysiin eli esittelemään sen elinkaaren eri prosessit, sekä tarkastelemaan aurinkosähkön elinikää ja siihen vaikuttamista. Aurinkosähkön osalta tarkastelu keskittyy pääasiassa moni- ja yksikiteisiin piikennoihin, sekä kadmium-telluuri -ohutkalvokennoon. Luvun neljä tarkoituksena on esitellä tekijät jotka edesauttavat hiilidioksidin ja muiden päästöjen syntymistä aurinkosähkösystemien elinkaaren aikana, analysoida saatuja tuloksia sekä pohtia niiden syntymisen ehkäisemistä.

Luku viisi käsittelee tuulivoiman elinkaarirakennetta ja sen eri osaprosesseja. Lisäksi luvussa pohditaan eliniän vaikutusta tuulivoiman elinkaariarviointiin. Luvussa kuusi analysoidaan tuulivoiman hiilijalanjälkeä samalla periaatteella kuin aurinkosähkönkin tapauksessa. Seitsemännessä luvussa vedetään yhteen työn aikana esiteltyt asiat, sekä tehdään vertailua saaduista tuloksista ja havainnoista aurinkosähkön ja tuulivoiman välillä.

2. ELINKAARIARVIOINNIN PERUSPERIAATTEET

Elinkaariarviointi on menetelmä erilaisten tuotteiden ja prosessien koko elinkaaren aikana aiheutuvien ympäristövaikutusten arvioimiseksi. Tuotteen tai prosessin elinkaari koostuu esimerkiksi sen vaatimien raaka-aineiden hankkimisesta, niiden prosessoinnista ja kuljetuksesta, itse tuotteen valmistuksesta, kuljetuksesta lopulliselle sijoituspaikalle, käytöstä, huollosta ja loppusijoituksesta. [2]

Elinkaariarviointi perustuu ISO 14040 ja ISO 14044 standardeihin. Standardi ISO 14040 määrittelee elinkaariarvioinnin pääperiaatteet, kun taas ISO 14044 asettaa elinkaariarvioinnille laatuvaatimukset, sekä antaa ohjeita eri arviointityökalujen käyttämiseksi. Standardien tarkoituksena on luoda puitteet erilaisille elinkaarianalyysille, sekä mahdollistaa niiden keskinäinen vertailu. Standardien perusteella elinkaariarviointi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen kuvan 1 esittämällä tavalla. [3,4]



Kuva 1. Elinkaariarvioinnin vaiheet [5].

Kuten kuvasta 1 voidaan havaita, yhtenä elinkaariarvioinnin keskeisimmistä työkaluista on liikkuminen eri vaiheiden välillä, jolloin arvioinnin aikana saatuja tuloksia ja niiden välistä johdonmukaisuutta voidaan tarkastella läpi koko analyysin. Liikkumisella pyri-

tään varmistamaan elinkaariarvioinnin mahdollisimman tarkka paikkansapitävyys tulosten valossa, sekä mahdollistamaan virheellisten tulosten havaitseminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa elinkaariarviointia. [5]

Elinkaariarvioinnin ensimmäisenä vaiheena on tutkimuksen tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely. Tutkimuksen laajuuden perusteella usein määräytyy, tehdäänkö arviointi yksinkertaistetulla vai yksityiskohtaisella tasolla [5]. Tässä työssä arviointi tapahtuu yksinkertaistetulla tasolla, jolloin on mahdollista keskittyä tarkastelemaan hiilidioksidipäästöjen avulla ainoastaan hiilijalanjälkeä. Toisessa vaiheessa, eli inventaarioanalyysissä tuotteen tai prosessin koko elinkaari ajatellaan yhdeksi prosessiketjuksi, ja sen jokaista yksittäistä osaprosessia tarkastellaan erikseen energiantuotannon ja -kulutuksen, sekä ympäristölle aiheutuvien rasitusten kannalta. [6]

Vaikutusarviointi on elinkaariarvioinnin kolmas vaihe, ja siinä tarkastellaan tuotteen tai prosessin vaikutuksia ympäristön näkökulmasta. Vaihe perustuu inventaarioanalyysissä saatujen tulosten tulkintaan ja vertailuun, hyödyntämällä esimerkiksi jo tiedossa olevia päästöstandardien tuloksia [7]. Elinkaariarvioinnin viimeisenä vaiheena on niin sanottu tulosten tulkinta, jota kuitenkin tapahtuu kaiken aikaa analyysin edetessä. Vaiheen tarkoituksena on vertailla tutkimusta muiden vastaavien elinkaariarviointien kanssa, ja tarkastella omaa analyysiä näiden pohjalta [2].

Elinkaariarvioinnin tekemiseen on olemassa kaksi erilaista lähestymistapaa jotka ovat attributional-tyyppinen elinkaariarviointi ja consequential-tyyppinen elinkaariarviointi. Attributional-tyyppisen lähestymistavan tarkoituksena on antaa tietoa jonkin tuotteen valmistuksen, käytön ja loppusijoituksen aiheuttamista ympäristövaikutuksista määrättyllä tuotantovolyymillä. Consequential-tyyppisen lähestymistavan tarkoituksena on taas tarkastella esimerkiksi pienten tuotantovolyymimuutosten vaikutusta koko elinkaaren aikana syntyviin ympäristövaikutuksiin. Kyseinen lähestymistapa pyrkii ottamaan huomioon kulutuksen ja tuotannon muutoksiin vaikuttavat taloudelliset tekijät, sekä historiallisesti toistuvat trendit. [8]

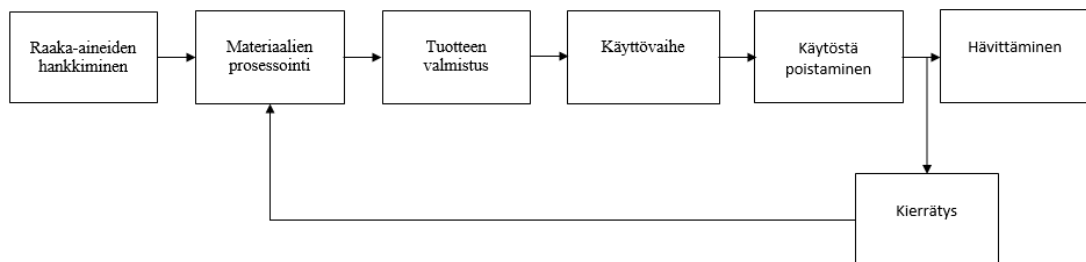
Tässä työssä elinkaariarviointi tapahtuu yksinkertaistetulla tasolla, keskittyen aurinkosähkön ja tuulivoiman hiilijalanjälkeen vaikuttaviin tekijöihin. Elinkaariarvioinnin lähestymistapana on attributional-tyyppinen lähestymistapa, jonka avulla sekä aurinkosähkön, että tuulivoiman elinkaaren eri vaiheiden aikana syntyvät ympäristövaikutukset pystytään huomioimaan yhtenä kokonaisuutena, jonka perusteella pystytään tuottamaan vertailukelpoista tietoa hiilijalanjälkeen liittyen.

3. AURINKOSÄHKÖN ELINKAARIARVIOINTI

Inventaarioanalyysi on tärkeä vaihe elinkaariarvioinnin kannalta, sillä sen avulla arvioinnin kohteena oleva tuote tai prosessi voidaan jakaa pienempiin osaprosesseihin. Kutakin prosessiketjun osaa voidaan tarkastella erikseen niiden välittömien ja välillisten ympäristövaikutusten, sekä energiankulutuksen kannalta. Inventaarioanalyysin kannalta on olennaista käydä läpi arvioinnin kohteena olevan tuotteen tai prosessin elinkaari kokonaisuudessaan. [6]

3.1 AURINKOSÄHKÖN ELINKAARI

Tarkasteltaessa aurinkosähkön elinkaarta, tulee sen kaikki osaprosessit huomioida aina raaka-aineiden hankkimisesta sen käyttöön jälkeisiin toimenpiteisiin saakka. Aurinkosähköllä tarkoitetaan auringon säteilyenergian hyödyntämistä sähkön tuotannossa, eli joko aurinkopaneelien tai keskitettävien aurinkovoimaloiden avulla. Tässä työssä keskitytään aurinkopaneelien hyödyntäviin sähköntuotantomenetelmiin. Aurinkosähköön liittyvä prosessiketju voidaan jakaa osaprosesseihin kuvan 2 mukaisesti.



Kuva 2. Aurinkosähkön elinkaaren prosessiketju [7].

Kuvan 2 osoittamalla tavalla aurinkosähkön elinkaaren prosessiketju lähtee liikkeelle systeemin toimintaan liittyvien raaka-aineiden hankkimisella. Tarvittavat materiaalit riippuvat kennotyypistä, jolloin raaka-aineiden tarve vaihtelee käytettävän paneelityypin koon ja sijoituspaikan mukaan.

Tällä hetkellä aurinkopaneelien suurinta markkinaosuutta pitävät hallussaan piikennot [1], joiden sisältämän piin valmistus vaatii kvartsihiekan louhimista. Toinen merkittävä kennomuoto piihin perustuvien menetelmien lisäksi on niin sanotut ohutkalvokennot, joista suurimman osuuden kattavat kadmium–tellsuuri -kennot. Raaka-aineena kyseinen kennotyyppi vaatii sinkki- ja kuparimalmien louhimista. [7]

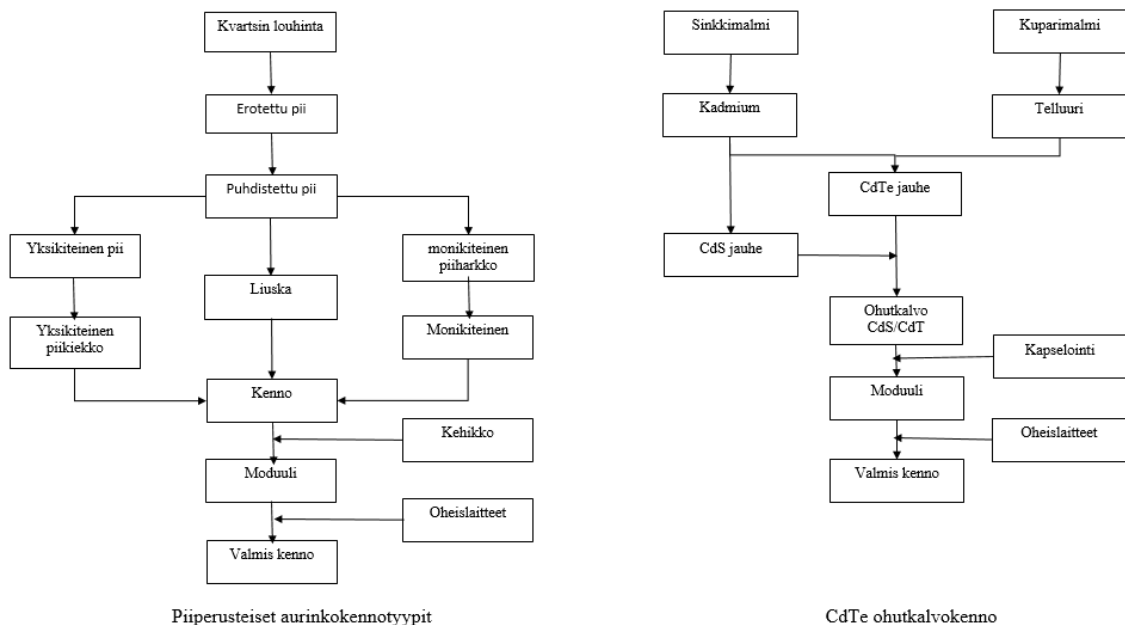
Edellä mainittujen raaka-aineiden lisäksi tarvitaan useita erilaisia välillisiä materiaaleja niin paneeleihin ja tukirakenteisiin, kuin myös niihin liittyviin oheislaitteisiin. Päästöjä syntyy niin raaka-aineiden hankkimisesta, kuin myös niiden kuljettamisesta louhintapaikalta prosessointipaikalle.

