



Luukas Hakola

Maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaariarviointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

28.11.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Luukas Hakola
Otsikko: Maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaariarvio
Sivumäärä: 34 sivua
Aika: 28.11.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine: Ympäristötekniikka
Ohjaajat: Hankintapäällikkö Arttu Raitala
Yliopettaja Kari Salmi

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli tarkastella maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaaren aikaisia päästöjä Oomi Oy:lle. Elinkaariarvioinnissa tarkastellaan aurinkovoimalan elinkaaren aikaisia päästöjä aina materiaalien valmistuksesta käytöstä pois-
toon ja loppusijoitukseen.

Uusiutuvat energiantuotantomenetelmät ovat syrjäyttämässä fossiilisia energiantuotantomenetelmiä. Aurinkoenergia ei ole kuitenkaan päästötöntä, sillä päästöjä syntyy koko aurinkovoimalan elinkaaren aikana. Aurinkovoimalan elinkaaren aikaiset päästöt alkavat aurinkopaneelien ja muiden materiaalien valmistuksesta.

Rakennusvaiheessa materiaalit kuljetetaan työmaalle ja asennetaan paikalleen. Tuotannon aikana käyttövaiheessa aurinkovoimala vaatii vain vähän huoltoa toimiakseen. Aurinkovoimalan tuotantovaihe kestää 25–35 vuotta. Käyttöään jälkeen aurinkovoimala-alue ennallistetaan ja materiaalit kuljetetaan pois alueelta ja kierrätetään mahdollisuuksien mukaan.

Elinkaaren aikaiset päästöt voidaan suhteuttaa elinkaaren aikaiseen sähköntuotantoon, jolloin saadaan selville aurinkovoimalan sähkönpäästökerroin. Sähkönpäästökertoimen avulla voidaan vertailla eri energiantuotantomenetelmiä toisiinsa. Tämän insinöörityön tarkastelun tuloksena maa-asenteisen aurinkovoimalan sähkönpäästökertoimeksi saatiin 19–41 g CO₂-ekv/kWh.

Aurinkovoimalan sähkönpäästökertoimen suuri vaihteluväli johtuu käytettävistä materiaaleista, tuotannon elinkaaresta, tuotantotehosta ja alueesta, johon aurinkovoimala rakennetaan. Maa-asenteisen aurinkovoimalan sähkönpäästökerroin on selvästi pienempi, kuin fossiilisten energiantuotantomenetelmien, joita uusiutuvilla energiantuotantomenetelmillä pyritään syrjäyttämään.

Avainsanat: aurinkovoimala, hiilijalanjälki, elinkaari, elinkaariarvionti, uusiutuva energia

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Luukas Hakola
Title: Life Cycle Assessment of a Ground-Mounted Solar Power Plant
Number of Pages: 34 pages
Date: 28 November 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Engineering
Professional Major: Environmental Engineering
Supervisors: Arttu Raitala, Purchasing Manager
Kari Salmi, Principal Lecturer

The purpose of this engineering thesis was to examine the emissions during the life cycle of a ground-mounted solar power plant for Oomi Oy. The life cycle assessment examines the emissions during the life cycle of the solar power plant, from the production of materials to decommissioning and final disposal.

Renewable energy production methods are increasingly displacing fossil energy production methods. Solar energy is not emission-free, as emissions are generated during the entire life cycle of the solar power plant. Emissions during the life cycle of a solar power plant begin with the manufacture of solar panels and other materials.

During the construction phase, the materials are transported to the site and installed in place. During production and operation, the solar power plant requires little maintenance to function. The production phase of the solar power plant lasts 25–35 years. After the useful life, the solar power plant area is restored, and the materials are transported away from the area and recycled if possible.

The emissions during the life cycle can be related to the electricity production during the life cycle, which gives the electricity emission factor of the solar power plant. With the help of the electricity emission factor, different energy production methods can be compared with each other. As a result of this engineering thesis, the electricity emission factor of the ground-mounted solar power plant was found to be 19–41 g CO₂-eq/kWh.

The wide range of the electricity emission factor of a solar power plant is due to the materials used, the production life cycle, the production power, and the area where the solar power plant is built. The electricity emission factor of the ground-mounted solar power plant is clearly lower than that of fossil energy production methods, which renewable energy production methods aim to replace.

Keywords: solar power plant, carbon footprint, life cycle, life-cycle assessment, renewable energy

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Elinkaariarviointi | 2 |
| 3 | Aurinkoenergia | 4 |
| 4 | Maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaari | 6 |
| 4.1 | Tavoitteiden määrittely | 9 |
| 4.2 | Aurinkovoimalan prosessien rajaus | 9 |
| 4.3 | Toiminnallinen yksikkö | 11 |
| 5 | Inventaarioanalyysi | 12 |
| 5.1 | Tuotevaihe A1–A3 | 12 |
| 5.1.1 | Paneelit | 12 |
| 5.1.2 | Telineet ja perustukset | 16 |
| 5.1.3 | Invertteri | 18 |
| 5.1.4 | Kaapelit, aidat ja putket | 20 |
| 5.2 | Rakennusvaihe A4–A5 | 21 |
| 5.2.1 | Kuljetus työmaalle | 22 |
| 5.2.2 | Maatyöt ja hakkuu | 23 |
| 5.2.3 | Asentaminen | 25 |
| 5.3 | Käyttövaihe | 26 |
| 5.4 | Purkuvaiheen päästöt | 27 |
| 6 | Vaikutusarviointi | 28 |
| 7 | Tulosten tulkinta | 31 |
| 8 | Yhteenveto | 32 |
| | Lähteet | 35 |

Lyhenteet

- CO₂-ekv: Hiilidioksidiekvivalentti. Hiilijalanjäljen yksikkö. Eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus muunnettuna hiilidioksidin vastaavaksi vaikutukseksi ilmakehässä.
- EVA: Eteenivinyyliaasettaatti. Kevyt, joustava ja vedenkestävä materiaali, jota käytetään muun muassa aurinkopaneeleissa.
- LCA: Elinkaariarviointi (life cycle assessment) menetelmä, jonka avulla tuotteiden tai prosessien ympäristö vaikutuksia ja resursseja voidaan analysoida ja arvioida.
- kWp kilowattipiikki. Kuvastaa aurinkojärjestelmän nimellistehoa.

1 Johdanto

Maailmassa on käynnissä parhaillaan energiamurros. Uusiutuviin luonnonvaroihin perustuvat sähköntuotantomenetelmät ovat kovassa kasvussa. Uusiutuvilla sähköntuotantomenetelmillä pyritään korvaamaan ilmastoa merkittävästi lämmittävät fossiiliset energiantuotantomenetelmät. Yhteiskuntien sähköistyminen on suuressa roolissa ilmastonmuutoksen hillinnässä ja sähköä tarvitaan tulevaisuudessa nykyistä enemmän. Yksikään uusiutuva sähköntuotantomenetelmä ei kuitenkaan yksistään kata tulevaisuuden sähkön tarvetta, joten useita eri uusiutuvia tuotantomenetelmiä tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään entistä enemmän. Aurinkoenergia on yksi vauhdikkaimmin kasvavista uusiutuvista sähköntuotantomenetelmistä ja tulevaisuudessa sen rooli sähköntuotannossa kasvaa entisestään. Aurinkoenergia sähköntuotantomenetelmänä ei ole kuitenkaan päästötön. Päästöjä syntyy aurinkovoimaloiden rakentamisesta ja käytöstä sekä purkamisesta.

Tässä insinööriyössä tehdään maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaariarviointi. Elinkaariarvioinnin tuloksena saadaan tieto, kuinka paljon aurinkovoimalan elinkaaren aikana syntyy hiilidioksidipäästöjä. Elinkaariarviointi alkaa tuotevaiheesta, jossa raaka-aineista valmistetaan voimaloissa käytettävät komponentit. Elinkaareen kuuluu myös aurinkovoimalan rakentaminen sekä käyttövaihe, jolloin voimala tuottaa sähköä auringonsäteilyn vaikutuksesta. Elinkaari päättyy voimalan käytöstä poistamiseen sekä materiaalien kierrättämiseen ja loppusijoittamiseen.

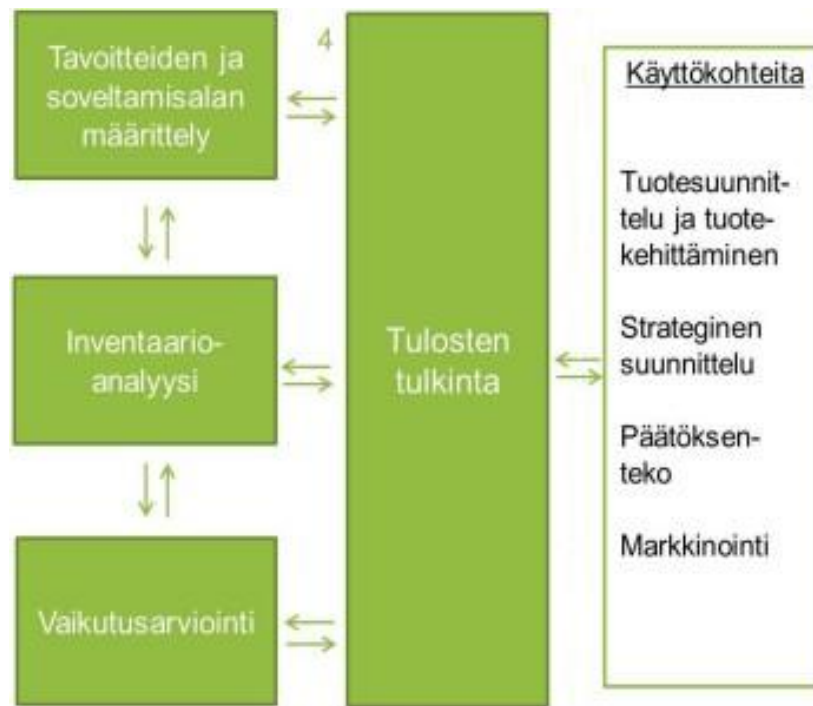
Luvussa 2 käsitellään elinkaariarviointia ja sen eri vaiheita. Luvussa 3 käsitellään aurinkoenergiaa yleisesti sekä maa-asenteisen aurinkovoimalan toimintaa. Luvussa 4 käsitellään aurinkovoimalan eri yksikköprosesseja sekä määritellään työn tavoitteet sekä rajataan käsiteltävät prosessit. Luvussa 5 käsitellään voimalan eri prosessien päästöt ja luvussa 6 kerätään saadut tulokset yhteen. Luvussa 7 tulkitaan työssä saatuja tuloksia ja luvussa 8 vedetään yhteen työn aikana syntyneet tiedot ja johtopäätökset.

Toimeksiantajana tässä insinööriyössä toimii Oomi Oy, joka vuonna 2020 perustettu energiayhtiö. Oomin ovat perustaneet Oulun Seudun Sähkö, Pori Energia, Vantaan Energia, Lahti Energia sekä Oulun Sähkönmyynti Oy ja sen osakkaat. Oomi vastaa näiden yhtiöiden sähkönmyynnistä. [1.] Oomissa on sähkönmyynnin lisäksi myös muuta liiketoimintaa. Oomi myy myös esimerkiksi kuluttajille ja yrityksille aurinkovoimaloita, sähköauton latauspalveluita ja työsuhdepolkupyöriä [2].

