



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

SOFIA SAVOLAINEN

Tuulivoimapuiston infratöiden hiili- jalanjälki

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OH-
JELMA
2023

TIIVISTELMÄ

Savolainen, Sofia: Tuulivoimapuiston infratöiden hiilijalanjälki
Opinnäytetyö, AMK
Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2023
Sivumäärä: 40

Tuulivoima on lisääntynyt Suomessa ja muissa Pohjoismaissa huomattavasti viimevuosien aikana. Kasvavaan suosioon on vaikuttanut pyrkimys uusiutuvan energia lisäämiseen ja sitä kautta energiaomavaraisuuteen sekä kasvihuonepäästöjen vähentämiseen. Tuulivoimalan käyttöikä vaihtelee 25–30 vuoden välillä ja on tärkeää, että tuulivoimalla pystytään kattamaan myös tuulipuiston rakentamisen aikana syntyvä hiilijalanjälki.

Opinnäytetyössä luotiin laskentapohja tuulivoimapuiston infratöiden hiilijalanjäljen laskemiseksi. Laskentapohja toteutettiin ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ja hiilijalanjäljen laskentaan liittyvien standardien mukaisesti. Täysimääräisesti ympäristöministeriön ohjeita ei kuitenkaan voitu soveltaa infrarakentamiseen. Työn pohjaksi luotiin Excel-laskentapohja, joka antaa työkalun kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen myös tulevaisuudessa. Laskenta suoritettiin case tuulivoimapuistolle, jonka infratyöt koostuvat gravitaatio-, paalu-, ja kallioankkuriperustustöistä sekä tiestön rakentamisesta ja kaapeloinnista. Opinnäytetyö toteutettiin kehittämällä yrityksen vanhaa Excel-pohjaa uutta tarvetta vastaavaksi. Työn alussa tutustuttiin case tuulivoimapuiston toimintaan ja siitä aiheutuviin kasvihuonekaasupäästöihin. Toiminnasta aiheutuvista päästöistä kerättiin dataa mahdollisimman kattavasti. Päästökertoimet kerättiin erilaisista saatavilla olevista tietokannoista.

Tuloksena saatiin luotua yritykselle laskentapohja tuulipuiston suurimpien kasvihuonekaasupäästölähteiden tarkkailuun. Case tuulivoimapuiston osalta todettiin koko puiston infratöiden hiilijalanjäljen kattavan 1526 keskivertosuomalaisen vuosittaisen hiilijalanjäljen. Perustustöiden osalta suurimpana ympäristökuormittajana on betonointi. Betonointi kattaa yli 70 % päästöistä gravitaatio ja paaluperustuksen kohdalla ja loput noin 30 % päästöistä jakautuu muiden perustustöiden välille. Perustustyypeistä paaluperustuksella on tulosten perusteella suurin hiilijalanjälki, johon suurimpana vaikuttajana on paaluista aiheutuvat päästöt. Kallioankkuriperustuksessa hiilijalanjälki on pienin. Kallioankkuriperustuksessa kuitenkin hyödynnetään paljon enemmän suuripäästöistä juotosbetonia, joka nostaa perustustyyppin hiilijalanjälkeä. Laskennasta saatu hiilijalanjälki kerätyn datan ja päästökertoimien perusteella on suuntaa antava. Hiilijalanjälkilaskenta on suuri töinen, joka vaatii paljon erilaista dataa, rajoja ja aikaa.

Avainsanat: hiilijalanjälki, kasvihuonekaasupäästöt, elinkaariarviointi

ABSTRACT

Savolainen, Sofia: Carbon footprint of wind farm infrastructure works
Bachelor's thesis
Energy- and environment degree program
April 2023
Number of pages: 40

Wind power has increased significantly in Finland and other Nordic countries in recent years. The growing popularity has been influenced by the effort to increase renewable energy and thus energy self-sufficiency, as well as to reduce greenhouse emissions. The lifespan of a wind turbine varies between 25-30 years, so it is important that wind power can also cover the carbon footprint created during the construction of the wind farm.