Raaka-aineiden hankkimisen jälkeen on seuraavana osaprosessina vuorossa materiaalien prosessointi. Prosessointi piikkenojen osalta tarkoittaa kvartsihiekan sisältämän amorfisen piidioksidin pelkistämistä valokaariuunissa, jotta se voidaan muuttaa niin sanotun Siemensin prosessin avulla puhtaaksi piiksi, jota voidaan lopulta hyödyntää aurinkokennoissa. Pii tulee vielä prosessoida sen mukaan, käytetäänkö sitä moni- vai yksikiteisissä piikkennoissa. [7]

Kadmium–telluuri -kennon materiaalien prosessointi alkaa sinkki- ja kuparimalmien sulattamisella, minkä sivutuotteena syntyy kadmiumia ja telluuria. Kyseiset aineet puhdistetaan ja jalostetaan kadmium–telluuri -jauhoksi, sekä kadmium–natrium -jauhoksi. Kyseiset jauhot lopulta käsitellään seokseksi, jolla on puolijohtavia ominaisuuksia. [7]

Piikkenojen vaatiman puhtaan piin valmistaminen vaatii paljon energiaa. Siemensin prosessilla tuotetun puhtaan piin valmistukseen vaadittava energiamäärä on noin 90 kWh kilogrammaa kohti. Uudemmissa vielä kehitteillä olevilla kemiallisilla metodeilla vaadittava energiamäärä on saatu laskettua noin 15 kWh:iin kilogrammaa kohti. [9,10]

Materiaalien prosessointi ja itse tuotteen valmistus on esitettyä sekä piikkenojen, että kadmium–telluuri -kennon osalta kuvassa 3.



Kuva 3. Aurinkokennojen valmistusprosessi [7].

Piikentöjen osalta materiaalien prosessoinnin jälkeen seuraava vaihe riippuu kennon tyypistä. Yksikiteisten piikentöjen osalta valmistus jatkuu niin sanotulla Czochralskin prosessilla, jossa puhdistettu pii sulatetaan korkeassa lämpötilassa, ja seokseen lisätään esimerkiksi booria puolijohdeominaisuuksien saavuttamiseksi. Valmiista seoksesta tehdään iso sylinterimäinen puolijohdeseos lämpötilaa vaihtelemalla, sekä venyttämällä sulaa piiseosta. Sylinterimäisestä piiharkosta voidaan leikata tarkoitukseen sopivia paloja, jotka ovat aurinkokennojen tapauksessa ohuita yksikiteisiä piikiekköjä. [11]

Monikiteisen piikennon tapauksessa Czochralskin prosessia ei hyödynnetä, vaan piin kiteet jäävät näkyviin kiekon pinnalle. Näin valmistetulla monikiteisellä piikiekkolla on huomattavasti huonompi hyötysuhde yksikiteiseen verrattuna, mutta sen valmistuskustannukset ovat alhaisemmat. Useita kiekkoja kootaan kennomaiseksi rakenteeksi, jota tuetaan kehikon avulla. Yleensä alumiinista tehdyn kehikon tarkoituksena on toimia fyysisenä tukena, sekä helpottaa valmiin aurinkopaneelin asentamista. Myös ohuet, liuskamaiset aurinkokennot ovat kehityksen alla. [7,12]

CdTe ohutkalvokennon tapauksessa materiaalien prosessointivaiheessa valmistetut jauheet sijoitetaan kerroksittain ohueen substraattiin, jona toimii esimerkiksi lasi tai taipuisa muovi. Ohutkalvokennot eivät tarvitse enää erillistä kehikkoa, jolloin niiden kokonaisrakenteen pysyy erittäin ohuena. [9]

Sähkön tuottamista varten aurinkosähkösystemit vaativat tukeen erilaisia oheislaitteita. Oheislaitteet vaihtelevat voimalan koon ja sijoituspaikan mukaan, esimerkiksi kevyet katoille asetettavat voimalat vaativat invertterin sähkön muuttamiseksi tasavirrasta vaihtovirraksi. Lisäksi tarvitaan esimerkiksi erilaisia kiinnikkeitä ja kaapeleita [7]. Prosessin ja itse tuotteiden valmistuksen aikana syntyviä päästöjä ja niiden energiantarvetta käsitellään tarkemmin luvussa neljä.

Aurinkosähkösystemien käyttövaiheella tarkoitetaan vaihetta, jolloin ne tuottavat sähköenergiaa. Käyttövaiheen kestoaika on arviolta noin 30 vuotta, joista ensimmäiset 2-3 vuotta kuluu järjestelmän valmistukseen käytetyn energian takaisin tuottamiseksi [13]. Kuitenkin oheislaitteiden kuten inverttereiden kuluu osat vaativat vaihtamista noin kymmenen vuoden välein, joka omalta osaltaan lisää päästöjä ja energiantarvetta huolto-työnsä mielessä [7].

Aurinkosähkösystemin käytöstä poistaminen tarkoittaa sen käyttövaiheen jälkeisiä toimia. Koska systemit ovat varsin pitkäikäisiä, tietoa vaiheesta ei ole paljoa saatavilla muuta kuin vioittuneiden tai valmistuksessa epäonnistuneiden kennojen osalta. Tästä johtuen myöskään ison skaalan kierrätyslaitoksia ei ole vielä juurikaan olemassa, joten kierrätys on haastavaa sekä tekniseltä, että taloudelliselta kannalta. Kuitenkin elinkaaren loppuvaihetta lähestyviä kennoja on tulossa koko ajan enemmän, mahdollistaen prosessin kehittymisen. [10]

Kun aurinkokenno poistetaan käytöstä, osa materiaaleista voidaan kierrättää ja osa joudutaan hävittämään. Taulukko 1 havainnollistaa aurinkokennojen kierrätykseen liittyviä tekniikoita.

Taulukko 1. Aurinkokennojen kierrätystapoja [10].

Kennotyyppi:	Piikkenno	Ohutkalvokenno
Tekniikka:	Terminen/fyysinen hajottaminen Manuaalinen erittely Syövyttäminen	Fyysinen hajottaminen Kemiallinen erottaminen kiinteä-neste erittely Seulonta Saostaminen
Kierrätyksen tehokkuus:	90% lasista 95% puolijohdemateriaalista 97% ehjästä piikiekosta	90% lasista 95% puolijohdemateriaaleista (Cd, Te)

Kuten taulukosta käy ilmi, kierrätys perustuu mekaaniseen ja kemialliseen käsittelyyn. Piikkenojen mekaaninen käsittely alkaa alumiinikehikoiden ja kytkentärasioiden manuaalisella irrottamisella, jota seuraa loppumoduulin hajottaminen sekä koneellisesti, että käsin vasaran avulla. Hajotetuista moduuleista erotellaan materiaalit niiden ominaisuuksien mukaan, jakaen ne esimerkiksi ferrometalleihin, muoveihin ja lasiin. Erotellut materiaalit voidaan hyödyntää mahdollisuuksien mukaan uusien kennojen valmistuksessa. [14]

Termisessä hajottamisessa moduuleja poltetaan siten, että puolijohtavat osat suojataan palamiselta, mutta muoviset osat poltetaan materiaalien erottelun helpottamiseksi. Jäljelle jääneet materiaalit erotellaan manuaalisesti, joista lasi ja metallit kierrätetään. Piikiekot voidaan niiden kunnon mukaan käyttää joko suoraan uusiin kennoihin, tai uuden kiekon raaka-aineeksi. Kennojen uudelleenkäyttö on kuitenkin harvinaista, ja suurin osa piikenoista meneekin uusien paneelien raaka-aineeksi. [10]

Kierrättämisessä voidaan käyttää myös termisen ja mekaanisen käsittelyn hybridiä, joka mahdollistaa kennomateriaalien murskaamisen entistä pienemmiksi palasiksi, helpottaen niiden uudelleenkäyttämistä uusien aurinkosähkösystemien raaka-aineena. Hävittämisen kohteeksi joutuvien materiaalien osuus on sangen pieni, ja osaprosessissa pyritäänkin siihen että kaikki aurinkosähkösystemien materiaali pystyttäisiin kierrättämään. Materiaalia kuitenkin menee hukkaan esimerkiksi kemiallisten käsittelyiden aiheuttamassa syöpymisessä, sekä termisen käsittelyn aikana tapahtuvasta materiaalien polttamisesta johtuen. Myös materiaalit, joihin on päässyt epäpuhtauksia kierrätysprosessin aikana joutuvat hävitettäväksi. [14]

Taulukossa 2 on esimerkkinä piikenoista saatavat materiaalit kierrätysprosessin aikana. Taulukkoon on koottuna kennojen sisältämät raaka-ainemateriaalit, sekä niiden osuus kennon kokonaismassasta 1000 kg:aan suhtautettuna.

Taulukko 2. Piikennon kierrätysmateriaalien osuudet suhtautettuna 1000 kg:aan [14].

Komponentti	Määrä (kg)	Osuus (%)
Lasi	700	70
Kehikko (alumiinia)	180	18
Kapselointikerros (polymeerejä)	51	5,1
Piikeno	36,5	3,65
Takakerros (polymeerejä)	15	1,5
Sähköjohdot (kupari + polymeerit)	10	1
Sisäiset johtimet (alumiini)	5,3	0,53
Sisäiset johtimet (kupari)	1,14	0,11
Hopea	0,53	0,053
Muut metallit (tina, lyijy...)	0,53	0,053
Yhteensä	1000	100

Taulukosta huomataan, että itse piikiekkujen osuus koko moduulin massasta on vain hie-man yli kolme prosenttia. Koska lasi, kehikko ja pii saadaan kierrätettyä lähes kokonaan, on hävitettäväksi joutuvien materiaalien prosentuaalinen osuus sangen pieni.