Maa-asenteisten aurinkovoimaloiden osalta Oomi toimii aina hankekehitysvaiheesta ylläpitoon sisältäen myös voimaloiden suunnittelun, hankinnat ja rakentamisen. Oomin tärkeimpiä arvoja on vastuullisuus, ja se toimii suurimpana tekijänä tämän insinööriyön tekemiselle. Tavoitteena on tuottaa Oomi Oy:lle tietoa aurinkovoimalan elinkaaren eri vaiheiden ympäristövaikutuksista. Maa-asenteisten aurinkovoimaloiden vastuullisuus alkaa jo hankekehitysvaiheessa, kun mahdollisia alueita valitaan maavoimaloiden rakentamiselle. Vastuullisuus kulkee läpi voimalan elinkaaren hankekehityksestä aina voimalan käytöstä pois-
toon ja tavaran kierrättämiseen. [3.]

2 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi eli LCA (life cycle assessment) on kansainvälisesti standardoitu menetelmä, jonka avulla palvelun, tuotteen tai prosessin ympäristövaikutuksia ja resursseja voidaan analysoida ja tulkita. LCA:lla voidaan tarkastella koko elinkaaren aikana syntyviä ympäristövaikutuksia aina raaka-aineiden hankinnasta luonnosta kierrätykseen ja loppusijoitukseen asti. Täydellinen LCA on kuitenkin todella työläs ja monivaiheinen prosessi, joten yleensä LCA on yksinkertaistetumpi ja suppeampi. Yksinkertaistetulla elinkaariarviolla (streamlined LCA) voidaan rajata tarkasteltavaa osaa esimerkiksi vain tiettyyn vaiheeseen prosessia tai tiettyyn ympäristövaikutukseen tai tiettyyn päästöön. 23ISO-standardi 14400 kuvaa LCA:n periaatteet ja viitekehyksen, ja ISO 14044 määrittelee vaatimukset, ja antaa ohjeita LCA:lle. [4.] Kuvassa 1 esitetään elinkaariarvioinnin vaiheet ja käyttökohteet.



Kuva 1. Elinkaariarvioinnin vaiheet ja käyttökohteet [4.]

Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely selkeästi on todella tärkeää, jotta arvioinnin tekeminen on sujuvaa ja tehokasta. Määrittely sisältää ainakin seuraavat asiat: arvioinnin syyt, raportoinnin vaatimukset, arviointia rajoittavat tekijät ja tulosten hyödyntäjät sekä tarkasteluajanjakson. [4.]

Inventaarioanalyysissä kerätään tarvittavia tietoja yksikköprosesseista, jotka kuvaavat prosessin tai tuotteen koko elinkaaren. On tärkeää kuvata tarkasti eri yksikköprosessit, joita koko elinkaaren aikana tarvitaan, jotta tietojen kerääminen on mahdollisimman selkeää. Tietojen tarve määräytyy siis tavoitteiden ja soveltamisalan mukaan. Inventaarioanalyysissä kuvataan yleensä ainakin tärkeimmät ja merkittävimmät yksikköprosessit. Inventaarioanalyysissä on myös mahdollista käyttää rajoituksia ja rajaussääntöjä, jolloin tietyt prosessit jätetään huomioimatta, mutta saadaan esimerkiksi 95 % vaikutuksista arviointiin. Inventaarioanalyysissä määritellään myös käytettävä toiminnallinen yksikkö (functional unit), joka toimii perustana analyysille ja jonka suhteen kerätyt tiedot lasketaan. Toiminnallinen yksikkö voi olla esimerkiksi kilo tuotetta tai kilowattitunti energiaa. [4.]

Vaikutusarvioinnin tavoitteena on tarkastella yksikköprosessien aiheuttamien haittojen tai päästöjen potentiaalinen vaikutus valittaviin indikaattoreihin nähden. Vaikutusten arvioinnissa kerätään inventaarianalyysissä saadut tiedot yhteen tai useampaan vaikutusluokkaan. Saatuja tietoja käytetään vaikutusarviointivaiheessa, joka suoritetaan materiaalitietopankin tai LCA-ohjelmiston avulla. Saadut tiedot muunnetaan yhteiseen yksikköön, jolloin laskentavaiheessa saadaan yksittäinen luku kuvastamaan koko vaikutusluokan indikaattoritulosta. Vaikutusarviointi voidaan tehdä keski- tai loppupistemallinnuksena. Keskipistemallinnuksessa kuvataan suoria päästöjä, kuten ilmastonmuutosta, happamoitumista, rehevöitymistä ja otsonikatoa. Loppupistemallinnus kuvastaa keskipistemallinnuksessa vaikuttavien indikaattoreiden vaikutusta yleisesti suojeltaville kohteille, kuten ihmisen terveydelle, luonnonvaroille ja luonnonympäristölle. [4.]

Tulosten tulkinta vaihe sisältää johtopäätökset, tulosten herkkyyden, täydellisyyden ja siihen vaikuttavien tekijöiden tunnistamisen sekä toimenpidesuosituksen tekemisen. Lähtötietojen laadun arviointi ja epävarmuuksien analysointi on tärkeä osa tulosten tulkintaa. Tulosten tulkinnassa tulee myös huomioida mahdolliset rajaukset, joita arvioinnissa on käytetty. [4.]

3 Aurinkoenergia

Auringosta saapuva energia kattaa noin 15 sekunnissa ihmiskunnan vuorokaudessa käyttämän energian määrän. Auringosta tulee siis maapallolle valtavasti energiaa, ja sitä hyödyntämällä voidaan korvata uusiutumattomia fossiilisia polttoaineita. Suomessa aurinkoenergian tuotantopotentiaali on Pohjois-Saksan tasolla, sillä kesän pitkät päivät kompensoivat talven pimeyttä. Suomessa aurinkovoimalla tuotetaan tällä hetkellä noin 1 % koko Suomen sähköntuotannosta ja tuotetun aurinkoenergian määrä jatkaa koko ajan kasvuaan.

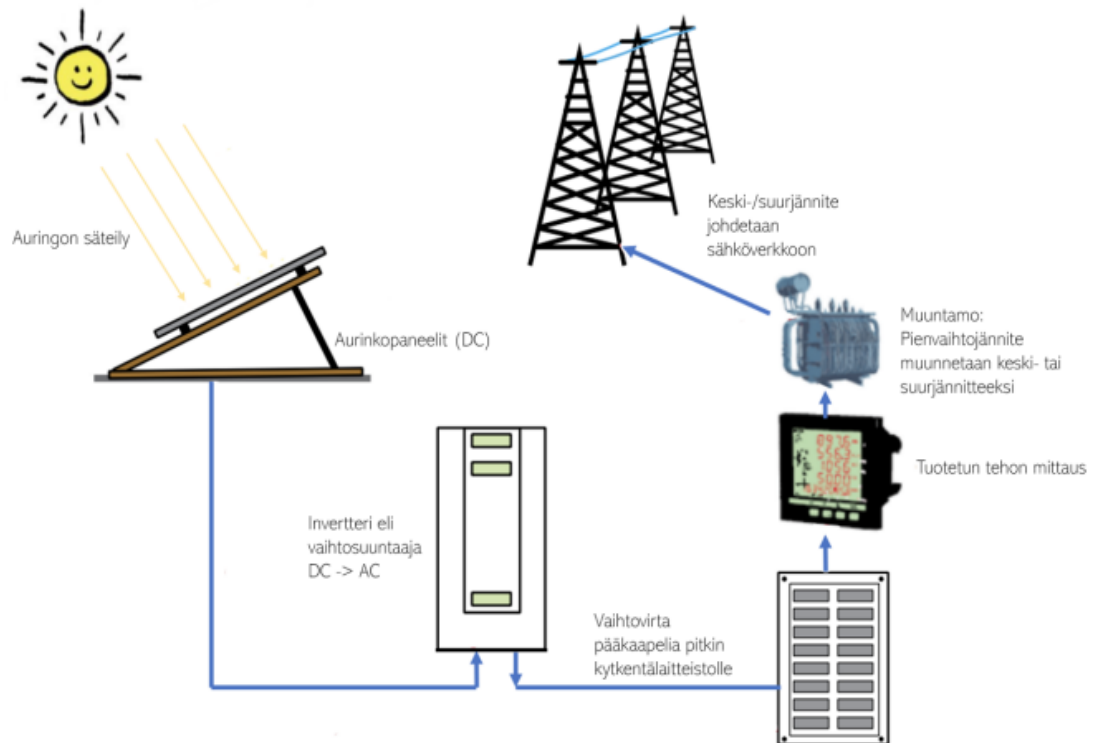
Fingridin mukaan vuoteen 2030 mennessä aurinkoenergian määrä voi kymmenkertastua nykyiseen määrään verrattuna. Tuotannon määrän kasvuun vaikuttaa suurelta osin teollisen kokoluokan aurinkovoimapaistot, jotka ovat

Suomessa nykyisin vielä harvinaisia. Teollisen kokoluokan maa-asenteiset aurinkovoimalat pystyvät tuottamaan sähköä useita kymmeniä megawatteja ja ovat täten tärkeitä energiantuotantomuotoja fossiilisista polttoaineista eroon pyrittäessä. [5.]

Yhden megawattipiikin aurinkovoimala tuottaa vuodessa noin 900–1 000 megawattituntia energiaa [6]. Wp eli wattipiikki kuvaa aurinkopaneelin nimellistehoa, joka on vakio-olosuhteissa mitattu paneelin teho. Todellinen teho on riippuvainen monesta eri tekijästä: auringon säteilytehosta, paneelin asennuskulmasta, lämpötilasta, asennus ilmansuunnasta ja mahdollisista varjostumista. Suotuisissa olosuhteissa paneelin teho voi hetkellisesti jopa ylittää nimellistehonsa. [7.]

Maa-asenteinen aurinkovoimalalla on monia etuja verrattuna katolla toimivaan voimalaan. Isojen teollisen kokoluokan voimaloiden tilantarve on usein sen verran suuri, että niitä ei ole mahdollista edes rakentaa katoille. Aurinkopaneelit voidaan maa-asenteisena suunnata optimaalisesti ja niiden kallistuskulmaa voidaan korottaa verrattuna katoilla toimiviin voimaloihin, jolloin voimalan tuotanto on parempaa. Maa-asenteisen voimalan viilennys on myös parempaa, kun paneelien alla ja takana on enemmän tilaa. Se parantaa voimalan tuotantoa, sillä viileässä aurinkopaneelit tuottavat enemmän. Maa-asenteisen aurinkovoimalan tilantarve on noin 1–1,5 ha/MW. [6.]

Kuvassa 2 esitetään teollisen kokoluokan maa-asenteisen aurinkovoimalan toimintaperiaate.

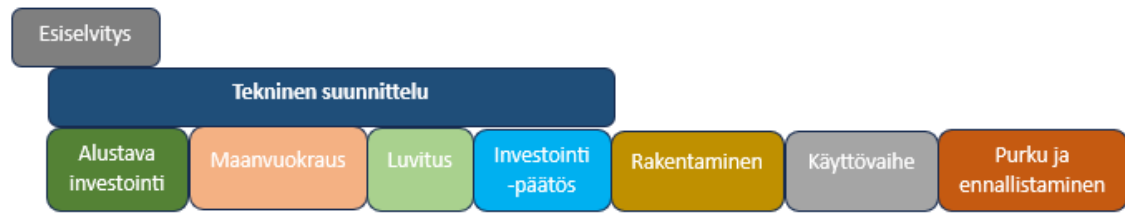


Kuva 2. Maa-asenteisen aurinkovoimalan toimintaperiaate [8].