In the thesis, a calculation base was created to calculate the carbon footprint of the infrastructure works of the wind farm. The calculation base was implemented in accordance with the Ministry of the Environment's low-carbon building assessment method and the standards related to the calculation of the carbon footprint. However, the instructions of the Ministry of the Environment could not be fully applied to infrastructure construction. An Excel calculation base was created as the basis of the work, which provides a tool for calculating greenhouse gas emissions in the future as well. The calculation performed for a case wind farm, whose carbon footprint consists of gravity, pile, and rock anchor foundation works, as well as emissions from roads and cabling. The thesis was implemented by developing the company's old Excel base to meet new needs. At the beginning of the work, we got to know the operation of the case wind farm and the resulting greenhouse gas emissions. Data on emissions caused by operations were collected as comprehensively as possible. The emission factors were collected from various available databases.

As a result, a calculation base was created for the company, for monitoring the wind farm's largest greenhouse gas emission sources. Regarding the Case wind farm, it was found that the carbon footprint of the entire park's infrastructure covers the annual carbon footprint of 1526 average Finns. As far as foundation work is concerned, concreting is the biggest burden on the environment. Concreting covers more than 70 % of emissions for gravity and pile foundations, and the remaining approximately 30 % of emissions are distributed between other foundation works. Based on the results, the pile foundation has the largest carbon footprint of the foundation types, the biggest contributor to which is the emissions from the piles. Rock anchor foundations have the smallest carbon footprint. In the rock anchor foundation, however, much more high-emission brazed concrete is used, which increases the carbon footprint of the foundation type. Based on the collected data and emission coefficients, the result is indicative. Calculating the carbon footprint is a lot of work that requires a lot of different data, limitations, and time.

Keywords: carbon footprint, greenhouse gas emissions, lifecycle assessment

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 MENETELMÄLLINEN TOTEUTUS	7
3 HIILIJALANJÄLKI.....	8
3.1 Hiilijalanjäljen laskenta	9
3.2 Hiilikädenjälki.....	11
4 TUULIVOIMAPUISTON PERUSTUSTYYPIT	12
4.1 Gravitaatioperustus	12
4.2 Kallioankkuriperustus	13
4.3 Paaluperustus	14
5 CASE TUULIVOIMAPUISTON HIILIJALANJÄLKI	15
5.1 Laskentataulukon luonti Excelillä.....	16
5.2 Maanrakennus.....	18
5.3 Tiestön rakentaminen	20
5.4 Paalutus	21
5.5 Pulttikehä.....	22
5.6 Raudoitus	24
5.7 Betonointi	24
5.8 Kallioankkurityöt	27
5.9 Kaapelointi.....	29
6 TULOKSET	30
6.1 Työmaan infratöiden kokonaishiilijalanjälki.....	33
7 YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET.....	37
LIITELUETTELO	40

KÄSITE- JA LYHENNELUETTELO

Käsite	Merkitys
Hiilijalanjälki	Tuotteen tai toiminnan elinkaaren aikana syntyvien kasvihuonekaasujen summa.
Hiilidioksidiekvivalentti	Kuvaa eri kasvihuonekaasupäästöjen yhteenlaskettua ilmastoa lämmittävää vaikutusta.
Kasvihuonekaasu	Kasvihuonekaasut sitovat itseensä maapallolta vapautuvaa lämpöenergiaa, aiheuttaen ilmakehän lämpenemisen.
Gravitaatioperustus	Maanvarainen perustustyyppi, joka rakennetaan maa-aineksen päälle.
RAF	Kallioankkuriperustus (Rock anchor foundation). Perustus kiinnitetään kallioon.
Paaluperustus	Perustuksen paino kohdistetaan paalujen avulla kallioon.

Lyhenne	Merkitys
GWP	Kuvaa mitattavan kaasun (kg) aiheuttamaa lämpövaikutusta (W/m^2) verrattuna hiilidioksidiin.
EPD	Ympäristöseloste (Environmental Product Declaration)
CO ₂	Hiilidioksidi
CO ₂ e	Hiilidioksidiekvivalentti
kgCO ₂ e/m ³	Hiilidioksidiekvivalenttikiloa kuutiolla
kg/tkm	Kilogrammaa tuhatta kilometriä kohti

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on aikamme isoimpia haasteita. Ilmiön laajuus ja monimutkaisuus tekevät kokonaisuudesta vaikeasti hallittavan. Torjuaksemme ilmastonmuutosta vaaditaan ihmiskunnalta yhteisiä toimia riippumatta maantieteellisestä sijainnista, valtakunnan rajoista tai ideologiasta. Torjuntatoimet vaativat tiedon jakamista ja yhdenmukaistamista ympäri maailmaa. Kansainvälinen Pariisin ilmastopöytäkirja edellyttää jokaiselta valtiolta ilmastonmuutoksen vastaisia toimia ja päästölaskelmia. (Ympäristöministeriö, n.d.-a) Tavoitteiden saavuttamiseksi vaaditaan toimenpiteitä globaalilla, yhteiskunnallisella, henkilökohtaisella ja yritystasolla. Suomi on myös sitoutunut Pariisin ilmastopöytäkirjaan. (Häkkinen & Kuittinen, 2020, s. 41)

Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö, n.d.-b) Tavoitteeseen pääseminen tarkoittaa yhteiskunnallisia toimia, jossa yrityksillä on oma vastuunsa. Asiakkaat ovat kasvavassa määrin kiinnostuneita yritysten ympäristöarvoista, ja jo tarjousvaiheessa kiinnostus ekologisuuteen luo hiilijalanjäljen laskemiselle todellisen tarpeen. Opin-
näytetyössä luodaan hiilijalanjäljen laskenta case tuulivoimapuiston ympärille. Työssä hyödynnettävässä case tuulivoimapuistossa pääurakoitsijana toimii infratöiden osalta Suvic Oy, jolle myös hiilijalanjälkilaskenta toteutetaan. Hiilijalanjälkilaskennassa on otettu huomioon ennalta tilaajan kanssa sovitut merkittävimmät päästölähteet tuulivoimapuiston infratöiden osalta, joilla ajatellaan olevan suurin vaikutus lopputulokseen. Laskentaan otetut infratyöt koostuvat perustus-, tienrakennus-, ja kaapelointitöistä.

2 MENETELMÄLLINEN TOTEUTUS

Tutkimuksen kohteena on selvitetty tuulivoimapuiston infrarakentamisen hiilijalanjälki koko case tuulivoimapuistotyömaan infrarakentaminen huomioiden ja lisäksi on laskettu hiilijalanjälki kolmelle yksittäiselle perustustyypille. Laskenta toteutettiin, ensin rajaamalla hiilijalanjäljen laskennassa tarkasteltavat työvaiheet ja hankkimalla tarvittavat laskentatiedot yrityksen dokumentaatiosta ja julkisesti saatavilla olevista tietokannoista. Päästökertoimet hiilijalanjälkilaskentaan on otettu rakennusmateriaalien valmistajien laatimista ympäristötuetelosteista tai infrarakentamisen päästötietokannasta. Päästötietokantaan on kerätty Suomessa käytössä olevien materiaalien, tuotteiden, kuljetusten ja työmaatoimintojen keskimääräisiä päästötietoja (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2022.)

Koostetut laskentatiedot yhdistettiin päästötietoihin, jotta saatiin tuloksena laskettua infratöistä aiheutuva hiilijalanjälki tuulipuistolle ja kolmelle eri perustusratkaisulle. Aineistona opinnäytetyössä hyödynnettiin eri kirjallisuus ja tietolähteitä, sekä hiilijalanjäljen laskentaa koskevia standardeja. Hiilijalanjäljenlaskennassa hyödynnettiin myös työmaatoimintaympäristöä tarkkailemalla ja havainnoimalla, sekä hyödyntämällä työmaa-alueen suunnitelmia ja asiakirjoja. Hiilijalanjäljenlaskennan pohjana käytettiin yrityksen aikaisempaa hiilijalanjälkilaskennan standardeihin perustuvaa Excel-pohjaa, jota kehitettiin eteenpäin. Hiilijalanjäljenlaskennassa hyödynnettiin myös ympäristöministeriön vuonna 2019 tekemää rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä julkaisua. Hiilijalanjäljenlaskennan kokonaiskasvihuonekaasupäästöt saadaan selville summaamalla yhteen eri työvaiheiden kasvihuonekaasupäästöt ja ilmoitetaan tulos hiilidioksidiekvivalenttina.

3 HIILIJALANJÄLKI

Kasvihuoneilmiö on elinehtomme, ilman ilmiötä lämpö, jota auringosta saamme, karkaisi avaruuteen ja maapallon lämpötila olisi yli 30 astetta matalampi. Kasvihuoneilmiössä ilmakehässämme olevat kaasut nappaavat maan pinnalta heijastuvaa auringon lämpösäteilyä. Maapallolle saapuu auringon säteilytehoa keskimäärin noin 340 wattia neliometriä kohti, tästä takaisin avaruuteen palautuu noin 30 %. Säteilystä loput 70 % imeytyvät pääasiassa maahan ja merien pintakerrokseen. Osa mikä ei imeydy maahan ja meriin sitoutuu ilmakehään ja muuttuu lämmöksi. (Ilmatieteenlaitos, n.d)