Ohutkalvokennojen kierrätysprosessi alkaa kennojen silppuamisella ja vasaroinnilla kunnes materiaali on tarpeeksi pienissä paloissa kerrosten välisten sidosten hajoamisen kan-nalta. Puolijohtavat kalvot irrotetaan syövyttämällä ja saostamalla ne nesteeksi. Kiinteät ja nestemäiset aineet erotetaan toisistaan, ja kiinteät aineet erotellaan manuaalisesti toi-sistaan kierrätystä varten. Metallipitoisesta nesteestä voidaan erottaa kadmiumia ja tel-luuria uuden kennon raaka-aineiksi. Nesteen sisältämät muut metallit mahdollisuuksien mukaan joko kierrätetään tai hävitetään. [10]

Molemmissa tapauksessa noin 90 % kennojen kokonaismassasta voidaan siis käyttää uu-sien kennojen valmistuksessa, ja vain noin 10 % häviää kierrätyksen aikana. On kuitenkin huomattava, että materiaalien häviötä tapahtuu myös materiaalien prosessointivaiheessa, esimerkiksi piikiekkujen leikkaamisessa ja Siemensin prosessin aikana. [10]

3.2 ELINIÄN VAIKUTUS ELINKAARIARVIOINTIIN

Tuotteen tai prosessin elinikä on tärkeä tekijä elinkaariarvoinnin kannalta, ja vaikuttaa merkittävästi elinkaaren aikana syntyvien ympäristövaikutusten analysointiin. Aurinkosähkön elinkaaren aikana syntyvät ympäristöhaitat keskittyvät sen käyttövaiheen ulkopuolelle, minkä takia ympäristövaikutusten suuruuden määräävät pääasiassa sen elinkaaren muut vaiheet. Käyttövaiheen pituutta kasvattamalla, voidaan kuitenkin ympäristölle haitallisten saasteiden määrää vähentää suhteutettuna tuotettavaan energiamäärään nähden.

Aurinkosähkösystemien arvioitu elinikä on tällä hetkellä kohteesta riippuen keskimäärin 25–30 vuotta. Koska itse kennoissa ei ole kuluvia osia, niiden voidaan olettaa toimivan kymmenien vuosien ajan. Kuitenkin on otettava huomioon kennojen tuottaman tehon heikkeneminen ajan myötä, joka vaikuttaa kennon tuottamaan kokonaisenergiaan sen elinkaaren aikana. Yhdysvaltalaisen NREL:in (National Renewable Energy Laboratory) mukaan kennon tuottama teho heikkenee noin 0,5 % vuodessa, mikä tarkoittaa noin 15 % heikkenemistä 30 vuoden käyttövaiheen aikana. Syynä heikkenemiseen on kennojen altistuminen luonnonilmiöille, kuten kuumuudelle, tuulelle ja lumikuormille. [15]

Itse aurinkokennot tuottavat tasavirtaa, joten niiden yhteyteen tarvitaan invertteri muuttamaan virtaa vaihtovirraksi. Invertteri on aurinkosähköjärjestelmän älykäs osa, joka esimerkiksi kontrolloi tuotetun sähkön käyttöä aurinkosähköjärjestelmän yhteydessä. Invertterin voidaan olettaa toimivan koko käyttövaiheen ajan, mutta sen sisältämät kuluvat osat voidaan joutua vaihtamaan useampaan otteeseen käyttövaiheen aikana, lisäten kustannuksia ja ympäristövaikutuksia. [7]

Käyttöiän vaihtelut näkyvät myös kenno- ja invertterivalmistajien takuuajoissa. Esimerkiksi aurinkopaneelivalmistaja Trino Solarin antaa paneeleille 25 vuoden takuun, jossa he lupaavat kennojen tuottavan vähintään 80 % nimellistehostaan kyseisenä aikana [16]. Invertterivalmistaja XPower antaa taas malleilleen vain kahden vuoden takuun invertterimallista riippumatta [17].

Käyttöikää määrittäessä on siis löydettävä oikea tasapaino kennon tehon heikkenemisen ja uuden kennon valmistuksesta aiheutuvien kulujen ja ympäristövaikutusten suhteen. Pidettämällä kennon elinikää voidaan kuitenkin vähentää sen muiden osaprosessien aiheuttamia ympäristövaikutuksia, kun niitä tarkastellaan tuotettua energiaa kohti, vaikuttaen siis merkittävästi tuotteen hiilijalanjäljen suuruuteen.

4. AURINKOSÄHKÖN HIILIJALANJÄLKI

Elinkaariarvoinnin avulla on mahdollista arvioida jonkin tuotteen tai prosessin aiheuttamia ympäristövaikutuksia sen koko elinkaaren ajalta. Kun elinkaariarviointi tehdään yksinkertaistetulla tasolla, voidaan keskittyä vain yhteen valittuun saasteeseen. Tässä työssä on valittu tarkasteltavaksi ympäristöhaitaksi hiilidioksidi, jonka avulla voidaan arvioida aurinkosähkön ja tuulivoiman hiilijalanjälkeä.

4.1 Hiilijalanjälki ja siihen vaikuttavat tekijät

Hiilijalanjälki on prosesseille, tuotteille ja tapahtumille kehitetty indikaattori, joka kuvaa tarkasteltavan kohteen koko elinkaaren aikana aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää. Yleensä hiilijalanjäljessä huomioidaan pääasiassa vain hiilidioksidin vaikutukset, sillä muiden kasvihuonekaasujen kuten metaanin vaikutukset ovat sangen pieniä hiilidioksidiin verrattuna. [18]

Jonkin systeemin hiilijalanjälki ilmoitetaan yleensä niin sanottuna hiilidioksidiekvivalenttina, josta käytetään lyhennettä CO₂e. Hiilidioksidiekvivalentti ilmaisee systeemin aiheuttamien kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävät vaikutukset, suhtautettuna hiilidioksidin vaikutuksiin sadan vuoden ajanjaksolla [18]. Tässä työssä hiilijalanjälkeä tarkastellaan tuotetun sähköenergian suhteen, jolloin tuloksista saadaan vertailukelpoisia.

Aurinkosähkösysteemin hiilijalanjäljessä on eroavaisuutta systeemin toteutustavasta riippuen. Hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttavat kennotyyppi, aurinkosähkösysteemin kokoluokka, tarvittavat oheislaitteet, sekä sijainti. Osaprosessien ympäristövaikutukset ovat sidonnaisia kennotyyppiin ja systeemin kokoon. Aurinkosähkösysteemin valmistukseen käytetty energiapaletti vaihtelee maantieteellisestä sijainnista riippuen, ja hiilijalanjäljen suuruus riippuukin uusiutuvien sähköntuotantomenetelmien ja fossiilisten menetelmien suhteesta. Sijainti usein myös määrittää logistiikan tarpeen ja sen toteuttamiseen vaadittavien kulkuvälineiden, kuten laivojen, junien ja kuorma-autojen käytön. [19]

Kun aurinkosähkön elinkaari jaetaan luvun kolme mukaisesti osaprosesseihin, voidaan kunkin elinkaaren vaiheen ympäristövaikutuksia arvioida yksitellen. Kun jokaisen segmentin hiilidioksidiekvivalentti saadaan selvitettyä, niiden summan avulla voidaan muodostaa aurinkosähkösysteemille suuntaa antava hiilijalanjälki. Taulukkoon 3 on koottuna aurinkosähkön elinkaaren aikana hiilijalanjälkeä lisäävät tekijät kunkin osaprosessin kannalta. Vaikuttajat tekijät ovat pääpiirteissään samat, kennotyypistä ja aurinkosähkösysteemistä riippumatta.

Taulukko 3. Hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät osaprosesseittain

Osaprosessi:	Hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät:
Raaka-aineiden hankkiminen	Malminetsintä Kaivostoiminta Louhintamenetelmät Logistiikka Kaivannaisjätteiden käsittely
Materiaalien prosessointi	Prosessoinnin vaatima energia Siemensin prosessin päästöt Logistiikka
Tuotteen valmistus	Czochralskin prosessin päästöt Oheislaitteet Logistiikka Käyttöpaikan valmistelut
Käyttövaihe	Huoltotoimenpiteet
Käytöstä poistaminen	Terminen hajottaminen Kemialliset menetelmät Hävittämiseen liittyvä kalusto logistiikka

Raaka-aineiden hankintavaiheen hiilidioksidipäästöt riippuvat louhimisen tarpeesta. Jos on mahdollista käyttää jo olemassa olevaa kaivosta esimerkiksi kvartsihiekan louhintaan, vältetään uuden kaivoksen etsinnän ja perustamisen tuomista ympäristövaikutuksista. Itse louhinta ja kuljetus aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä, sekä myös louhinnan aikana syntyvien sivutuotteiden kuten sivukivien ja maanpoistomassan kuljetus ja loppusijoitus vaikuttavat hiilijalanjälkeen negatiivisesti. [20]

Materiaalien prosessointi on suurin ympäristövaikutusten aiheuttaja aurinkosähkösysteemeissä vaiheen suuren energiantarpeen takia. Prosessin hiilijalanjäljen määrää pitkälti vaadittavan energian tuottamiseen käytetty energiapaletti, eli mistä eri sähköntuotantovaihtoehdoista energia on saatu. Esimerkiksi energiateollisuus ry:n tuottaman tutkimuksen mukaan 80 % Suomen sähköntuotannosta vuonna 2017 tapahtui hiilineutraaleilla

menetelmillä [21], kun taas Kiinassa kivihielestä tuotetun sähkön osuus on lähes 80 % kokonaistuotannosta [22]. Hiilidioksidipäästöjä syntyy myös esimerkiksi Siemensin prosessin aikana tapahtuvasta polttamisesta, sekä kupari- ja sinkkimalmien sulattamisesta.