Auringon säteilyenergiasta tuotetaan valosähköisen ilmiön kautta sähköenergiaa. Aurinkopaneelien tuottama tasavirtasähkö kulkeutuu invertteriin, jossa tasavirtasähkö muuttuu vaihtovirtasähköksi [9]. Sähkö kulkee läpi kytkentälaitteiston, jossa suojalaitteisto ja maadoituskytkentä sijaitsee. Muuntaja muuttaa sähkön jännitetason keski- tai suurjännite verkkoon vaaditulle tasolle, jota pitkin sähkö päättyy jakeluverkkoon ja aina kuluttajille asti. [8.]

4 Maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaari

Valmiin maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaari on noin 25–35 vuotta [6]. Voimalan koko elinkaari kuitenkin alkaa jo ennen rakentamista, kun aurinkovoimaloita aletaan hankekehittämään. Aurinkovoimala voi olla suunnitteilla useita vuosia ennen kuin voimala valmistuu. Kuvassa 3 on teollisen kokoluokan maa-asenteisen aurinkovoimalan prosessi.



Kuva 3. Maa-asenteisen aurinkovoimalan prosessikaavio [8].

Esiselvitysvaiheessa mahdollisen maa-alueen soveltavuutta voimalalle kartoitetaan. Alueen koko, muoto ja maaperä ovat tärkeitä selvittää hyvin, jotta saadaan tietoa, onko voimala järkevää rakentaa alueelle. Muita selvitettäviä aiheita on muun muassa lähin sähköverkon liityntäpiste ja alueella oleva tiestö. Parhaiten maavoimala soveltuu tasaiselle vähän maatöitä vaativalle alueelle, joka olisi lähellä sähkönsiirtoverkkoa ja tiestöä. Tällaisia alueita voivat olla esimerkiksi huonosti tuottavat pellot, täytetyt kaatopaikat ja muut täyttöalueet. [10.]

Maanvuokraukseen päästään, kun alue on todettu soveltuvaksi aurinkovoimalalle. Maanvuokrasopimus tehdään maanomistajien kanssa, kun kiinnostus vuokrauksesta löytyy ja aurinkovoimaloiden periaatteet ovat omistajilla selvillä. [11.]

Luvitusvaiheessa voimalan rakentamiselle haetaan tarvittavia lupia. Lupakäytännöt ovat erilaisia eri kunnissa eikä yhtenäistä käytäntöä aurinkojärjestelmän rakentamiseen Suomessa ole. Lupamenettelyyn vaikuttaa kuntien eri tapojen lisäksi voimalan koko, sijainti ja kaavatilanne. [8]

Alustava tekninen suunnittelu aloitetaan alueelle esiselvitysvaiheessa, mutta lopullisen teknisen suunnittelun pariin päästään maanvuokraussopimuksen jälkeen. Teknisessä suunnittelussa lähtötietojen perusteella suunnitellaan telineiden ja aurinkopaneelien sijoittelu alueelle ja valitaan asennuskulma paneeleille. Tarvittavien maatöiden ja raivauksien suunnittelu kuuluu myös tekniseen suunnitteluun kuten myös sähkösuunnittelu. Suunnittelussa on monia huomioon otettavia asioita, ja tarkka suunnittelu onkin yksi tärkeimmistä asioista rakentamisprojektin sujuvuuden kannalta. [8.]

Lopullinen investointipäätös tehdään, kun maa-asenteisille voimaloille hyväksytyn lupapäätöksen jälkeen. Ennen investointipäätöstä myös käytettävät komponentit päätetään. Invertteri- ja paneelimallit päätetään ja telineet valitaan alueelle sopiviksi. Investointipäätös syntyy, kun käytettävät komponentit on valittu ja hinnat on tarkistettu. [8.]

Rakentaminen aloitetaan suunnitelluilla maatöillä ja mahdollisilla raivaustöillä. Jos alueella on varjostumia aiheuttavia puita tai muuta kasvillisuutta, tulee puusto raivata voimalan tieltä. Paneelien ylle ei saa muodostua varjoa, sillä paneelit ovat ketjutettuna toisiinsa ja koko voimalan teho laskee, jos varjostumia ilmenee. Maatöissä voimalan aluetta tasoitetaan ja veden kulkeutuminen pois alueelta varmistetaan ojituksella. Maatöiden laajuuteen vaikuttaa suurelta osin alueelle valitut telineet, sillä jotkut telineet vaativat tasaisemman maaperän. Kaapelin kuljetukset tehdään maatöiden yhteydessä. Maatöiden jälkeen paalutetaan telineiden perustukset. Perustuksien asentamisen jälkeen telineet sekä paneelit voidaan asentaa. Sähkötyöt voidaan tehdä loppuun asti, kun kaikki mekaniikkatyö alueella on tehtynä. Sähkötöiden valmistuttua voimala on valmis käyttöönottoon. [8.]

Huolto ja ylläpito maa-asenteiselle voimalalle on yleensä vähäistä. Aurinkovoimaloissa on melko vähän kuluvia osia. Voimalan käyttöikä voi parhaimmillaan olla kuitenkin 30–35 vuotta, joten on todennäköistä, että voimalassa jotkut osat kuluvat ja rikkoutuvat. Lähtökohtaisesti voimaloissa olevat invertterit joudutaan vaihtamaan ainakin kerran voimalan elinkaaren aikana, sillä invertterien käyttöikä on noin 15–20 vuotta. [12.]

Voimaloita pystyy monitoroimaan ja rikkoutuneet osat on mahdollista tunnistaa etänä. Voimaloissa tulee tehdä myös vähäisiä huoltotöitä ja huoltokäyntejä, jossa tarkastetaan voimalan kunto ja mahdollisesti raivataan kasvavaa kasvillisuutta. [13.]

Elinkaaren loputtua aurinkopaneelit ja muu materiaali puretaan alueelta ja toimitetaan kierrätykseen ja alue ennallistetaan [6].

4.1 Tavoitteiden määrittely

Maa-asenteisen aurinkovoimalan prosessi on todella monivaiheinen, ja materiaaleissa käytetään monia komponentteja. Tarkka LCA-laskelma maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaaresta olisi todella työläs prosessi. Jokainen voimala on myös päästöiltään erilainen sijainnista, voimalan koosta ja maaperästä sekä käytettävistä komponenteista johtuen.

Tässä insinööriyössä tavoitteena onkin saada tieto voimalan eri prosessien vaikutuksista hiilijalanjälkeen sekä saada joistain aurinkovoimalan yksikköprosesseista vertailtava tieto voimaloiden välille esim. aurinkopaneelien hiilijalanjälkierot. Työssä hyödynnetään toimittajilta saatua tietoa valmiista osista sekä yleistä päästötietokantaa, jonka avulla voidaan laskea eri prosessien ja materiaalien päästöt. Yleinen päästötietokanta kattaa Suomessa käytettävien materiaalien, kuljetuksien ja työmaatoimintojen keskimääräiset päästötiedot [13]. Päästötietojen ja käytettävän materiaalin painon avulla on mahdollista laskea materiaalin hiilijalanjälki [13].

Työ keskittyy ilmastonmuutosten ympäristövaikutuksiin hiilijalanjäljen muodossa. Hiilijalanjälki tarkoittaa tässä työssä maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaaren aikaisia kasvihuonepäästöjä. Hiilidioksidipäästöt (CO₂) ilmoitetaan usein hiilijalanjälkenä ja muut kasvihuonepäästöt muutetaan ekvivalentiksi määräksi hiilidioksidia (CO₂-ekv.) [14]. Tavoitteena on myös saada kuvattua prosessien aikana syntyvät päästöt, jotta työtä hyödyntäen pystytään jatkossa laskemaan yksittäisien voimaloiden elinkaariarvio ja saadaan käsitys eri vaiheiden ympäristövaikutuksista.

4.2 Aurinkovoimalan prosessien rajaaminen

Tässä insinööriyössä tarkastellaan aurinkovoimalan elinkaarta rakennushankkeen CEN/TC 350-standardiperheen mukaisen elinkaarimallin pohjalta. Työssä tarkasteltavien prosessien ulkopuolelle jää aurinkovoimalan yksikköprosesseista esiselvitys-, alustava investointi-, maanvuokraus-, luvitus- ja

investointipäätös- sekä suunnitteluvaihe. Kyseiset vaiheet ovat laskennallisesti todella hankalia laskea sekä kyseisten vaiheiden päästöt ovat hyvin pieniä koko voimalan elinkaaren suhteutettuna. Työssä tarkastellaan maa-asenteisen aurinkovoimalan tuote-, rakennus-, käyttö- ja purkuvaihetta.

| Tuotevaihe A1-3 | Rakennusvaihe A4-5 | Käyttövaihe B1-7 | | Purkuvaihe C1-4 |
|-------------------------------------|---------------------------------|--|--|---|
| A1 Raaka-aineen hankinta | A4 Kuljetus työmaalle | B1 Tuotteen käyttö rakennuksessa | B5 Laajamittaiset korjaukset | C1 Purkaminen |
| A2 Kuljetus valmistukseen | A5 Työmaa-toiminnot | B2 Kunnossapito | B6 Energian käyttö | C2 Kuljetukset |
| A3 Tuotteen valmistus | | B3 Korjaus | B7 Veden käyttö | C3 Purkujätteen käsittely |
| | | B4 Osien vaihto | | C4 Purkujätteen loppusijoitus |

Kuva 4. Rakennushankkeen elinkaarimalli [14].

Tuotevaihe A1–3 kuvaa eri materiaalien valmistuksesta syntyvät päästöt aina raaka-aineen hankinnasta tuotteen valmistukseen (kuva 4). Rakennusvaiheessa A4–5 kuvataan työmaa-aikaisia päästöjä aina tavaran kuljetuksesta käyttövalmiuden saavuttaneeseen aurinkovoimalaan. Käyttövaihe B1–7 kuvastaa käytön aikaisia päästöjä ja purkuvaihe C1–4 kuvaa purkamisesta, kierrätyksestä ja ennallistamisesta syntyviä päästöjä.

Alla olevassa taulukossa 1 kuvataan, mitkä materiaalit ja prosessit tässä insinööriyössä otetaan huomioon aurinkovoimalan osalta. Käsittelyn ulkopuolelle muun muassa jäävät muuntajat sekä työntekijöiden kulkemat matkat, sillä ne ovat laskennallisesti haastavia, johtuen useista muuttujista sekä tietojen puutteesta. Työ kattaa kuitenkin tärkeimmät yksikköprosessit ja antaa näin ollen kattavan ja todenmukaisen kuvan aurinkovoimalan kokonaispäästöistä.

Taulukko 1. Tarkastelun rajaus.

| Tuotevaihe A1–3 | Rakennusvaihe A4–5 | Käyttövaihe | Purkuvaihe |
|---|---|--|--|
| Sisältyy käsittelyyn | | | |
| Paneelit Telineet Perustukset Invertterit Kaapelit Putket Aidat | Työkoneiden energia Rakentamisen hukkamateriaali Rakennusvaiheen kuljetukset Maatyöt Hakkuutyöt | Korjaukset Osien vaihto Puun hiilinielun menetys | Purkaminen Paneelien ja invertterien käsittely ja loppusijoitus Kuljetukset |
| Ei sisälly käsittelyyn | | | |
| Muuntajat Akustot Työkoneiden ja työkalujen valmistus | Työntekijöiden työmatkat Työkoneiden kuljetukset Pakkausmateriaali Työkalujen kuluttama sähkö | Työntekijöiden työmatkat Kunnossapito | Työntekijöiden työmatkat Rakennusjätteen loppusijoitus ja käsittely pl. paneelit ja invertterit |

4.3 Toiminnallinen yksikkö

Elinkaariarvion toiminnallisena yksikkönä toimii yhden megawattipiikin maasenteisen aurinkovoimalan rakentaminen, sillä oletuksella, että se vie yhden hehtaarin pinta-alaa. Todellisuudessa pinta-ala vaihtelee voimaloissa muodon mukaan noin 1–1,5 ha/MW [5]. Työstä saadaan siis tulos, joka on muodossa kg CO₂-ekv/MWp. Tulos pystytään myös muuttamaan laskennan jälkeen muotoon

g CO₂-ekv/kWh, jolloin tulosta voidaan vertailla muiden energiatuotantomenetelmien kesken.

5 Inventaarioanalyysi

Inventaarioanalyysissä kerätään tieto voimalan eri vaiheiden päästöistä, minkä pohjalta voidaan laskea voimalan kokonaispäästöt. Tässä luvussa kerrotaan myös, mitä materiaaleja sekä komponentteja maa-asenteiseen aurinkovoimalaan käytetään ja kuvataan kyseisten komponenttien toimintaa.

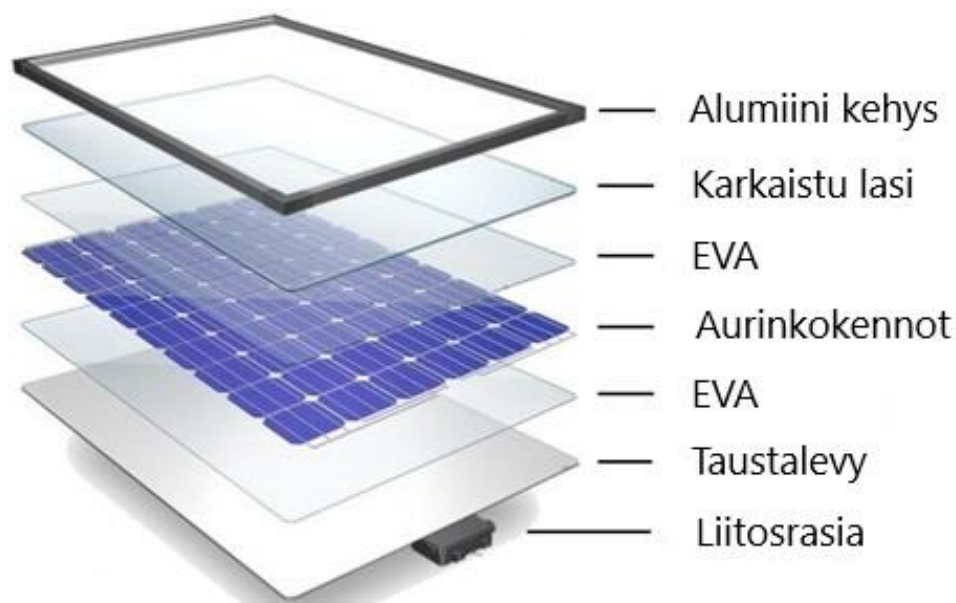
5.1 Tuotevaihe A1–A3

Materiaalien hankinta sovitetaan aina aurinkovoimalalle sopivaksi. Materiaalin hankintaan vaikuttavia tekijöitä ovat suunnittelussa arvioidut tekijät esimerkiksi telineiden asennuskulmat, hinta, saatavuus ja ekologisuus [6]. Tässä luvussa käsitellään elinkaarimallin A1–A3 vaiheiden aikana syntyviä päästöjä.

5.1.1 Paneelit

Aurinkopaneelityyppejä on kolmessa sukupolvessa. Ensimmäisen sukupolven aurinkopaneelit valmistetaan yksikiteisestä tai monikiteisestä piistä. Piistä valmistetut aurinkopaneelit ovat nykyäänkin ylivoimaisesti suosituimpia aurinkopaneeleja ja niiden osuus markkinoilla olevista paneeleista on noin 90 %. Yksikiteisen aurinkopaneelin hyötysuhde on 17–22 %, ja nykyaikaisen monikiteisen paneelin hyötysuhde on 15–17 %. Toisen sukupolven aurinkopaneeleja ovat ohutkalvokennot, joiden hyötysuhde on 9–11 %. Ohutkalvokennon etuja ovat sen integroitavuus ja edullinen hinta. [16]

Kolmannen sukupolven kennot ovat vielä tutkimusasteella olevat väriaineherkistetyt kennot [17]. Oomi käyttää aurinkovoimaloissaan pääsääntöisesti yksikiteisiä piikennopaneeleja.



Kuva 5. Aurinkopaneelin rakenne [16].

Paneelien tärkein valmistusmateriaali on pii (Si) (kuva 5). Pii on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine, jonka pysyvin yhdiste on piioksidi. Suurin hiilijalanjälki koko paneelista muodostuu juuri yksikiteisestä piikennosta. Piikentöiden valmistus piioksidista kuluttaa paljon energiaa, sillä aurinkokennoppiin tulee olla 99,99 %:sen puhtaasta, jotta sitä voidaan kutsua aurinkokenno piiksi (SG-Si). Piistä tehdyt aurinkopaneelit ovat melko hauraita, joten paneelit täytyy vielä suojata. Piikentöiden molemmille asennetaan kapselointikalvot. Kapselointimateriaaleja on muutamia, mutta suosituin käytettävä materiaali on tehty etyleenivinyyliasetaatista (EVA). EVA on termoplastinen polymeeri, joka läpäisee auringon säteilyä, mutta ei hajoa siitä. [16.]

EVA-levyjen päälle asetetaan vielä karkaistu lasi. Karkaistu lasi on säteilyä läpäisevää ja lujaa sekä vähän heijastavaa. Lasin tulee suojata aurinkokennoja ympäristöltään. Jää, lumi, lika ja varsinkin hiekka kuluttavat aurinkopaneeleja, joten lasin tulee täyttää tietyt vaatimukset, jotta aurinkopaneelin kunto pysyy

hyvänä koko elinkaaren ajan. Aurinkopaneelin karkaistu lasi on usein noin 3–4 millimetrin paksuista ja noin neljä kertaa vahvempaa kuin levylasi. [16.]

Alin osa paneelista auringosta katsottuna on taustalevy. Taustalevyn tarkoitus on myös suojata paneelia ulkoisiltatekijöiltä ja se toimii myös sähköeristeenä. Uusimmissa malleissa taustalevy on korvattu karkaistulla lasilla, jonka myötä paneelit toimivat kaksipuoleisesti. [16]. Karkaistu lasi mahdollistaa hajasäteilystä muodostuvan tuotannon paneelien takaa, jolloin paneelit tuottavat paremmin kuin yksipuoleiset aurinkopaneelit. [6].

Alumiinikehys on paneelien uloin osa, joka luo vankan rakenteen paneelille. Alumiinin käytön etuja ovat sen kestävyys ja keveys, jolloin aurinkopaneelien paino ei nouse liian suureksi. Aurinkopaneelin paino on tyypillisesti noin 10–12 kg/m² ja paneelit ovat kooltaan noin 2 m². [16.]

Aurinkopaneelin päästöihin vaikuttaa, missä paneeli on tehty. Suurin osa paneeleista valmistetaan Kiinassa ja lähes kaikki käytettävät piikennot valmistetaan Kiinassa, vaikka itse paneelit valmistettaisiinkin muualla. Kuvassa 6 kuvataan Suomessa valmistetun yksikiteisen aurinkopaneelin materiaalipäästöjakauma. Suurin osa päästöistä muodostuu piikentöiden valmistuksesta. [16].



Kuva 6. Aurinkopaneelin materiaalipäästöjakauma [16].

Oomi käyttää teholtaan erikokoisia ja eri valmistajien valmistamia paneeleja. Maa-asenteisessa aurinkovoimalassa voidaan käyttää myös kaksi puoleisia paneeleja, jolloin voimalan tuotto nousee. Paneelien hiilijalanjälki kuvataan taulukossa 2. Paneelien hiilijalanjäljessä on huomioitu paneelin valmistuksesta aiheutuvat päästöt. Muut päästöt kuten kuljetuksen ja kierrätyksen päästöt kuvataan työn seuraavissa luvuissa.

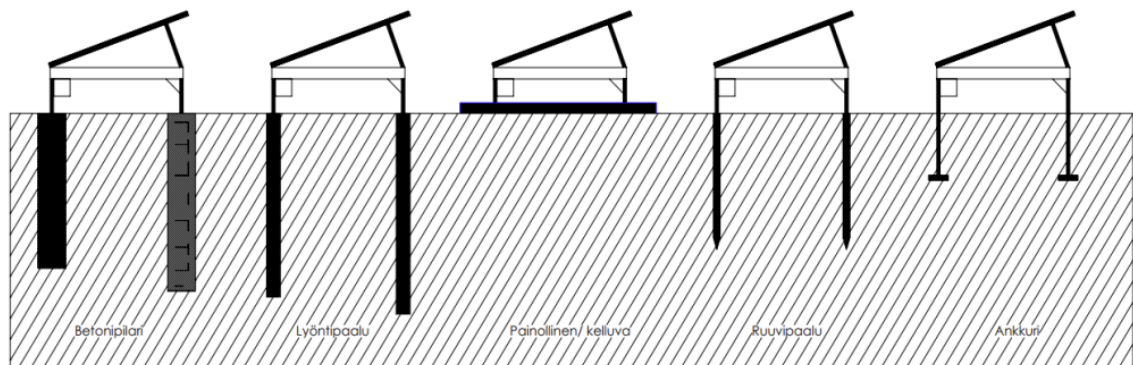
Taulukko 2. Paneelien valmistuksen päästöt [18].

| Paneeli-malli | Teho Wp | kg CO ₂ -ekv/kWp | kpl/MWp | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|---------------|---------|-----------------------------|---------|-----------------------------|
| paneeli 1 | 400 | 445 | 2 500 | 444 626 |
| Paneeli 2 | 650 | 355 | 1 538 | 354 583 |
| Paneeli 3 | 475 | 394 | 2 105 | 394 410 |
| Paneeli 4 | 555 | 429 | 1 802 | 429 260 |

Paneelien päästöt ovat todella suuria koko voimalan päästöihin nähden. kaikki työssä vertailtavat paneelit ovat Kiinassa valmistettuja. Teholtaan suurimmalla paneelilla on pienin hiilijalanjälki MWp:n nähden.