Itse tuotteen valmistus vaatii energiaa prosessoinnin tapaan, jolloin käytettävä sähkön-tuotantomenetelmä on määräävässä osassa hiilidioksidipäästöjen kannalta. Ympäristövaikutukset riippuvat myös lopputuotteesta ja sen koosta. Mitä isompi rakennettava aurinkosähkösystemi on, sitä enemmän oheislaitteita se tarvitsee toimintaansa varten. Esimerkiksi isot maahan asetettavat paneelit vaativat betonivalokset, kun taas pienemmille katolle asennettaville paneeleille riittää alumiinikiinnikkeet. [7]

Aurinkosähkön käyttövaiheessa ainoat ympäristövaikutukset syntyvät mahdollisista huoltotöistä, joita aiheutuvat erilaiset vikatilanteet, sekä esimerkiksi invertterin kuluvien osien vaihtaminen [7]. Aurinkosähkösystemin käytöstä poistamisen aiheuttamat ympäristövaikutukset riippuvat pitkälti käytettävistä menetelmistä. Kennojen terminen hajottaminen vaatii huomattavasti enemmän energiaa kuin mekaaninen hajottaminen, lisäten täten myös hiilidioksidipäästöjä. Kierrätysprosessissa käytettyjen happojen valmistus ja käyttö, sekä prosessin vaatimien laitteiden kuten erilaisten leikkureiden ja liukuhihnojen valmistus ja käyttö lisäävät kukin ympäristövaikutuksia omilta osiltaan. [23]

Jokaiseen osaprosessiin kuuluu logistiikkaan liittyviä tekijöitä, joita syntyy esimerkiksi materiaalien kuljettamisesta prosessin eri toimintapaikkojen välillä. Hiilidioksidipäästöjen suuruuteen vaikuttaa käytettävä kuljetusmenetelmä, sekä kuljettavan matkan pituus ja toistuvuus. Päästöjä voidaan vähentää suosimalla mahdollisuuksien mukaan puhtaampia kuljetustapoja, kuten junia ja laivoja. Esimerkiksi yhdistämällä prosessointi ja itse lopputuotteen valmistus saman tilan alle, säästetään hiilidioksidipäästöjen syntymisessä liikkumisen tarpeen vähenemisen johdosta. [24]

Osaprosesseihin liittyvät hiilidioksidipäästöt ovat hyvin tapauskohtaisia johtuen päästöjen suuruuteen vaikuttavien tekijöiden suuresta vaihtelevuudesta. Kunkin aurinkosähkösystemin hiilijalanjälki saadaan osaprosessien hiilidioksiidiekvivalenttien summana. Aurinkosähkön hiilijalanjäljen arvioimiseksi tarvitaan siis elinkaarianalyysin tuloksia usean eri projektin osalta, jotka on toteutettu eri olosuhteiden vallitessa, erikokoisilla ja erilaisilla aurinkosähkösystemeillä.

Eri lähteistä koottujen aurinkosähkösystemien hiilidioksiidiekvivalentteja kennotyyppittäin on esitetty taulukossa 4. Kennot poikkeavat toisistaan käytettyjen materiaalien, si-

jaintien ja hyötysuhteiden osalta. Systemien eliniät ovat arvioituja lukuja. Hiilidioksidiekvivalenttien yksikkönä käytetään grammaa kilowattituntia kohti, ja tulokset on arvioitu systemin koko elinkaaren ajalta.

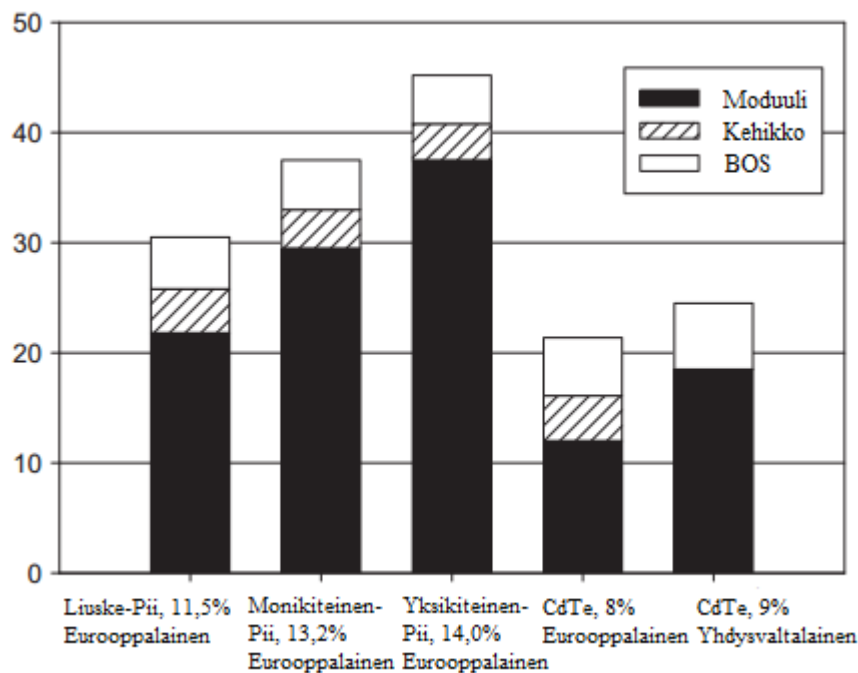
Taulukko 4. Eri kennotyyppien hiilidioksidiekvivalenteja [14, 19].

Kennotyyppi:	Sijainti:	Kennon hyötysuhde:	Elinikä:	CO ₂ e (g) /kWh:
Yksikiteinen piikkeno	Japani	12,2 %	20	61,0
	Etelä-Eurooppa	13,7 %	30	41,0
	Etelä-Eurooppa	14,0 %	30	35,0
	Etelä-Eurooppa	14,0 %	30	30,0
	Yhdysvallat	8,5 %	30	280,0
	Japani	ei tiedossa	20	91,0
	Alankomaat	14,0 %	30	60,0
	Intia	13,0 %	20	64,8
	Iso-Britannia	11,5 %	30	44,0
	Singapore	8,0 %	25	217,0
Singapore	10,6 %	25	165,0	
Kiina	ei tiedossa	ei tiedossa	50,0	
Monikiteinen piikkeno	Japani	11,6 %	20	20,0
	Etelä-Eurooppa	13,0 %	30	60,0
	Kiina	12,8 %	30	12,0
	Etelä-Eurooppa	13,2 %	30	32,0
	Yhdysvallat	12,9 %	20	72,4
	Etelä-Eurooppa	14,0 %	20	72,0
	Etelä-Eurooppa	13,2 %	30	29,0
	Kiina	ei tiedossa	ei tiedossa	43,0
	Japani	10,0 %	30	53,4
	Italia	10,7 %	20	26,4
	Kreikka	ei tiedossa	20	104,0
Yhdysvallat	12,9 %	20	72,4	
CdTe-ohutkalvokenno	Japani	10,3 %	20	14,0
	Yhdysvallat	9,0 %	30	23,6
	Etelä-Eurooppa	9,0 %	30	25,0
	Etelä-Eurooppa	9,0 %	20	48,0
	Etelä-Eurooppa	10,9 %	30	16,0
	Etelä-Eurooppa	10,9 %	ei tiedossa	18,0
	Kiina	ei tiedossa	ei tiedossa	50,0
Eurooppa	10,9 %	30	19–30	

Kuten taulukosta huomataan, systemien hiilidioksidiekvivalenteissa on suuria eroja, ja niiden pohjalta on hankala muodostaa tarkkaa hiilijalanjälkeä aurinkosähkölle. Nähdään

kuitenkin että keskimäärin suurimmat hiilidioksidipäästöt ovat yksikiteisillä piiksennoilla, johtuen kennojen valmistuksen ja prosessoinnin suuresta energiantarpeesta. Keskimääräisesti pienin hiilijalanjälki taas on kadmium-telluuri – ohutkalvokennoilla, pienemmästä energiantarpeesta ja prosessoinnista johtuen. [14]

Kuvassa 4 on esitettyä suuntaa antavia arvioita eri kennotyyppien hiilijalanjäljistä niiden elinkaaren ajalta, erotellen oheislaitteiden ja kehikkojen osuudet. Ilmoitetut hyötysuhteet ovat tyyppillisiä arvoja kyseiselle kennotyypille, osittain pohjautuen taulukossa 4 esitettyihin arvoihin.



Kuva 4. Arvio eri kennotyyppien hiilijalanjäljestä [7].

Kuvassa moduuleilla tarkoitetaan aurinkokennokokonaisuutta ja BOS (Engl. Balance of system) tarkoittaa oheislaitteita kuten esimerkiksi kiinnikkeitä ja kaapeleita. Kehikolla taas tarkoitetaan kennoston mekaanisena tukena olevaa alumiinikehikkoa. Kuvasta saadaan yksikiteisille piiksennoille arvo 45 CO_{2e} (g)/kWh, monikiteisille piiksennoille arvo 37 CO_{2e} (g)/kWh, ja CdTe-kennoille arvo 22 CO_{2e} (g)/kWh. Ohutkalvokenno on eriteltyä eurooppalaisvalmisteisen ja yhdysvaltalaisen paneelin välillä. Kuvassa on mukana myös liuskasta venyttämällä valmistettu monikiteinen piiksenno eli ribbon-si, jota ei tässä työssä ole sen tarkemmin käsitelty. Arviot perustuvat Etelä-Euroopan säteilyarvoille 1700 kWh neliometriä kohti vuodessa, paitsi yhdysvaltalaisvalmisteisen CdTe-ohutkalvokennon yhteydessä, jolle on käytetty arvoa 1800 kWh neliometriä kohti vuodessa. [7]

Saaduista tuloksista huomataan että eri aurinkosähköjärjestelmien hiilidioksidipäästöissä ja sitä kautta myös hiilijalanjäljissä on suuria keskinäisiä eroja. Tästä johtuen käytössä oleville tekniikoille ei voida antaa kovinkaan tarkkaa yleispätevää arvoa, vaan kutakin

systemiä pitää tarkastella tapauskohtaisesti, hyödyntäen kuitenkin aikaisemmin saatuja tuloksia tarkastelujen yhteydessä.

4.2 Hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttaminen

Aurinkosähkön hiilijalanjäljen suuruuteen voidaan vaikuttaa monilla eri tavoilla, mutta yleensä siihen liittyvät ratkaisut perustuvat taloudellisessa mielessä parhaiten kannattaviin menetelmiin. Kuten työssä aiemmin todettiin, suurimpana hiilijalanjälkeä aiheuttavana tekijänä ovat materiaalien prosessointivaiheen ja tuotteen valmistusvaiheen vaatimat suuret energiamäärät. Tällöin siis energiantuotantoon käytetyllä tuotantomenetelmällä on suuri osuus ympäristövaikutuksia arvioidessa. Käytettävissä oleva energiapaletti riippuu suuresti osaprosessien maantieteellisestä sijainnista. Esimerkiksi vuonna 2016 yli 65 % valmistetuista aurinkopaneeleista tuotettiin Kiinassa, jonka energiantuotanto pohjautuu suuresti hiilivoimaloiden käyttämiseen [1,22]. Kuitenkin Kiinan hallitus on pyrkimässä kohti puhtaampaa energiantuotantoa panostamalla suuresti sähkön tuottamiseen tuulivoiman avulla, joka taas pienetäisi Kiinassa tuotettujen aurinkopaneelien hiilijalanjälkeä suuresti [25]. Vaikka maan energiantuotantopaletti olisikin suuresti painottunut fossiiliin energiantuotantomenetelmiin, voi valmistaja kuitenkin useassa maassa valita itse mitä tuotantomuotoja käyttää.