5.1.2 Telineet ja perustukset

Maa-asenteisten voimaloiden telineitä on monenlaisia. Telineen ja sen perustamismallin valintaan vaikuttavat suurimmalta osin maaperän koostumus ja haluttu paneelien asennuskulma sekä tuulikuorman aiheuttama voima, joka telineiden täytyy kestää. Telineiden perustamismalleja on esimerkiksi lyöntipaalut, betonipilarit, ruuvipaalut, maa-ankkurit ja painolastiperustukset (kuva 7). [6.]



Kuva 7. Aurinkovoimalan telineen perustamismalleja [8].

Perustusten tarkempi valinta perustuu maaperän vetolujuuden ja maaperän laadun selvityksestä saatuihin tietoihin. Suomessa maaperä on routivaa, joten perustukset tarvitsevat routaeristeet tai perustuksen upotuksen routimattomaan syvyyteen, jota voidaan pitää noin kahtena metrinä. [8.]

Paalut upotetaan suoraan maahan ja pilarit tuetaan betonilaattaan. Kelluva perustus on mahdollista tehdä painotettuna teräs- tai betoniperustuksena. Kelluvan perustuksen hyöty on, että maapohjaa ei tarvitse läpistä. Maa-asenteisen aurinkovoimalan telineet asennetaan lähtökohtaisesti 30° kulmaan.

Perustusmalli voi vaihdella myös aurinkovoimalan sisällä, jos maaperä on erilainen aurinkovoimalan alueella. Taulukossa 3 on esitetty eri perustusmallien päästöt suhteutettuna MWp:n aurinkovoimalaan. Taulukossa on esitetty kaksi eri perustamismallia laskennan helpottamiseksi. Laskennat on tehty toimittajilta saatujen tietojen pohjalta sekä yleistä tietokantaa hyödyntäen.

Taulukko 3. Perustuksien päästöt [14; 18].

| Perustamismalli | kg CO ₂ -ekv/kg | kg/MWp | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|------------------|----------------------------|---------|-----------------------------|
| Lyöntipaalu | 2,8 | 6 605 | 18 493 |
| Kelluva (betoni) | 0,2 | 236 014 | 47 203 |

Telineet puolestaan valmistetaan sinkitetystä teräksestä. Telineiden tulee olla kestäviä, jotta ne kestävätkin aurinkopaneelien painon ja tuulikuorman aiheuttaman voiman koko voimalan elinkaaren ajan. Telineitä on monen valmistajan tekemiä ja telineitä tulee Suomeen Euroopasta ja Kiinasta. Suomessa valmistetaan myös osa telineistä. Telineiden koko vaihtelee aurinkopaneelien koon mukaan sekä aurinkovoimalan alueen muodon mukaan. [6].

Tässä tarkastelussa oletetaan, että telineiden paino pysyy suhteessa samana, kuin aurinkopaneelien teho. Suurempi aurinkopaneeli tuottaa enemmän, mutta telineen on myös silloin oltava isompi. Tarkastelussa on käytetty yhtä telinevalmistajan telinettä (teline 2) ja siitä saatujen tietojen pohjalta laskettu kilomäärä 1 MWp:n kokoiseen aurinkovoimalaan. Tulosten luotettavuuden varmistamiseksi on mukaan myös laskettu telineiden painon vaihtelu eri valmistajien välillä ja huomioitu se 10 % vaihteluvälillä. Taulukossa 4 kuvataan telineiden päästöt 1 MWp:n kokoiseen voimalaan. Telineiden mukaan on laskettuna kiinnikkeet paneeleille.

Taulukko 4. Telineiden päästöt [14; 18].

| telineet | kg CO ₂ - ekv/kg | kg/MWp | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|----------|--------------------------------|--------|-----------------------------|
| teline 1 | 2,8 | 26 823 | 75 105 |
| teline 2 | 2,8 | 29 803 | 83 449 |
| teline 3 | 2,8 | 32 784 | 91 794 |

5.1.3 Invertteri

Invertterit muuttavat aurinkopaneelien muodostaman tasavirtasähkön vaihtovirtasähköksi. Invertterit ovat tärkeä osa aurinkovoimalaa, sillä sähkön muuttamisen lisäksi ne vastaavat sähkön turvallisesta syöttämisestä verkkoon tai muuntamoon. Pienien maavoimaloiden ja kattovoimaloiden teho on usein niin pientä, että tuotantoon ei tarvita muuntamoita, mutta isoissa teollisen koon maa-asenteisissa aurinkovoimaloiden sähkö johdetaan usein keski- tai suurjänniteverkkoon, jolloin invertterien tuottama pienjännite muunnetaan vielä muuntamon avulla keski- ja suurjännitteeksi. [19].

Invertterejä on kolmenlaisia malleja voimaloiden koosta ja käytöstä riippuen. Mikroinvertterit kiinnitetään suoraan jokaiseen aurinkopaneeliin ja niitä käytetään vain pienen luokan aurinkosähköjärjestelmiin, sillä ne ovat kustannuksiltaan suurempia, kun jokaiseen paneeliin tarvitaan oma invertteri. [19.]

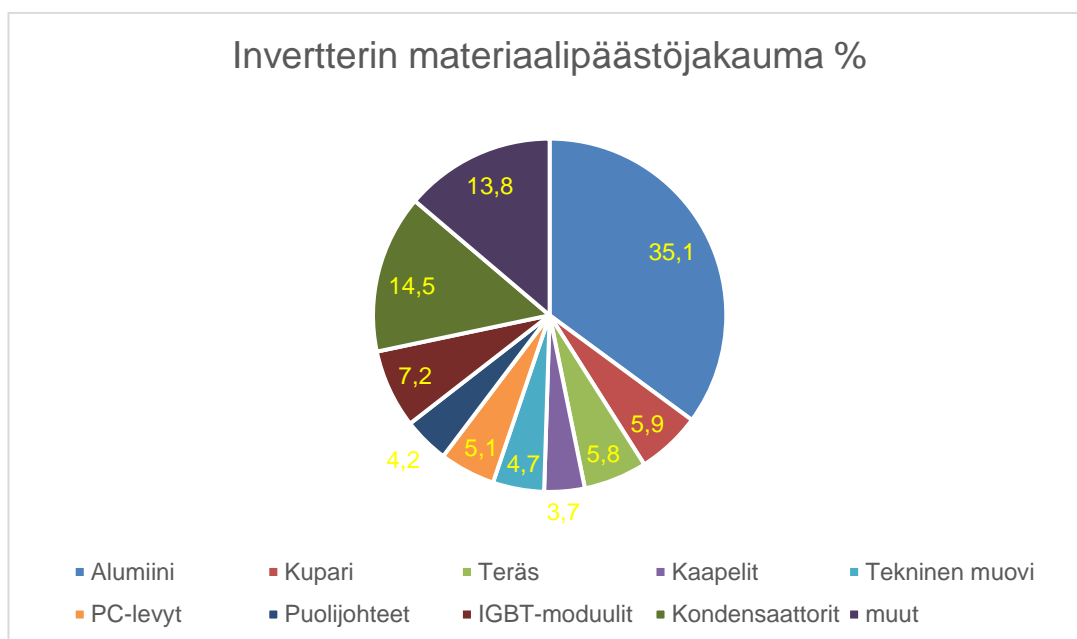
Ketjuinvertterit ovat käytetyimpiä invertterimalleja. Ketjuinvertteri on kytkettynä aurinkopaneelien sarjaan. Ketjuinvertterit sopivat pieniin omakotitalon aurinkosähköjärjestelmiin sekä suuren koon aurinkovoimaloihin, jolloin voidaan käyttää useita verkkoinvertterejä. [19.]

Keskusinvertteri on suuren kapasiteetin invertteri, joka on suunniteltu käytettäväksi teollisen kokoluokan aurinkovoimaloissa. Niiden toiminta on samanlainen ketjuinvertterien kanssa, mutta ne on suunniteltu käsittelemään enemmän virtaa. [19.]

Tässä insinööriyössä käsitellään vain ketjuinvertterejä laskennan helpottamiseksi. Ketjuinvertterien teho vaihtelee paljon sähköjärjestelmän kokoluokan mukaan, mutta tässä insinööriyössä keskitytään suuriin nimellistehoiltaan yli 100 kW:n inverttereihin. Ketjuinvertterien hyötysuhde on noin 96,5–98,2 % valmistajasta ja mallista riippuen. Invertteri muuttaa hyötysuhteen verran tasavirtasähköä vaihtovirtasähköksi, ja loppuosa aurinkopaneelien tuottamasta sähköstä muuttuu hukkalämmöksi. Invertterien elinkaari noin 15–20 vuotta, joten voidaan olettaa, että invertterit tulee vaihtaa kerran voimalan elinkaaren aikana [9].

Invertteri käynnistyy auringon noustessa ja mennee lepotilaan auringon las-
kiessa. Invertterien lepotilan kulutus vaihtelee mallien ja valmistajien välillä, mikä selittää suuret erot invertterien koko elinkaaren hiilijalanjäljessä. [20.]

Kuvassa 8 esitetään invertterien materiaalipäästöjakaumaa. Invertterin suurin päästön lähde on alumiini mitä myös käytetään eniten invertterien valmistuksessa. Invertterien valmistuksessa käytetään monia osia, ja materiaalipäästöt jakautuvat laajasti eri materiaalien kesken. Materiaalipäästöissä ei huomioida käytän aikana tapahtuvia päästöjä.



Kuva 8. Invertterin materiaalipäästöjakauma [18].

Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty invertterien tuotannossa syntyvät päästöt. Muut päästöt, kuten käytönaikainen kulutus ja kuljetukset, on seuraavissa luvuissa.

Taulukko 5. Invertterien valmistuksen päästöt [18].

| Invertterimalli | nimellisteho (kW) | kpl/MWp | kg CO ₂ -ekv/kpl | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|-----------------|-------------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| Invertteri 1 | 100 | 8 | 1 128 | 9 028 |
| Invertteri 2 | 165 | 5 | 611 | 3 055 |

Invertterien väliset erot ovat valmistajien kesken melko suuria, mutta invertterien valmistusvaiheen päästöt eivät ole kovin suuria voimalan kokonaispäästöihin nähden. Tarkastelussa mukana olleista inverttereistä nimellisteholtaan suuremmalla invertterillä on pienempi hiilijalanjälki.

5.1.4 Kaapelit, aidat ja putket

Aurinkovoimaloissa käytetään DC- ja AC-kaapeleita, sekä maadoituskaapeleita. DC-kaapelit eli tasasähkökaapelit kulkevat paneeleista toisiinsa muodostaen paneeliketjuja. DC-kaapelit johdetaan paneeleilta inverttereille. AC-kaapelit kulkeutuvat sähkökeskuksiin inverttereiltä ja siitä eteenpäin muuntamoiden kautta aina sähköverkon liittymispisteelle asti. Maadoituskaapeilla estetään vikatilanteissa kosketusjännitteen esiintyminen ja tasataan potentiaalia, jotta jänniteeroja ei synny. [6.]

Aurinkovoimaloissa kaapeleita kuljetetaan putkilla tai hyllyillä. Oletetaan tässä tarkastelussa, että 1 MWp aurinkovoimalassa käytetään AC-kaapelia (4x150 AMCMK) 0,3 km ja DC-kaapelia (PV 6 mm²) 7 km ja maadoituskaapelia (H07Z-K 16 mm²) 0,4 km. Putkea (TEL tupla 110A) käytetään kaapeleiden kuljetukseen 0,5 km. Suuntaa antavat määrät on laskettu Oomin rakentamien maavoimaloiden perusteella.

Maa-asenteinen voimala yleensä myös aidataan, jotta ihmiset eivätkä eläimet mene vahingossa tai tahallaan voimala-alueelle. Oletetaan tässä tarkastelussa, että aidattava alue on piiriltään 460 metriä ja aita on kaksimetristä teräsverkkoaitaa, joka on asennettu uusiomuovista valmistetuille jalustoille. Taulukossa 6 kuvataan kaapelien, aitojen sekä putkien päästöt 1 MWp:n kokoiseen voimalaan.

Taulukko 6. Kaapelien, aitojen sekä putkien päästöt [14; 18].

| Materiaali | kg CO ₂ - ekv/kg | kg/MW | kg CO ₂ -ekv/MW |
|------------------|--------------------------------|-------|----------------------------|
| AC-kaapeli | 4,41 | 990 | 4 366 |
| DC-kaapeli | 4,96 | 560 | 2 776 |
| Maadoituskaapeli | 5,00 | 62 | 310 |
| Putket | 2,39 | 417 | 997 |
| Aidat | 2,64 | 1 534 | 4 051 |
| Aitojen jalusta | 0,318 | 3 864 | 1 229 |
| yht. | | | 13 728 |

Kaapeleiden, putkien ja aidoituksen päästöt ovat melko alhaisia koko voimalan päästöihin nähden. Tarkastelussa ei otettu huomioon AC-kaapeleiden kuljettamista sähköverkon liittymispisteelle asti, sillä matka vaihtelee suuresti eri voimaloiden välillä.

5.2 Rakennusvaihe A4–A5

Rakentamisen aikana syntyvät päästöt ovat toinen merkittävä päästönlähde materiaali- ja prosessipäästöjen lisäksi. Rakentamisen aikana syntyvät päästöt ovat aina yksilöllisiä, johtuen maaperästä, sijainnista ja käytettävistä työvälineistä sekä työtunneista. Tässä tarkastelussa tehdään oletuksia rakennusvaiheesta, jotta saadaan rakennusvaiheen päästöistä mahdollisimman todenmukainen käsitys.

5.2.1 Kuljetus työmaalle

Aurinkovoimalaan tulee monia osia eri valmistajilta. Paneelit tulevat lähes aina Kiinasta, invertterit Kiinasta tai Euroopasta, kaapelit tulevat Euroopasta ja telineet voivat tulla Kiinasta, Euroopasta tai Suomesta.

Tässä tarkastelussa oletetaan, että Suomeen tulevien osien ja Suomessa valmistettujen osien kuljetusmatka aurinkovoimala-alueelle on 50 km. Kiinassa valmistettujen osien kuljetus tapahtuu meriteitse, ja Euroopasta tulevat osat tulee Saksasta meriteitse. Taulukossa 7 esitetään kuljetuksen aikaiset päästöt materiaaleittain.

Taulukko 7. Materiaalien kuljettamisen päästöt [14; 21].

| Kuljetukset | Tuontimaa | Matka 1 ja 2 (km) | t/MWp | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|---------------------------|-----------|-------------------|-------|-----------------------------|
| Paneeli (2) | kiina | 22 000+50 | 59 | 20 968 |
| Paneeli (1) | Kiina | 22 000+50 | 54 | 19 183 |
| Invertterit (1) | Kiina | 22 000+50 | 1,0 | 351 |
| Invertterit (2) | Saksa | 2 000+50 | 0,4 | 14 |
| Telineet (3) | Kiina | 22 000+50 | 33 | 11 700 |
| Telineet (2) | Suomi | 50 | 30 | 67 |
| DC-Kaapelit | Saksa | 2 000+50 | 1 | 19 |
| Muut kaapelit ja putket | Suomi | 50 | 1 | 3 |
| Perustukset (betoni) | Suomi | 50 | 24 | 531 |
| Perustukset (lyöntipaalu) | Kiina | 22 000+50 | 7 | 2 357 |
| Aidat | Suomi | 50 | 5 | 12 |

Aurinkopaneeleiden kuljetuksista syntyvät suurimmat päästöt. Merkittävimpinä eroina materiaalien kesken on Kiinasta valmistettavien telineiden sekä perustuksien kuljetuksista aiheutuvat päästöt verrattuna Suomessa valmistettuihin.

5.2.2 Maatyöt ja hakkuu

Lähtökohtaisesti maa-asenteisen aurinkovoimalan tilantarve on noin 1–1,5 ha/MWp. Tilan tarpeeseen vaikuttaa maavoimalan muoto ja käytettävät telineet. Helpporakenteisin muoto voimalalle on suorakulmio, jolloin paneelit saadaan asennettua tasaisiin suoriin riveihin. Tarvittavien maatöiden määrä on yksilökohtaista maa-asenteisten voimaloiden kohdalla. Maa-asenteiselle voimalle on fiksuinta valita alue, joka vaatii vähän maatöitä. [6].

Aurinkovoimalan telineiden alueen lisäksi maatöitä tehdään mahdollisesti tietön rakentamiseen, sähkökeskuksen ja muuntamoiden alueelle ja kaapelivedolle sähköverkkoon sekä paneelien eteen tarvittavalle varjottomalle tilalle. [6.]

Aurinkovoimala-alueella voi myös kasvaa rakennusvaiheessa puustoa, jolloin alueella pitää suorittaa hakkuutöitä. Metsän hakkuun päästöt pitää laskea voimalan koko elinkaaren ajalle, sillä suomalainen metsä sitoo vuosittain keskimäärin noin 4 700 kg CO₂ itseensä [22]. Laskentaan vaikuttaa myös puun lopusijoitus, sillä sahatavara sitoo itseensä melko hyvin hiilidioksidia vielä vuosienkin päästä, kun taas polttamalla puun sitoma hiili vapautuu ilmakehään [23]. Tässä tarkastelussa oletetaan, että hakkuutavara päätyy polttoon heti eikä sido itseensä hiilidioksidia hakkuun jälkeen. Seuraavassa taulukossa 8 esitetyt luvut ovat olettamuksia hakkuun ja maatöiden aikana syntyvistä päästöistä, jotka on kerätty Oomin rakennuttamien maavoimaloiden tietojen pohjalta.

Taulukko 8. Maatöiden päästöt [14;18].

| Työvaihe | Työkone | h/MWp | kg CO ₂ - ekv/h | kg CO ₂ - ekv/MWp |
|----------------------|----------------------------|-------|-------------------------------|---------------------------------|
| Puiden hakkuu | Kaivinkone 25tn (kauhalla) | 45 | 40,66 | 1 830 |
| Puiden keräys | Kaivinkone 25tn (kauhalla) | 9 | 40,66 | 366 |
| Kuivatusojien kaivuu | Kaivinkone 30tn | 11 | 48,79 | 537 |
| Kentän tasaus | Kaivinkone 25 tn | 30 | 40,66 | 1 220 |
| Pyöräkone | Pyöräkuormaaja 19tn | 2,5 | 39,4 | 99 |
| Jyrsintä | Kaivinkone 25 tn | 8,5 | 40,66 | 346 |
| Maanajo | Traktorikaivuri | 8 | 25,8 | 206 |
| yht. | | 114 | | 4 603 |

Hakkuusta ja maatöistä aiheutuvat päästöt ovat verrattain pieniä koko voimalan päästöihin nähden. Suurin päästö hakkuista syntyy metsän sitoman hiilinielun menetyksestä. Metsän hiilinielun menetyksestä syntyvät päästöt ovat kuvattuna taulukossa 9. Hiilinielun menetyksestä aiheutuvat päästöt jaetaan voimalan elinkaaren ajalle ja ovat käyttövaiheen päästöjä.

Taulukko 9. Metsän hiilinielun menetyksen päästöt [22].

| Metsän hiilinielu | kg CO ₂ /MWp/a | Elinkaari vuodet | kg CO ₂ - ekv/MWp |
|-------------------|---------------------------|------------------|---------------------------------|
| | 4 700 | 25 | 117 500 |
| | 4 700 | 35 | 164 500 |

5.2.3 Asentaminen

Maatöiden jälkeen aurinkovoimala-alueella aloitetaan telineiden paalutus, telineiden sekä paneelien asennus sekä kaapelointi. Työmaa-alueella käytetään eri työkoneita ja niistä syntyvät päästöt kuvataan taulukossa 10. Taulukossa kuvatut työvaiheet tapahtuvat jokaisessa voimalassa. Työkoneiden käyttötunnit eivät kuitenkaan ole samanlaista jokaisessa voimalassa johtuen maaperästä, telineistä ja paneelien painosta. Paalutuskoneen vauhtiin vaikuttaa suurilta osin voimala-alueen maaperä. Paneelien asentamisen vauhtiin vaikuttaa paneelin koko ja telineiden asentamiseen vaikuttaa eri valmistajien telineet ja telineissä oleva säätövara. Suurempi säätövara nopeuttaa telineiden saamista oikeaan asentoon. Sähkökäyttöisten työkalujen kohdalla tässä tarkastelussa oletetaan, että työkalujen akut ladataan aggregaattia käyttämällä. [6].

Taulukko 10. Eri työvaiheiden päästöt [14].

| Työvaihe | Työkone | h/MWp | kg CO ₂ -ekv/h | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|----------------------------|---------------------|-------|---------------------------|-----------------------------|
| Kaapeliojat ja maadoitus | kaivinkone 25 tn | 18 | 40,66 | 732 |
| Materiaalien purku ja jako | Pyöräkuormaaja 15tn | 20 | 39,4 | 788 |
| Perustuksien paalutus | paalutuskone | 129 | 13,05 | 1 683 |
| Paneelien asennus | Henkilönostin | 250 | 7,4 | 1 850 |
| Yleinen sähköntuotto | Aggregaatti | 10 | 3,7 | 37 |
| yht. | | | | 5 090 |

5.3 Käyttövaihe

Maa-asenteisen voimalan käyttöikä voidaan pitää paneelien käyttöikään, joka on noin 25–35 vuotta. Hyvin hoidettuna voimala voi tuottaa tehokkaasti sähköä myös tuon ajan jälkeen. Suurimpia käyttövaiheen päästöjä on invertterien vaihdot, sekä invertterien lepotilassa kuluttama sähkö sekä mahdollinen metsän hiilinielun menetys. Invertterin käyttöikä on noin 15 vuotta. [6.]

Maa-asenteisen aurinkovoimalan käyttövaihe on siinä mielessä helppoa, että voimala tuottaa sähköä aina, kun aurinko paistaa. Tuotetun sähköenergian määrä vaihtelee auringon säteilyvoimakkuuden mukaan. Säteilyn voimakkuus on riippuvainen sijainnista. Sähkön tuotantoon vaikuttaa myös käytettävät paneelit, muut materiaalit sekä asennuskulma ja asennussuunta. [6.]

Maa-asenteinen aurinkovoimala on helppohoitoinen ja toimii itsekseen suurimman osan ajasta. Voimalaan voi kuitenkin tulla vikatila ja voimala saattaa tarvita huoltoa. Vikatilanteet voivat johtua ulkoisista tekijöistä tai itse laitteisto voi vikaantua. Ulkoisia tekijöitä on esimerkiksi sääilmiöt tai mahdollinen ilkivalta. Eri sääilmiöt voivat haitata voimalan tuotantoa, jos paneeliin tulee likaa tai muuta vastaavaa, joka ei lähde itsekseen sateiden aikana pois paneelin päältä. Sisäisiä vikoja voivat olla paneelien tai invertterien vikaantuminen, joka voi johtua esimerkiksi kosteuden pääsystä laitteistojen sisälle. Viat voivat johtaa tehon tai jännitteiden heikkenemiseen. Aurinkovoimaloiden toimintaa usein monitoroidaan, jotta mahdolliset viat tulisivat näkyviin. [13.]