Toinen merkittävä tekijä aurinkosähkön hiilijalanjälkeen liittyen on käytettävän logistiikan valinta. Tällä hetkellä suurin osa maailman tavaraliikenteestä tapahtuu joko maanteitä tai rautateitä pitkin, tai vaihtoehtoisesti laivojen ja lentokoneiden avulla. Euroopan komission teettämän tutkimuksen mukaan suurin osa logistiikan aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä syntyvät maanteitä käyttävistä moottoriajoneuvoista, jonka jälkeen seuraavana olivat ilmaliikenne ja meriliikenne. Rautatieliikenteen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt olivat pienimmät [26]. Kuitenkin logistiset ratkaisut ovat usein riippuvaisia maantieteellisestä sijainnista, joka taas määrää tarvittavat logistiset ratkaisut. Mahdollisimman pienen hiilijalanjäljen saavuttamiseksi, tulisi tuotannon tapahtua lähellä loppusijoituspaikkaa, jolloin logistiikan tarve olisi mahdollisimman vähäinen. Tarvittava tavaraliikenne tulisi toteuttaa mahdollisuuksien mukaan joko rautateitä pitkin tai rahtilaivojen avulla, niiden aiheuttamien pienempien hiilidioksidipäästöjen takia. [27]

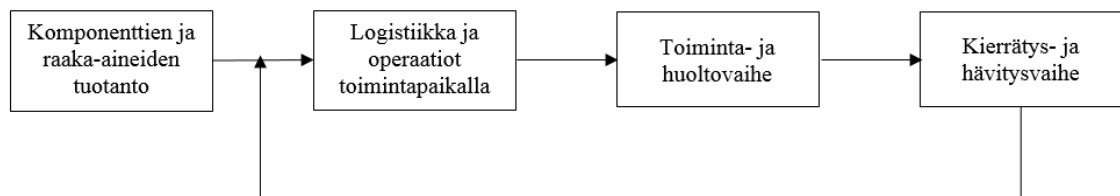
Merkittävä osa aurinkosähkön energiankulutuksesta liittyy piin valmistamiseen, jonka vaatima energia on laskenut suuresti tekniikan kehityksen myötä. Kun yhden neliömetrin kokoisen piikennon valmistaminen vuonna 1990 vaati 10000 MJp energiaa, vuonna 2010 samankokoisen kennon valmistamiseen tarvittiin energiaa vain 3000 MJp [19]. Piin valmistamiseen käytettävien tekniikoiden kehittyessä ja uudelleenkäytettävän piin osuuden kasvaessa, voidaan energiantarpeen olettaa laskevan yhä enemmän tulevaisuudessakin.

5. TUULIVOIMAN ELINKAARIARVIOINTI

Aurinkosähkön ohessa myös tuulivoima on yksi vuotuisesti eniten nousussa olevista energiantuotantomuodoista, ja nykyään merkittävä osa maapallon kokonaisenergiantuotantoa. Yhdysvaltain energiaministeriön teettämän tutkimuksen mukaan vuonna 2016 tuulivoiman osuus koko maapallon sähköntuotannosta oli jopa 5,3 % osuuden kasvaessa vuosi vuodelta [1]. Tuulivoiman suosion kasvaessa, on hyvä tarkastella sen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä, sillä kuten aurinkosähkönkin tapauksessa, välillisiä päästöjä syntyy eri osissa tuulivoiman elinkaarta.

5.1 TUULIVOIMAN ELINKAARI

Kuten aurinkosähkönkin tapauksessa, myös tuulivoiman elinkaarta voidaan tarkastella jakamalla sen kokonaisprosessiketju pienempiin osaprosesseihin raaka-aineiden hankinnasta aina loppusijoitukseen saakka. Tässä työssä keskitytään tuulivoimaloiden osalta mantereella sijaitseviin vaaka-akselisiin voimaloihin niiden hallitsevan markkinaosuuden johdosta, mutta myös vertailua mantereen ulkopuolella sijaitseviin voimaloihin tehdään [24]. Kuvassa 5 on esitettyä tyypillisen tuulivoimalan elinkaari sen eri osaprosesseihin jaettuna.



Kuva 5. Tuulivoiman elinkaari jaettuna sen eri osaprosesseihin [28].

Tuulivoiman elinkaari alkaa raaka-aineiden hankkimisella tuulivoimalan komponentteja varten. Toisin kuin aurinkosähkösysteemit, tuulivoimala ei vaadi raaka-aineikseen kovin kaan harvinaisia ja muusta tuotannosta poikkeavia materiaaleja, minkä takia tarvittavien raaka-aineiden hankkiminen koostuu esimerkiksi raudan ja teräksen vaatimien materiaalien louhimisesta, jalostamisesta ja prosessoinnista. Prosessoiduista materiaaleista voidaan lopulta tuottaa tuulivoimalan tarvitsemat komponentit. Tuulivoimalan pääkomponentit ja niiden tarvitsemat materiaalit ovat esitettyinä taulukossa 5.

Taulukko 5. Tuulivoimalan pääkomponentit ja niiden vaatimat materiaalit [29,30].

Komponentti:	Materiaalit:
Roottori	Hartsit Lasikuitu Valurauta Epoksi
Naselli	Rauta Teräs Kupari Lasikuitu Hartsit Epoksi
Torni	Betoni Teräs Hartsit
Perustukset	Betoni Teräs Alumiini rauta

Tuulivoimalan roottori koostuu siinä olevasta keskiöstä eli hubista, roottorin kärjestä eli englanniksi niin sanotusta nose conesta, sekä eri määrästä tuulivoimalan lapoja. Lapojen lukumäärä vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta yleisin tuulivoimalamalli on kolmilapainen. Lavat ovat noin 60 %:a lasikuitua ja 40 %:a epoksia, kun taas keskiö ja kärki ovat pääasiassa valurautaa ja lasikuitua. Tuulivoimalan naselli koostuu nasellin kehikosta ja sen sisällä olevista generaattorista, vaihdelaatikosta, muuntajista sekä muusta elektroniikasta. Itse suoja valmistetaan pääasiassa lasikuidusta, muoveista ja teräksestä, kun taas generaattori ja vaihdelaatikko ovat suurimmilta osin terästä, rautaa ja kuparia. Tuulivoimalan torni ja sitä varten tehtävät perustukset koostuvat pääasiassa teräksestä ja betonista. [28]

Tuulivoiman elinkaaren toinen osaprosessi koostuu logistisista tekijöistä, sekä tuulivoimalan perustuspaikan vaatimista toimenpiteistä. Kuljetuksen vaatimat välimatkat ja toistuvuudet ovat tapauskohtaisia, mutta kuljetukselliset vaatimukset yleensä ovat raaka-ainneiden hankintapaikan ja niiden prosessointipaikan välillä, jonka jälkeen logistisia toimenpiteitä tarvitaan komponenttien kuljettamisessa valmistuspaikalle. Sieltä valmiit komponentit ja materiaalit tulee vielä kuljettaa lopulliselle tuulivoimalan sijoituspaikalle. Itse lopullinen sijoituspaikka tulee valmistella tuulivoimalaa varten. Sijoituspaikka voi aluksi vaatia reittien ja teiden rakentamista tai vahvistamista, jotta tuulivoimalan osat ja

vaadittava rakentamiskalusto pääsevät helposti sijoituspaikalle. Betonista, raudasta ja teräksestä koostuvat perustukset rakennetaan suoraan sijoituspaikalle, ja niiden tehtävänä on suojata ja tukea itse tuulivoimalaa ja sen toimintaa. Sijoituspaikalle tulee lisäksi rakentaa tilat muuntajia ja kytkimiä varten, sekä paikat ohjaus ja kommunikaatiolaitteille. Valmiit tuulivoimalan pääkomponentit viimeistellään ja asennetaan paikalleen tässä vaiheessa, jotta valmis tuulivoimala voidaan lopulta kytkeä kiinni verkkoon sähkön tuottamista varten. [31]

Seuraavana osaprosessina on vuorossa tuulivoimalan toimintavaihe, jonka pituudeksi on yleisesti arvioitu noin 20–25 vuotta. Toimintavaiheessaan tuulivoimala tyypillisesti vaatii yhdestä kahteen suunniteltua huoltokäyntiä, sekä yhdestä neljään suunnittelematonta huoltotoimenpidettä vuodessa. Yleisimpiä toimenpiteitä ovat vaihteiston öljynvaihdot, sekä eri komponenttien vaatimat voitelut. Myös erinäisten kuluviin ja vioittuvien komponenttien korvaaminen on todennäköisesti edessä tuulivoimalan toimintavaiheen aikana. [32]

Käyttövaiheen jälkeen tuulivoimalalla on edessään elinkaaren loppuvaiheen toimenpiteet. Kuten aurinkosähköllä, myös tuulivoimalla viimeinen osaprosessi koostuu voimalan osien kierrättämisestä ja hävittämisestä. Myös tuulivoiman tapauksessa käytön jälkeiset prosessit ovat vielä kehitysvaiheessa, elinkaaren loppuvaiheessa olevien voimaloiden vähäisen lukumäärän johdosta [28]. Taulukkoon 6 on koottuna tuloksia tuulivoimalan materiaalien elinkaaren loppuvaiheen prosessoinnista.

Taulukko 6. Tuulivoimalan materiaalien käytönjälkeiset toimenpiteet [28,30].

Materiaali:	Prosessointitapa:
Teräs	90% kierrätetään, 10% hävitetään
Kupari	95% kierrätetään, 5% hävitetään
Lasikuitu	100% hävitetään
Alumiini	95% kierrätetään, 5% hävitetään
Betoni	100% hävitetään
Epoksi	100% hävitetään
Rauta	90% kierrätetään, 10% hävitetään
Muovi	100% hävitetään

Yhtenä tuulivoiman eduista on sen materiaalien turvallisuus ympäristön kannalta. Toisin kuin esimerkiksi ydinvoiman tapauksessa, tuulivoiman hävitettäväksi joutuvat materiaalit eivät aiheuta merkittäviä ympäristövaikutuksia, ja niiden hävittäminen on huomattavasti helpompaa. Kuten taulukosta kuusi voidaan havaita, eri pääkomponenteissa käytetty teräs, kupari, alumiini ja rauta saadaan kierrätykseen jopa yli 90 %:in hyötysuhteella. Tuulivoimalan pääkomponentit irrotetaan toisistaan ja eri materiaalit erotellaan kierrätystä varten. Metallit saadaan kierrätettyä hyvällä hyötysuhteella sulatamalla ne korkeassa

lämpötilassa kullekin metallille optimoidussa sulatusuunissa, jonka jälkeen ne saadaan hyödynnettyä uudestaan menettämättä metallien ominaisuuksia. Talteen saadut kierrätysmateriaalit pyritään hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan uusissa tuulivoimaloissa joko ehjinä komponentteina, tai sitten raaka-aineina. Tällöin tulevien tuulivoimaloiden materiaalitarvetta ja sitä kautta myös hiilijalanjälkeä saadaan pienennettyä huomattavasti. [28,33]

Suuri osa tuulivoimalan ei metallisista materiaaleista joutuu kuitenkin hävitykseen. Tämä johtuu suurilta osin siitä, että tuulivoimalan perustuksia ei edes yritetä kierrättää, vaan ne jätetään paikoilleen maahan ja haudataan noin 30 cm:in paksuisen maakerroksen alle. Tällöin säästytään ylös kaivamisen aiheuttamilta ympäristövaikutuksilta, mutta riskeerataan betonin ja muiden perustusmateriaalien mahdolliset pitkäaikaisvaikutukset ympäristöön [29]. Materiaalit kuten lasikuitu ja erilaiset muovit poltetaan, ja mahdollisuuksien mukaan ne voidaan hyödyntää esimerkiksi betonin valmistuksessa [34]. Tuulivoimalan sijoituspaikka pyritään tapauskohtaisesti joko valmistelemaan uutta tuulivoimalaa varten, tai vaihtoehtoisesti palauttamaan mahdollisimman lähelle sen alkuperäistä tilaa joka valitsi ennen tuulivoimalan rakentamista [32].