Voimaloissa on suositeltavaa suorittaa vuosittainen huoltokäynti, jossa aistinvaraisesti tarkastetaan aurinkopaneelien kiinnitykset ja paneelien kunto, DC-kaapeleiden liitosten kunto sekä kasvillisuuden kasvu. Kasvillisuutta voi joutua siistimään voimaloiden alueella, koska aurinkopaneelin varjostuessa voimalan tuotanto heikkenee. [6.]

Tässä työssä käyttövaiheen päästöistä otetaan huomioon invertterien vaihtamiset sekä käytön aikana vioittuneet paneelit sekä invertterien lepotilassa kuluttama energia. Tässä tarkastelussa oletetaan että 1 % aurinkovoimalan

paneeleista vioittuu käytön aikana ja invertterit vaihdetaan kerran voimalan elinkaaren aikana. Taulukossa 11 on esitetty käyttövaiheen aikana tapahtuvat päästöt, kun voimala on tuotannossa 25 vuotta ja invertterinä toimii invertterimalli 1.

Taulukko 11. Aurinkovoimalan käyttövaiheen päästöt [18; 22].

| Käyttövaihe 25 v | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|----------------------|-----------------------------|
| Invertterien vaihdot | 9 379 |
| Paneelien vaihdot | 6 072 |
| invertterien kulutus | 41 424 |
| Metsän hiilinielu | 117 500 |
| yht. | 174 375 |

Suurin päästö käyttövaiheessa muodostuu metsän hiilinielun menetyksestä sekä invertterien lepotilassa kuluttamasta energiasta. Käyttövaiheen päästöt ovat kuitenkin verrattain pieniä koko voimalan elinkaaren aikana syntyviin päästöihin.

5.4 Purkuvaiheen päästöt

Purkuvaiheessa aurinkovoimala puretaan alueelta ja toimitetaan kierrätykseen. Aurinkopaneeleista tulee elektroniikkaromua, kun paneelit poistetaan käytöstä. Aurinkopaneelien valmistajien tulee kierrättää valmistamansa paneelit Euroopan unionin vaatimuksesta. Tällä hetkellä aurinkopaneelien kierrätystavoite on 70 %. Monet aurinkopaneelien osista ovat kierrätettäviä. Aurinkopaneelien sisältämästä piistä saadaan kierrätettyä parhaimmillaan 85 % ja lähes kaikki metalliset osat sekä paneeleissa oleva lasi voidaan kierrättää tai käyttää uudelleen. Myös telineet voidaan kierrättää uudelleen. [17.]

Suomessa ei ole vielä paneeleille suunnattuja kierrätyspisteitä, sillä nykyisin kierrätykseen tulevien aurinkopaneelien määrä on vielä pieni. Muualla

Euroopassa on jo aurinkopaneeleille suunnattuja kierrätyskeskuksia ja on täysin mahdollista, että nykyisin rakennettujen voimaloiden elinkaaren lopussa Suomeen on jo syntynyt paneelien kierrätyskeskuksia. [17.]

Purkuvaihe on nopeampaa kuin asennusvaihe, ja tässä työssä oletetaan, että purkuvaihe on puolet nopeampaa kuin asennusvaihe samoilla työkoneilla ja kuljetukset kierrätyskeskukseen on 50 km [6]. Paneelien ja invertterien kierrätyksen päästöt on huomioitu tässä tarkastelussa muiden materiaalien osalta kierrätyksen ja loppusijoituksen päästöjä ei ole huomioitu.

Taulukko 12. Aurinkovoimalan purkuvaiheen päästöt [14; 18].

| Purkuvaihe | kg CO ₂ -ekv/MWp |
|-------------|-----------------------------|
| Purkutyöt | 2 545 |
| Kuljetus | 209 |
| Paneelit | 43 300 |
| Invertterit | -1 200 |
| yht. | 44 854 |

Aurinkopaneelien kierrätyksestä muodostuvat päästöt ovat suurin päästön lähde purkuvaiheessa (taulukko 12). Invertterien kierrätysprosessi muodostaa hiilikädenjälkeä eli positiivisia ilmastohyötyjä.

6 Vaikutusarviointi

Maa-asenteisen aurinkovoimalan päästöt koostuvat monesta muuttuvasta tekijästä. Lasketaan seuraavaksi kahdelle eri voimalaskenaariolle päästöt, jotka antavat vaihteluvälin mihin aurinkovoimalan päästöt tässä tarkastelussa muodostuvat. Skenaariossa 1 oletetaan, että 1 MW:n voimala on tuotannossa 25 vuotta ja siinä on käytetty eri vaihtoehtoisista komponenteista suurempi päästöisiä komponentteja. Voimalan tuotannon oletetaan olevan vuositasolla 900 MWh 0,4

0,4 %:n vuosittaisella tehon laskulla. Voimala-alueella on myös tehty hakkuu- ja maatöitä.

Taulukko 13. Skenaario 1:n elinkaaren aikaiset päästöt.

| Yksikkö | Tuotevaihe | Rakennusvaihe | Käyttövaihe | Purkuvaihe | yht. |
|-----------------------------|------------|---------------|-------------|------------|---------|
| kg CO ₂ -ekv/MWp | 611 659 | 43 319 | 174 375 | 44 854 | 873 167 |
| Prosenttiosuus % | 70,0 | 4,8 | 20,0 | 5,2 | 100 |

Skenaariossa 2 oletetaan, että 1 MW:n voimala on tuotannossa 35 vuotta ja siinä on käytetty vähäpäästöisempiä lähempänä Suomea valmistettuja komponentteja ja voimalan tuotto on vuositasolla 1000 MWh 0,4 %:n vuosittaisella tehon laskulla. Voimala-alueella ei ole tehty hakkuuta eikä maatöitä kaapeleiden kaivuiden lisäksi.

Taulukko 14. Skenaario 2:n elinkaaren aikaiset päästöt.

| Yksikkö | Tuotevaihe | Rakennusvaihe | Käyttövaihe | Purkuvaihe | yht. |
|-----------------------------|------------|---------------|-------------|------------|---------|
| kg CO ₂ -ekv/MWp | 478 588 | 26 189 | 68 557 | 45 135 | 618 469 |
| Prosenttiosuus % | 77,4 | 4,2 | 11,1 | 7,3 | 100 |

Skenaarion 1:n päästöt ovat noin 42 % suuremmat kuin skenaario 2:n päästöt. Suurimmat erot muodostuvat käytetyistä paneeleista ja metsän hiilinielun menetyksestä, sekä materiaalien kuljetuksista työmaalle. Tuotevaiheen päästöt ovat suurin päästön lähde molemmissa skenaarioissa ja pelkästään aurinkopaneelien valmistus muodostaa noin 51–57 % koko voimalan elinkaaren aikana syntyvistä päästöistä.

Voimalan elinkaarella ja tuotantoteholla on suuri vaikutus voimalan hiilijalanjälkeen, kun sitä verrataan tuotettuun kilowattituntiin.

Taulukko 15. Voimaloiden päästöt tuotettuun kilowattituntiin nähden.

| | Skenaario 1 | | Skenaario 2 | |
|-----------------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| Päästöt | 873 167 | kg CO ₂ -ekv | 618 469 | kg CO ₂ -ekv |
| Tuotto | 21 452 | MWh | 32 721 | MWh |
| Hiilijalanjälki | 40,7 | g CO ₂ -ekv/kWh | 18,9 | g CO ₂ -ekv/kWh |

Skenaario 1:n sähkön päästökerroin on tarkastelussa yli kaksinkertainen skenaario 2:n päästöihin nähden (taulukko 15). Voimalan kokonaistuotannolla on siis valtava vaikutus tuotetun sähkön päästökertoimeen. Tarkastelun tuloksena maa-asenteisen aurinkovoimalan sähkön päästökertoimeksi saatiin 18,9–40,7 g CO₂-ekv/kWh. Suomessa tuotetun sähkön keskimääräinen päästökerroin on noin 77 g CO₂-ekv/kWh, joten maa-asenteisella aurinkovoimalalla voidaan tuottaa selkeästi puhtaampaa sähköä, kuin keskimäärin Suomessa tuotetaan [24].

Aurinkoenergialla pyritään syrjäyttämään uusiutumattonta energiaa. Korvattuja energialähteitä ovat pääasiassa maakaasu, öljy, turve, kivihilli ja ydinvoima. Korvattavan energian päästökerroin on painotettuna keskiarvona 470 g CO₂-ekv/kWh. Syrjäyttäessään uusiutumattomat energiamuodot aurinkovoimalan tuottaa hiilikädenjälkenä siis $470 \text{ g} - (18,9-40,7 \text{ g}) = 451,1-429,3 \text{ g CO}_2\text{-ekv/kWh}$. [25].

Taulukossa 16 on esitetty, kuinka nopeasti molemmat aurinkovoimalaskenaariot alkavat tuottamaan puhdasta energiaa, kun niillä korvataan uusiutumattomat energiamuodot.

Taulukko 16. Puhtaan energian tuotantonopeus.

| | Päästöt | Vuosittainen tuotto ka | Hiilikädenjälki | Puhtaan energian tuotannon alku |
|------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Yksikkö | kg CO ₂ -ekv | kWh | kg CO ₂ -ekv/kWh | Vuosi |
| Skenario 1 | 873 167 | 858 096 | 0,429 | 2,4 |
| Skenario 2 | 618 469 | 934 899 | 0,451 | 1,5 |

Korvatessaan uusiutumattomat energiantuotantomenetelmät tarkastelussa olevat aurinkovoimalaskenaariot alkavat tuottamaan päästötöntä energiaa 1,5–2,4 vuoden päästä tuotannon alusta.

7 Tulosten tulkinta

Tässä insinööriyössä laskettiin kahdelle eri aurinkovoimalaskenaariolle elinkaariarvio hyödyntäen yleistä päästötietokantaa sekä toimittajilta saatuja tietoja. Toimittajilta saatuja tietoja pyrittiin vertailemaan keskenään mahdollisimman tarkasti, mutta tietojen käsittelyssä kävi ilmi, että kaikki saatu tieto ei ollut täysin keskenään vertailtavaa. Osa toimittajilta saaduista tiedoista käsitteli vain tuotevaihetta ja osa koko elinkaarta. Standardit ohjaavat elinkaariarviota, mutta eivät määrittele sitä, mitkä vaiheet arviossa otetaan huomioon. Suuri epävarmuustekijä päästöjen tulosten luotettavuudesta on juuri toimittajilta saadut tiedot.

Toinen tulosten epävarmuuteen vaikuttava tekijä on olettamukset, joita eri vaiheissa arviointi täytyy suorittaa. Työssä ei käsitelty tiettyä rakennettua aurinkovoimalaa vaan esimerkiksi rakentamisen osalta työssä käytettiin erilaisia arvioita ja olettamuksia aurinkovoimalan rakentamisesta. Työssä myös rajattiin ulos tiettyjä vaiheita ja komponentteja kuten muuntajat sekä työntekijöiden kulkematka. Voidaan olettaa, että maa-asenteisen aurinkovoimalan todellinen hiilijalanjälki on muutamia prosentteja työssä saatuja lukuja suurempi, työstä pois rajattujen materiaalien ja prosessin takia.

Erityisesti maa-asenteisen aurinkovoimalan hiilijalanjälkeen vaikuttaa käytettävä aurinkopaneeli, sekä alue johon voimala rakennetaan. Metsän hakkuun vaikutukset voivat olla todella suuria, sillä teollisen kokoluokan voimalat tarvitsevat suuria pinta-aloja käyttöönsä. Maa-asenteista aurinkovoimalaa suunniteltaessa päästöjen kannalta tärkeää olisi valita alue, joka vaatii vähän hakkuita sekä aurinkopaneeli, jolla on pieni hiilijalanjälki verrattuna muihin paneeleihin. Yksittäisien paneelien väliset hiilijalanjälki erot eivät ole suuria, mutta teollisen kokoluokan voimaloihin käytetään tuhansia aurinkopaneeleita, jolloin erot kasvavat suuriksi. Telineitä ja perustuksia valittaessa paras vaihtoehto olisi suosia kotimaisia vaihtoehtoja, ja asennuksissa suositeltavaa olisi käyttää paikallisia toimijoita. Voimala-alueella olisi kannattavaa olla myös tiestöä valmiiksi, jotta teitä alueelle ei tarvitsisi alkaa tekemään. Alueen tulisi myös mahdollisuuksien mukaan olla lähellä sähköverkkoa, johon voimala olisi tarkoitus liittää.

Kun verrataan voimalan päästöjä tuotettuun energiaan, on tärkeää, että aurinkovoimala on mahdollisimman kauan toiminnassa ja tuottaa mahdollisimman hyvällä teholla energiaa koko elinkaarensa ajan. Kunnossapito ja huolto voimalalle on vähäistä, mutta sillä on suuri vaikutus, kun voimalan käyttöikä voidaan pidentää oikeaoppisella kunnossapidolla.

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä käsiteltiin maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaaren aikaisia päästöjä vertailemalla kahta eri skenaariota aurinkovoimalalle. Vertailun tuloksena pystyttiin vertailemaan, kuinka eri materiaalit ja työvaiheet vaikuttavat voimalan hiilijalanjälkeen.

Aurinkovoimalan elinkaari jaettiin rakennushankkeen mukaiseen elinkaarimaliin, jossa on neljä eri vaihetta: tuotevaihe, rakennusvaihe, käyttövaihe sekä purkuvaihe. Tuotevaihe sisältää materiaalien valmistuksen raaka-aineiden hankinnasta valmiiseen tuotteeseen. Aurinkopaneelin valmistuksen päästöt kattavat 52–57 % koko voimalan päästöistä. Aurinkopaneelin valmistukseen kuluu paljon energiaa, sillä puolijohdeena käytettävän piin tulee 99,99 %:sen puhdasta ja sen

erottelu kvartsista vaatii suuria lämpötiloja. Tuotevaihe kokonaisuudessaan kattaa eri skenaariosta riippuen jopa 69–77 % koko elinkaaren aikaisista päästöistä.

Rakennusvaiheen päästöt ovat tarkastelussa melko pieniä koko elinkaaren aikaisiin päästöihin nähden. Voimalan päästöistä vain 4–5 % syntyy rakennusvaiheessa. Käyttövaiheen päästöihin suurin vaikuttava tekijä on metsän hiilinielun menetys, jos rakennusvaiheessa on kaadettu metsää voimalan tieltä. Käyttövaiheen päästöt muodostavat 11–20 % kokonaispäästöistä. Purkuvaiheen päästöt kattavat 5–7 % voimalan elinkaaren aikaisista päästöistä.

Lopuksi insinööriyössä käsiteltiin aurinkovoimalan hiilijalanjälkeä tuotettuun kilowattituntiin nähden. Voimalan sähkönpäästökertoimeksi tarkastelussa saatiin 19–41 g CO₂-ekv/kWh. Aurinkovoimalalla tuotetun sähkön hiilijalanjälkeen vaikuttavia tekijöitä on aurinkopaneelien päästöt, mahdollisten hiilinielumenetyksien päästöt sekä voimalan tuotantoteho. Koko elinkaaren aikaiseen tuotantotehoon vaikuttaa suuresti voimalan elinkaari pituus. 35 vuotta tuotannossa oleva voimala tuottaa lähes saman verran päästöjä kuin 25 vuotta tuotannossa oleva voimala, mutta tuottaa sähköä 10 vuotta kauemmin.

Maa-asenteisen aurinkovoimalan elinkaariarvioinnin teko on todella työläs ja mutkikas prosessi. Täydellisen elinkaariarvion teko on todella vaikeaa, sillä siinä täytyy selvittää jokaisen käytettävän materiaalin tarkat päästöt ja huomioida koko elinkaaren aikaiset päästöt. Tulevaisuudessa varmasti vastuullisuus ja materiaalien hiilijalanjälki nousee kattavammin esiin ja tuotteiden hiilijalanjälki on helpommin selvitettävissä. Tulevaisuudessa LCA-arviointia tulisi myös standardoida enemmän, mikä mahdollistaisi tarkempia ja vertailukelpoisempia tuloksia eri tuotteiden ja prosessien välille.

Aurinkovoima tulee melko varmasti olemaan tulevaisuudessa suuremmassa roolissa sähköntuotannossa ja sillä korvataan fossiilisia energiantuotannon menetelmiä. Aurinkopaneelien tekniikkaa ja hyötysuhdetta yritetään parantaa

jatkuvasti, mikä mahdollistaa tulevaisuudessa vielä ympäristöystävällisemmän sähköntuotannon.

Lähteet

- 1 Tarinamme. Verkkoaineisto. Oomi Oy. <<https://oomi.fi/oomi/tarinamme/>>. Luettu 18.10.2023.
- 2 Yrityksille. Verkkoaineisto. Oomi Oy. <<https://oomi.fi/yritykset/>>. Luettu 18.10.2023.
- 3 Aurinkovoimalat - maavoimala. Verkkoaineisto. Oomi Oy. <<https://oomi.fi/yritykset/aurinkovoimalat/aurinkovoimalat-maavoimala/>>. Luettu 18.10.2023.
- 4 Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaariklinikkatoimintamallista pk-yrityksille. 2017. PDF-tiedosto. Suomen ympäristökeskus. Luettu 21.10.2023.
- 5 Kosonen, Antti ja Breyer, Christian. 2019. Päivitetty. 2023. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Verkkoaineisto. <<https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa>>. Luettu 27.10.2023.
- 6 Herva, Kalle. 2023. Suunnittelupäällikkö. Oomi Oy. Haastattelu 26.10.23.
- 7 Mitä lyhenteet kWp ja Wp tarkoittavat. Verkkoaineisto. Turku Energia. <<https://www.turkuenergia.fi/ukk/mita-lyhenteet-kwp-ja-wp-tarcoittavat>>. Luettu 2.11.2023.
- 8 Kaurala, Milja. 2023. Aurinkovoimaloiden hankekehityksen prosessikuvaus. Opinnäytetyö. Oulun Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 9 Invertteri. 2023. Verkkoaineisto. Aurinkovirta. <<https://aurinkovirta.fi/aurinkosahko/aurinkovoimala/invertteri/>>. Luettu 21.10.2023.
- 10 Energiantuotanto Pohjanmaalla ja Etelä-Pohjanmaalla 2050. 2021. Verkkoaineisto. Ramboll Finland Oy. <<https://epliiitto.fi/wp-content/uploads/2021/06/Energiantuotanto-Pohjanmaalla-ja-Etela-Pohjanmaalla-2050-selvitys-saavutettava.pdf>>. Luettu 3.10.2023.
- 11 Aurinkovoimalla elinvoimaa. Verkkoaineisto. OX2. <https://www.ox2.com/files/Finland_materials/OX2_Aurinkovoimaa_esite_FI.pdf>. Luettu 3.10.2023.
- 12 Totta vai tarua – 10 väitettä aurinkopaneeleista. 2021. Verkkoaineisto. Leppäkoski Group. <<https://leppakoski.fi/totta-vai-tarua-10-vaitetta-aurinkopaneeleista/>>. Luettu 10.10.2023.

- 13 Lehmuskoski, Antti. 2020. Aurinkovoimala ei ole huoltovapaa. Verkkoaineisto. Solnet Group. < <https://www.solnet.group/fi/blogi/aurinkovoimala-ei-ole-huoltovapaa>>. Luettu. 5.10.2023.
- 14 Infrarakentamisen päästötietokanta. Verkkoaineisto. SYKE. < <https://www.co2data.fi/infra/>>. Luettu. 15.11.2023.
- 15 Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. 2017. Verkkoaineisto. Bionova Oy. < https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf/1f3642e1-5d58-8265-40c1-337deeab782d/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf?t=1603260760602>. Luettu 3.11.2023.
- 16 Hakala, Otto. 2021. Aurinkopaneelin ja – paneelituotannon hiilijalanjälki. Opinnäytetyö. Turun Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 17 Rantaruoko, Taru. 2022. Aurinkopaneelien kierrättämisen mahdollisuudet Suomessa. Opinnäytetyö. Hämeen Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta
- 18 Aurinkovoimala. 2023. Yrityksen sisäinen lähde. Oomi Oy.
- 19 Aurinko mikroinvertteri, merkkijono-invertteri ja keskusinvertteri. 2020. Verkkoaineisto. DS New Energy. < <https://fi.dsnsolar.com/info/micro-inverter-string-inverter-and-central-in-44718963.html>>. Luettu 20.10.2023.
- 20 Mitä invertteri tekee? Verkkoaineisto. Lumme Energia. < <https://www.lumme-energia.fi/blogi/mita-invertteri-tekee>>. Luettu 20.10.2023.
- 21 Päästötietokanta. Verkkoaineisto. OpenCO2.net. < <https://www.openco2.net/fi/hae-paastokertoimia?sortBy=updatedYear&sortOrder=desc&page=1>>.
- 22 Hyvin hoidettu metsä on ilmastoteko. Verkkoaineisto. Stora Enso. < <https://www.storaensometsa.fi/hyvin-hoidettu-metsa-on-ilmastoteko/>>. Luettu 20.10.2023.
- 23 Pukkala, Timo. 2017. Hakkuut ja hiilinielut – ajattelua ja toiveajattelua. Verkkoaineisto. Metsäpalvelu Arvometsä Oy. < <https://arvometsa.fi/hakkuut-ja-hiilinielut-ajattelua-ja-toiveajattelua/>>. Luettu 21.10.2023.

- 24 CO₂-päästökertoimet. Verkkoaineisto. Motiva. < https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet>. Luettu 10.10.2023.
- 25 Koutonen, Matti. 2023. Ulvilan aurinkoenergian tuotantoalueen hiilitaselaskelma. Verkkoaineisto. Sitowise Oy. < <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Liite%203%20Hiilitasera-portti%2C%20IBV%20Suomi%20Oy%2C%20Ulvilan%20aurinkoenergiahanke%2C%20YVA-ohjelma.pdf>>. Luettu 5.11.2023.