Edellä käsiteltiin tuulivoiman elinkaarta lähinnä mantereella olevien tuulivoimaloiden kannalta. Kuitenkaan mantereen ulkopuolella olevien niin sanottujen offshore-voimaloiden elinkaaren rakenne ei juurikaan poikkea jo esitetystä osaprosessirakenteesta. Suurimpana eroavaisuutena tuulivoimalamallien välillä on niiden vaatiman infrastruktuurin toteuttaminen. Offshore-voimalat eivät vaadi tuekseen teiden rakentamista, mutta niiden perusteiden rakentaminen on huomattavasti haastavampaa ja kalliimpaa. Tämän lisäksi myös mantereen ulkopuolella olevan voimalan liittäminen sähköverkkoon on hankalampaa kuin mantereella sijaitsevan onshore-voimalan. Myös käytetyissä materiaaleissa on hieman eroa, varsinkin perusteiden osalta. Kun onshore-voimalassa käytettiin pääasiassa teräksellä vahvistettua betonia, offshore-voimaloilla perustukset taas tehdään yhdestä pitkästä pilarimaisesta teräsrakenteesta. [34]

5.2 ELINIÄN VAIKUTUS ELINKAARIARVIOINTIIN

Kuten aurinkosähkönkin tapauksessa, myös tuulivoiman hiilijalanjäljen kannalta elinkaaren pituus on merkittävässä asemassa, varsinkin jos tarkastellaan hiilidioksidipäästöjen jakautumista vuotuisella tasolla. Pidentämällä tuulivoimalan toimintavaiheen kestoa, voidaan hiilijalanjäljen suhteellista arvoa tuotettuun energiamäärään nähden pienentää. Toisin kuin aurinkosähköllä, tuulivoimalat perustuvat useiden erilaisten liikkuvien osien toimintaan, joissa väistämä esiintyy erilaisia vikoja ja kulumia eliniän pituuden kasvaessa. Tämän takia on siis tärkeää tehdä erilaisia vaadittavia huoltotoimenpiteitä tuulivoimalan

toimintavaiheen aikana. Tuulivoimalan turbiinille suoritetaan suunnitelmallinen huolto kahdesta kolmeen kertaa vuodessa, jolloin öljyt ja muut rasvaukset uusitaan. Vaikka näillä toimenpiteillä pystytään kasvattamaan vaihteiston ja muiden kuluvien osien elinikää, joudutaan tuulivoimalan vaihdelaatikko vaihtamaan uuteen keskimäärin noin seitsemän vuoden välein. Jos tuulivoimala on vaihteeton, se luonnollisesti vaatii vähemmän huollollisia toimenpiteitä kuin vaihteellinen voimala. Voidaan myös olettaa että toimintavaiheensa aikana tuulivoimalan lavoista vähintään yksi joudutaan vaihtamaan. [28, 32]

Tanskan tuulivoimalavalmistajien yhteisön raportin mukaan tuulivoimalan toimintavaiheen kestoksi voidaan hyvällä varmuudella olettaa 20 vuotta, ja tutkimusten mukaan oikeanlaisilla huoltotoimenpiteillä elinikä voidaan nostaa jopa 30 vuoteen [31]. Kuten aurinkosähkönkin tapauksessa, myös tuulivoimaa tarkasteltaessa on otettava huomioon vuosittaisen energiantuotannon heikkeneminen voimalan ikääntymisen myötä. Useiden eri tuulivoimaloiden vuosittaista energiantuotantoa vertailemalla, on havaittu että tuulivoimalan vuosituotanto heikkenee noin 2 % joka vuosi, verrattuna aina edellisen vuoden tuotantoon. [28]

Tuulivoimalan toimintavaiheen pituus riippuu siis pitkälti voimalan kokemista vikatilanteista, joita aiheutuu myös pitkällä aikavälillä ympäristön vaikutuksesta. Lämpötilan ja kosteuden vaihtelut ovat kriittisiä tekijöitä tehoelektronikan komponentteja tarkastellessa, ja niiden vaihtelut voivat johtaa erinäisiin vikoihin kuten kontaktipintojen ja liitosten irtoamiseen [35]. Tuulivoimalan toimintavaiheen pituuden suhteen on siis tehtävä kompromissi tuotannon heikkenemisen, uusien komponenttien hankkimisen ja voimalan lopullisen alasajon suhteen siten, että ratkaisu on paras sekä taloudelliselta, että ekologiselta kannalta.

6. TUULIVOIMAN HIILIJALANJÄLKI

Aurinkosähkölle tehdyn tarkastelun tapaan, myös tuulivoiman ympäristövaikutuksia voidaan tarkastella elinkaariarvioinnin puitteissa siten, että jokaisen osaprosessin aiheuttamat vaikutukset otetaan huomioon yhtenä kokonaisuutena koko elinkaaren ajalta. Myös tuulivoiman osalta tarkastelu tehdään yksinkertaistetulla tasolla, jolloin voidaan keskittyä vain tuulivoiman hiilijalanjälkeen vaikuttaviin tekijöihin.

6.1 Hiilijalanjälki ja siihen vaikuttavat tekijät

Kuten aurinkosähkönkin tapauksessa aiemmin, myös tuulivoiman hiilijalanjäljen suuruutta arvioidaan niin sanotun hiilidioksidiekvivalentin avustuksella, josta käytetään merkintää CO₂e. Tässä työssä tuulivoiman hiilijalanjälkeä tarkastellaan tuotettuun energiamäärään suhtautettuna. Systemin hiilijalanjälki on sen osaprosessien aiheuttamien vaikutusten summa, ja se on hyvin tapauskohtainen. Tässä tarkastelussa keskitytään pääasiassa mantereella sijaitseviin vaaka-akselisiin tuulivoimaloihin, mutta myös mantereen ulkopuolisia voimaloita käsitellään lyhyesti. Osaprosessien aiheuttamien ympäristövaikutusten lisäksi on otettava huomioon tuulivoimalan sijainnin, koon ja toimintaympäristön vaikutukset. Taulukkoon seitsemän on koottuna tuulivoimalan osaprosessien tyyppisimmät hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät.

Taulukko 7. Osaprosessien hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät [28,32].

Osaprosessi:	Hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät:
Komponenttien ja Raaka-aineiden Tuotanto	Raaka-aineiden tuottaminen Materiaalien prosessointi Komponenttien valmistus Logistiikan tarve
Logistiikka ja operaatiot Toimintapaikalla	Teiden ja kulkureittien rakentaminen Perustusten tekeminen Teknisten tilojen perustaminen Logistiikan tarve Asennustoimet
Toiminta- ja huoltovaihe	Huoltotoimenpiteet Logistiikan tarve Toiminta-ajan pituus
Kierrätys- ja hävitysvaihe	Kierrätyksen aiheuttamat vaikutukset Hävittämisen aiheuttamat vaikutukset Komponenttien prosessointi Logistiikan tarve

Tuulivoiman elinkaaren ensimmäisessä osaprosessissa eli komponenttien ja raaka-aineiden tuotantovaiheessa, ympäristövaikutukset keskittyvät hiilijalanjäljen näkökulmasta vahvasti tarvittavan energian tuottamiseen. Raaka-aineiden kuten raudan ja kuparimalmien louhiminen, sekä niiden jalostaminen tarvittaviksi materiaaleiksi vaativat suuret määrät energiaa, jolloin hiilidioksidipäästöt riippuvat pääosin käytössä olevasta energiantuotantopaletista. Suurin energiantarve ja sitä kautta myös hiilijalanjälki on ruostumatoman teräksen valmistuksella, josta seuraavina ovat betonin ja valuraudan valmistamisprosessit. Välimatkat ja käytettävät kuljetusmenetelmät raaka-aineiden hankintapaikkojen, materiaalien prosessointipaikkojen ja komponenttien valmistuspaikkojen välillä vaikuttavat omalta osaltaan hiilijalanjäljen suuruuteen. [28]

Tuulivoimalan perustamispaikalla tapahtuvien perustamistoimenpiteiden vaikutus hiilijalanjälkeen on hyvin tapauskohtaista, ja riippuu pitkälti tiestön rakentamistarpeesta. Kulkureittien aiheuttama hiilijalanjälki vaihtelee tien kestävyysvaatimusten mukaan, mutta lyhyiden tiepätkien hiilijalanjälki voidaan olettaa sangen pieneksi, varsinkin kun se suhtautetaan teiden elinikään, joka on noin 100 vuotta [36]. Tuulivoimalan perustamispaikalle rakennettavien teknisten tilojen, perustusten sekä itse tuulivoimalan rakentamis- ja asennustöistä aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen voidaan olettaa olevan pelkästään materiaalien valmistamiseen ja työstämiseen sidonnaisia. Itse asennustöiden vaikutus hiilijalanjälkeen on siis minimaalinen. [29]

Tuulivoimalan toiminta- ja huoltovaiheen vaikutus tuulivoiman hiilijalanjälkeen liittyy osaprosessin sisältämiin huoltotoimenpiteisiin. Suuruuteen vaikuttaa suunniteltujen huoltotoimien lisäksi myös suunnittelematon huollontarve, joka voi johtua erinäisistä vioista tai ilkeistä. Suurimmat ympäristövaikutukset aiheutuvat huoltotoimenpiteisiin liittyvästä logistiikasta, eli kuljetettavan matkan pituudesta ja kulkutavasta, sekä kulkemistarpeen toistuvuudesta [28]

Tuulivoiman elinkaaren loppuvaiheen osalta suurin hiilijalanjälkeen vaikuttava tekijä on materiaalien sulattamisen vaatima energia. Perustusten hautaaminen, sekä kierrättämiseen soveltumattomien materiaalien hävittäminen vaativat puolestaan vähemmän energiaa, minkä takia suurin hiilijalanjälkeen vaikuttava tekijä niiden osalta on jälleen logistiikan tarve. Kierrätettävien materiaalien, kuten teräksen ja raudan käyttäminen uusissa tuulivoimaloissa pienentää omalta osaltaan tulevien systeemien materiaalintarvetta, ja sitä kautta myös hiilijalanjälkeä. [32]

Suurimmat erot onshore- ja offshore-voimaloiden välillä hiilijalanjälkeen liittyen johtuvat eroavaisuuksista logistiikassa ja voimaloiden rakentamisessa. Offshore-voimalan yhteyteen ei tarvitse rakentaa erillistä tiestöä, mutta kaapeleiden vetäminen mantereelle veden alla, sekä asennustoimenpiteet veden päällä lisäävät polttoaineen tarvetta ja sitä kautta myös ympäristövaikutuksia. Myös huoltotoimenpiteet vaativat usein mantereen ulkopuolisilla voimaloilla enemmän polttoainetta suhteessa mantereella oleviin. [34]

Suurimmat vaikutukset tuulivoiman koko elinkaaren aikana aiheutuvaan hiilijalanjälkeen on materiaalien kuten ruostumattoman teräksen ja valuraudan valmistus, sekä kierrätysvaiheessa materiaalien sulattaminen uusiokäyttöön. Näiden jälkeen suurimman ympäristövaikutuksen omaa kuljetuksen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt [32]. Taulukkoon kahdeksan on koottuna erilaisten tuulivoimalaprojektien hiilidioksidiekvivalentteja, jotka on suhtautettu yhden kilowattitunnin energiamäärän tuottamista kohti. Taulukossa on esitetty tuloksia sekä mantereella, että mantereen ulkopuolella olevien tuulivoimaloiden osalta.

Taulukko 8. Eri tuulivoimaloiden CO₂e arvoja tuotettua kWh kohti [27,37].

Vuosi:	Sijainti:	Tuulivoimalan koko (MW):	CO₂e (g) / kWh:	Tuulivoimala-tyyppi:
2008	Italia	0,7	14,8	Onshore
2003	Eurooppa	0,6	7,5	Onshore
2003	Eurooppa	1,5	12,2	Onshore
2011	Tanska	3,0	7,0	Onshore
2004	Eurooppa	2,0	6,8	Onshore
2013	Brasilia	1,5	7,1	Onshore
2013	Kiina	1,5	7,2	Onshore
2000	Ei tiedossa	0,5	9,7	Onshore
2009	Ei tiedossa	4,5	16,0	Onshore
2006	Ei tiedossa	3,0	4,6	Onshore
2016	Tanska	2,7	7,0	Onshore
2013	Tanska	2,0	7,7	Onshore
1991	Japani	0,3	9,5	Onshore
1992	Japani	0,2	13,0	Onshore
2000	Tanska	0,5	9,7	Onshore
2012	Australia	2,0	7,6	Onshore
2012	Australia	1,8	7,9	Onshore
2009	Ranska	0,3	46,4	Onshore
2009	Ranska	4,5	15,8	Onshore
2012	Kiina	1,7	8,2	Onshore
2012	Kiina	3,0	5,0	Onshore
2000	Tanska	0,5	16,5	Offshore
2009	Norja	5,0	3,2	Offshore
2012	Kiina	3,0	6,0	Offshore
2003	Eurooppa	2,5	9,2	Offshore
2004	Eurooppa	2,0	7,6	Offshore
2008	Saksa	5,0	22,0	Offshore
2000	Ei tiedossa	0,5	16,5	Offshore
2006	Ei tiedossa	3,0	5,2	Offshore
2011	Eurooppa	5,0	32,0	Offshore
2009	Ei tiedossa	5,0	11,5	Offshore
2016	Eurooppa	5,0	11,0	Offshore
2007	Yhdysvallat	1,8	24,0	Offshore
2014	Saksa	5,0	16,8	Offshore

Taulukossa on esitettyä sijainniltaan ja kokoluokaltaan erilaisten onshore- ja offshore-tuulivoimaloiden aiheuttamia hiilidioksidiekvivalentteja, suhtautettuna yhden kilowattitunnin energiamäärän tuottamista kohden. Kyseisten arvojen perusteella voidaan arvioida tuulivoiman aiheuttamaa hiilijalanjälkeä, mutta kuten taulukosta huomataan, tulokset ovat erittäin tapauskohtaisia. Laskemalla tuloksista keskiarvo, saadaan suuntaa antava tulos tuulivoiman hiilijalanjäljen tarkastelua varten. Keskiarvoksi onshore-voimaloiden hiilidioksidiekvivalenteille tuotettua kilowattituntia kohden saadaan 10,99 g/kWh ja vastavaksi luvuksi offshore-voimaloille saadaan 13,96 g/kWh.

Vaikka offshore-tuulivoimalat yleensä sijaitsevat alueilla jossa vallitsevat paremmat tuulisolosuhteet, materiaali- ja polttoainetarpeet koko elinkaaren aikana tekevät onshore-voimaloiden hiilijalanjäljestä hieman pienemmän. Taulukosta voidaan myös havaita, että hiilidioksidiekvivalenteissa on melko suurta hajontaa eikä voida tehdä suoraa johtopäätöstä tuulivoimalan nimellistehon arvon vaikutuksesta hiilijalanjäljen suuruuteen.

6.2 Hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttaminen

Kuten luvussa 6.1 kävi ilmi, suurimmat tuulivoiman hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät ovat voimaloiden vaatimien materiaalien ja raaka-aineiden prosessointi, sekä logistiset toimenpiteet koko elinkaaren ajalta. Kuten myös aurinkosähkönkin kohdalla, suurimpana hiilijalanjälkeen vaikuttavana tekijänä on vaadittavan energiamäärän tuottamiseen käytetyt energiantuotantomenetelmät. Uusiutuvan energiantuotannon suhde uusiutumattomaan on hyvin sijaintikohtaista, mutta tuulivoimalan rakennuttajalla on usein mahdollista päästä vaikuttamaan käyttämänsä energian tuotantomuotoon. Tuulivoimalan sijainti liittyy suuresti myös logististen tekijöiden aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin. Hiilijalanjälkeä voidaan pienentää huomattavasti suosimalla rahtilaivoja ja junia rekka-autojen sijasta, sekä pyrkimällä saamaan elinkaaren eri osaprosessien toteutuspaikat mahdollisimman lähelle tuulivoimalan lopullista sijoituspaikkaa. [3]

Toinen materiaalien prosessointiin liittyvä tekijä on vaihtoehtoisten materiaalien käyttäminen ympäristövaikutusten pienentämiseksi. Tuulivoimaloiden roottoreiden koon ja sitä myötä myös tornien korkeuden kasvaessa, tuulivoimaloiden täytyy kestää entistä kovempia tuuliolosuhteita, eikä tällä hetkellä ole löytynyt korvaavaa materiaalia teräkselle [29]. Teräksen valmistamiseksi entistä energiatehokkaammin tehdään jatkuvasti töitä, ja sen valmistaminen vaatiikin nykyään vain 40 % energiasta, jonka se vaati esimerkiksi vuonna 1960 [38]. Varsinkin teräksen osalta kierrätyksellä on merkittävä osuus hiilijalanjäljen pienentämisessä. Esimerkiksi myös lasikuidun korvaamista hiilikuidulla on kokeiltu, jolloin tuulivoimalan lavat saataisiin kevyemmäksi, säästäten tukimateriaalien määrässä. Myös muita materiaalivaihtoehtoja on tutkittu, kuten turbiinissa käytetyn alumiinin korvaamista erilaisilla muoveilla. Tutkimusten perusteella kyseisiä vaihtoehtoisia materiaaleja käyttämällä, voitaisiin hiilidioksidipäästöjä pienentää mahdollisesti jopa 16 % [24].

7. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin aurinkosähkön ja tuulivoiman elinkaarta ja hiilijalanjälkeä jo olemassa oleviin tutkimustuloksiin pohjautuen. Työn alussa käsiteltiin elinkaariarviointia, joka on työkalu erilaisten tuotteiden tai prosessien koko elinkaaren aikana syntyvien ympäristövaikutusten arvioimiseen. Sekä aurinkosähkön, että tuulivoiman elinkaari voidaan jakaa eri vaiheita kuvaaviin osaprosesseihin, joissa syntyviä ympäristövaikutuksia voidaan käsitellä yhtenä isona kokonaisuutena. Tässä työssä elinkaariarviointi tehtiin yksinkertaistetulla tasolla, joka mahdollistaa keskittymisen vain yhteen ympäristövaikutukseen, joka tässä työssä oli aurinkosähkön ja tuulivoiman hiilijalanjälki, hiilidioksidipäästöjä tarkastelemalla.

Työssä aurinkosähkö rajattiin käsittelemään pääasiassa aurinkokennoihin perustuvia systeemejä, joissa taas keskityttiin yksi- ja monikiteisiin piikennoihin. Ohutkalvokennojen osalta tarkastelua tehtiin kadmium-telluuri – kennoihin liittyen. Tuulivoiman osalta tarkastelu tapahtui pääasiassa vaaka-akselisten, onshore-tuulivoimaloiden osalta, mutta vertailun vuoksi tarkasteluun on otettu tuloksia myös offshore-tuulivoimaloiden tuloksista.

Elinkaariarvioinnin tekemiseksi, tulee tavoitteiden asettamisen ja rajaamisen jälkeen tehdä kyseiselle tuotteelle tai systeemille inventaarioanalyysi. Inventaarioanalyysissä tuotteen tai systeemin elinkaari ajatellaan koostuvan yhdestä prosessiketjusta, joka jaetaan pienempiin osaprosesseihin. Aurinkosähkön osalta kyseisen prosessiketjun voidaan ajatella koostuvan raaka-aineiden hankkimisesta, materiaalien prosessoinnista, itse tuotteen valmistamisesta, käyttövaiheesta, ja käytöstä poistamisesta. Käytöstä poistamisessa on kaksi vaihtoehtoa, joko materiaalien kierrättäminen uusia aurinkosähköjärjestelmiä varten, tai sitten hävittäminen elinkaaren päätyttyä.

Tuulivoiman elinkaaren prosessiketjun voidaan taas ajatella koostuvan komponenttien ja raaka-aineiden tuotannosta, logistiikasta ja erilaisista operaatioista tuulivoimalan toimintapaikalla, toiminta- ja huoltovaiheesta, sekä kierrätys- ja hävitysvaiheesta. Prosessit ovat pääpiirteissään samat sekä onshore-, että offshore-tuulivoimaloilla, mutta joitain eroja on esimerkiksi tarvittavissa materiaaleissa, logistiikassa ja asentamistoimenpiteissä.

Kun tuotteen tai systeemin elinkaari on jaettuna osaprosesseihin, voidaan kunkin vaiheen aiheuttamia ympäristövaikutuksia tarkastella omana kokonaisuutenaan. Vaikka aurinkosähkö ja tuulivoima yleisesti käsitetään täysin hiilidioksidineutraalina energiantuotantomuotona, päästöjä syntyy kuitenkin sivullisesti eri vaiheissa niiden elinkaarta. Suurin yksittäinen hiilijalanjälkeen vaikuttava tekijä on kummassakin tapauksessa materiaalien valmistuksen ja prosessoinnin vaatiman energian tuottaminen. Tällöin suuressa roolissa on tuotteiden valmistusmaa, ja siihen liittyvä energiapaletti. Maassa jossa uusiutuvan energian suhde uusiutumattomaan on mahdollisimman suuri, myös siellä rakennettujen

aurinkosähkösystemien ja tuulivoimaloiden hiilijalanjälki on pienempi. Jossain tapauksessa voimalan rakennuttaja pystyy vaikuttamaan käyttämiinsä energiamuotoihin, mutta tällöin yleensä ratkaiseviksi tekijöiksi nousevat taloudelliset seikat.

Tarvittavan energiamäärän tuottamisen lisäksi, merkittävä hiilijalanjälkeä lisäävä tekijä on logistiikan tarve. Sekä aurinkosähkön, että tuulivoiman tapauksissa logistisia tarpeita liittyy väistämättä jokaiseen osaprosessiin. Oli sitten kyseessä raaka-aineiden kuljetuksesta prosessointipaikalle, huoltoimenpiteistä, tai materiaalien kuljettamisesta kierrätykseen tai hävitettäväksi, on moottoriajoneuvojen käyttämiseltä mahdoton välttyä. Mahdollisimman pienen hiilijalanjäljen aikaansaamiseksi, tulisi tavaroiden kuljettamisessa suosia laivoja ja junia, ja välttää paketti- ja kuorma-autojen käyttämistä. Aurinkosähköjärjestelmän ja tuulivoimalan toimintapaikan maantieteellisellä sijainnilla on siis jälleen suuri merkitys.

Tuotteen tai systeemin hiilijalanjälkeä tarkastellaan usein sen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen avulla, jolloin mittarina käytetään niin sanottua hiilidioksidiekvivalenttia, josta käytetään merkintää CO_{2e}. Ottamalla huomioon jokaisen osaprosessin aiheuttamat hiilidioksidipäästöt, voidaan arvioida koko systeemin hiilijalanjälkeä tuotettua energiamäärää kohti. Sekä tuulivoiman, että aurinkosähkön hiilidioksidipäästöt ovat sangen tapauskohtaisia, mutta ottamalla keskiarvotuloksia olemassa olevista tutkimuksista, saadaan suuntaa antavat arvot hiilijalanjäljille. Kun hiilijalanjälkeä arvioidaan hiilidioksidiekvivalentteina tuotettua kilowattituntia kohtaan, aurinkosähkön osalta yksikiteisille piikennoille arvo 45 CO_{2e} (g)/kWh, monikiteisille piikennoille arvo 37 CO_{2e} (g)/kWh, ja CdTe-kennnoille arvo 22 CO_{2e} (g)/kWh. Vastaaviksi arvoiksi tuulivoiman osalta taas saatiin offshore-voimaloille 13,96 CO_{2e} (g)/kWh ja onshore-voimaloille 10,99 CO_{2e} (g)/kWh.

Tuloksia vertailemalla voidaan havaita, että tuulivoiman elinkaaren aikana aiheutuvat hiilidioksidipäästöt, ja sitä kautta myös hiilijalanjälki ovat huomattavasti pienempiä kuin aurinkosähköllä. Eroja syntyy esimerkiksi tarvittavien materiaalien valmistuksessa ja prosessoinnissa, kuljetusmenetelmien käytössä, sekä koko elinkaaren aikana tuotetuissa energiamäärissä. Kuitenkin esimerkiksi kadmium-telluuri-kennon arvot ovat sangen lähellä tuulivoiman lukemia, ja kierrätysprosessien ynnä muiden tekijöiden ollessa vielä kehitysasteella, tulokset voivat muuttua tulevaisuudessa entistä parempaan suuntaan sekä aurinkosähkön, että tuulivoiman osalta.

LÄHTEET

- [1] P. Beiter, M. Elchinger, T. Tian, 2016 Renewable Energy Data Book, NREL, 2016, s. 45 ja 69
- [2] B. Tremeac, F. Meunier, Life cycle analysis of 4.5 MW and 250 W wind turbines, Renewable and sustainable energy reviews, vol. 13, no. 8, 2009. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000045>
- [3] ISO 14040, Environmental management – life cycle assessment – principles and framework, 2006. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [4] ISO 14044, Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines, 2006. Saatavissa: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- [5] R. Antikainen, Elinkaarimetodiikkujen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet, Suomen ympäristökeskuksen raportteja, no. 7, 2010, s. 16–20. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39822/SYKEra_7_2010.pdf?sequence=1
- [6] S. Gerbinet, S. Belmboom, A. Léonard, Life cycle analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review, Renewable and sustainable energy reviews, vol. 38, 2014 Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400495X>
- [7] V. Fthenakis, H. Kim, Photovoltaics: Life-cycle analyses, solar energy, vol. 85, no. 8, 2011. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002345>
- [8] M. Brander, R. Tipper, C. Hutchison, G. Davis, Consequential and attributional approaches to LCA: a guide to policy makers with specific reference to greenhouse gas LSA of biofuels, ecometrica press, 2008. Saatavissa: http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_Ecometrica_-_Consequential_and_attributional_approaches_to_LCA.pdf
- [9] P. Breeze, Power generation technologies, Elsevier, 2014, s. 259-286
- [10] J. Tao, S. Yu, Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules, Solar energy materials and solar cells, vol. 141, 2015. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481500210X>
- [11] C. Wang, Z. Zhang, T. Wang, T. Cizek, A continuous Czochralski silicon crystal growth system, Journal of crystal growth, vol. 250, no. 1-2, 2003.

- [12] Best research-cell efficiencies, United States department of energy, 2017. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>
- [13] K. Bhandari, J. Collier, R. Ellingson, D. Apul, Energy payback time and energy return on energy invested of solar photovoltaic systems: A Systematic review and meta-analysis, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 47, 2015. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211500146X#!>
- [14] C. Latunussa, F. Ardente, G. Blengini, L. Mancini, Life cycle assessments of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels, *Solar energy materials and solar cells*, vol. 156, 2016. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816001227>
- [15] D. Jordan, S. Kurtz, Photovoltaic degradation rates – An analytical review, *Progress in photovoltaics: Research and applications*, 2012. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>
- [16] Limited warranty for Trina solar brand crystalline solar photovoltaic modules, Changzhou Trina Solar energy CO. LTD, 2016. Saatavissa: http://static.trinasolar.com/sites/default/files/EN_Warranty.pdf
- [17] XPower inverter 150, 300 & 500, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.3.2018): http://www.xantrex.com/documents/Power-Inverters/Xpower-inverter/DS20040826_XP_inv150-300-500.pdf
- [18] L. Wright, S. Kemp, I. Williams, Carbon footprinting: towards a universally accepted definition, *Carbon management*, 2011. Saatavissa: <https://eprints.soton.ac.uk/210245/>
- [19] J. Peng, L. Lu, H. Yang, Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems, *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 19, 2013. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006478>
- [20] I. Roimu, Parhaat ympäristökäytännöt (BEP) luonnonkivituotannossa, Ympäristöministeriö, 2014. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/152750/SY_5_2014.pdf?sequence=1
- [21] Energiavuosi 2017 – Sähkö, Energiateollisuus ry, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.3.2018): https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot

- [22] D. Fridley, H. Lu, N. Khanna, Key china energy statistics 2016, China energy group, 2016. Saatavissa: <https://china.lbl.gov/sites/default/files/misc/ced-9-2017-final.pdf>
- [23] G. Granata, F. Pagnanelli, E. Moscardini, T. Havlik, L. Toro, Recycling of photovoltaic panels by physical operations, *Solar energy materials and solar cells*, vol. 123, 2014. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481400018X>
- [24] M. Uddin, S. Kumar, Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique, *Journal of cleaner production*, vol. 69, 2014. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614000973>
- [25] Z. Wang, J. Shi, Y. Zhao, China wind energy development roadmap 2050, Energy research institute, 2011. Saatavissa: www.iea.org/publications/freepublications/china_wind.pdf
- [26] European environment agency, greenhouse gas emissions from transport, verkosivu. Saatavissa (viitattu 9.4.2018): <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-10>
- [27] W. Wang, H. Teah, Life cycle assessments of small-scale horizontal axis wind turbines in Taiwan, *Journal of cleaner production*, vol. 141, 2017. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261631469X>
- [28] B. Guezuraga, R. Zauner, W. Pölz, Life cycle assessments of two different 2 MW class wind turbines, *Renewable Energy*, vol. 37, Iss. 1, 2012 Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111002254>
- [29] E. Martinez, F. Sanz, S. Pellegrini, E. Jimenez, J. Blanco, Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine, *Renewable Energy*, vol. 34, Iss. 3, 2009. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108002218>
- [30] M. Kabir, B. Rooke, G. Dassanayake, B. Fleck, Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation, *Renewable Energy*, vol. 37, Iss. 1, 2012. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111002953>
- [31] W. Shepherd, Electricity generation using wind power, World Scientific, 2011, p. 223-235.

- [32] Y. Huang, X. Gan, P. Chiueh, Life cycle assessments and net energy analysis of offshore wind power systems, *Renewable Energy*, vol. 102, 2017. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116309156>
- [33] U.S. Geological survey, Mineral commodity summaries 2017, Reston, 2017. Saatavissa: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>
- [34] A. Bonou, A. Laurent, S. Olsen, Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy – from theory to application, *Applied Energy*, vol. 180, 2016. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309990>
- [35] K Ma, M. Liserre, F. Blaabjerg, T. Kerekes, Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter, *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 30, Iss. 2, 2015. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6774870/>
- [36] M. Hagström, J. Illman, A. Pesola, J. Vanhanen, Y. Gilbert, Tien- ja radanpidon hiilijalanjälki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä, 2011. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lts_2011-38_tien_ja_radanpidon_web.pdf
- [37] J. Kaldellis, D. Apostolou, Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart, *Renewable Energy*, vol. 108, 2017. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117301258>
- [38] World steel association, about steel, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.4.2018): <https://www.worldsteel.org/about-steel.html>