Ihmisen toiminnan seurauksena ilmakehän koostumus muuttuu, luonnollinen kasvihuoneilmiö voimistuu ja sen seurauksena maapallo lämpenee liikaa. Tätä suurimmaksi osaksi ihmisen aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä kutsutaan ilmastonmuutokseksi. (Ilmatieteenlaitos, n.d) Ilmastonmuutoksen seurauksena aiheutuu äärimäisiä sääolosuhteita, kuten voimakkaita sateita, tulvia, maanvyöryjä, kuivuutta ja merenpinnan nousua. Vuonna 2015 solmitussa Pariisin sopimuksessa on asetettu tavoitteet ilmastonlämpenemisen pysäyttämiseksi vähintään kahteen ja mielellään puoleentoista celsiusasteeseen. Tähän tavoitteeseen kuuluu hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. (Suomen YK-liitto, n.d) Ympäristöasioiden tärkeyden kasvaessa ja taistelussa ilmastonmuutosta vastaan hiilijalanjäljen huomiointi on eräänlainen mittari, jonka avulla pystymme selvittämään kuinka paljon yksilö, tuote tai tekeminen aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä. Tulosten avulla pystymme kehittämään uusia innovaatioita ja ottamaan askeleen kohti ilmastovastuullista toimintaa. (YK-liitto, n.d)

Hiilijalanjäljestä rakentamisessa puhuttaessa tarkoitetaan kielteisiä ilmastovaiikutuksia, jotka syntyvät hankkeen seurauksena (Kuittinen & Hakaste, 2020.) Rakentamisen elinkaarivaikutusten ja vähähiilisyyden suurempi huomioiminen näkyy Maankäyttö- ja rakennuslain kokonaisuudistuksessa, jonka mukaan rakennuslupavaiheessa on esitettävä rakennuksen koko elinkaaren aikainen hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen ilmaiseva ilmastaselvitys. Ilmastaselvityksen on katettava asetetut raja-arvot. Selvitys on tarkoitus tehdä kaikille hankkeille,

joille haetaan energiatodistusta eli suoraan lakiuudistuksella ei ole yhteyttä tuulipuiston rakentamisesta aiheutuviin päästöihin. Hiilijalanjäljen laskenta kuitenkin kannustaa kehittämään rakennustuotteita, -palveluita ja -menetelmiä, jotka mahdollistavat nykyistä pienemmät elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt sekä kehittämään vähähiilistä rakentamista tukevia suunnitteluratkaisuja, joilla on vaikutusta yrityksen kilpailukykyyn. (Lehto, 2022)

Hiilijalanjälki ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenteina (CO_2e), joka kuvaa kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua ilmastoa lämmittävää vaikutusta. Merkittäviä kasvihuonepäästöjä ovat hiilidioksidipäästöt (CO_2), metaani (CH_4), otsoni, ilokaasu eli dityppioksidi (N_2O), HFC-yhdisteet, PFC-yhdisteet, rikkiheksafluoridi (SF_6) ja typpifluoridi (NF_3) (Sjöstedt, 2018). Kasvihuonekaasujen haitallisuutta arvioidaan kaasujen elinajalla ja ominaislämmityspotentiaalilla. Kasvihuonekaasut voivat vaikuttaa suorasti tai epäsuorasti kasvihuoneilmiöön. Epäsuora vaikutus voi tapahtua esimerkiksi otsonimuodostuksen kautta. (Tilastokeskus, Käsitteet, 2022a) Kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutuksia vertaillessa hyödynnetään GWP-kertoimia. (global warming potential) GWP- kerroin kuvaa mittattavan kaasun aiheuttamaa lämpövaikutusta (W/m^2) verrattuna hiilidioksidin massayksikköä kohti tarkasteltavan aikavälin aikana. Esimerkiksi 100 vuoden tarkastelujaksolla hiilidioksidin GWP- kerroin on 1 kun metaanin kerroin on 28. Metaani lämmittää siis ilmastoa 28 kertaa hiilidioksidia voimakkaammin sadan vuoden tarkastelujaksolla. (Tilastokeskus, 2015) Kertoimet esitetään ilmastopöytäkirjan IPCC:n viidennessä arviointiraportin ohjeessa, johon siirryttiin toukokuussa 2022. (Tilastokeskus, 2022b)

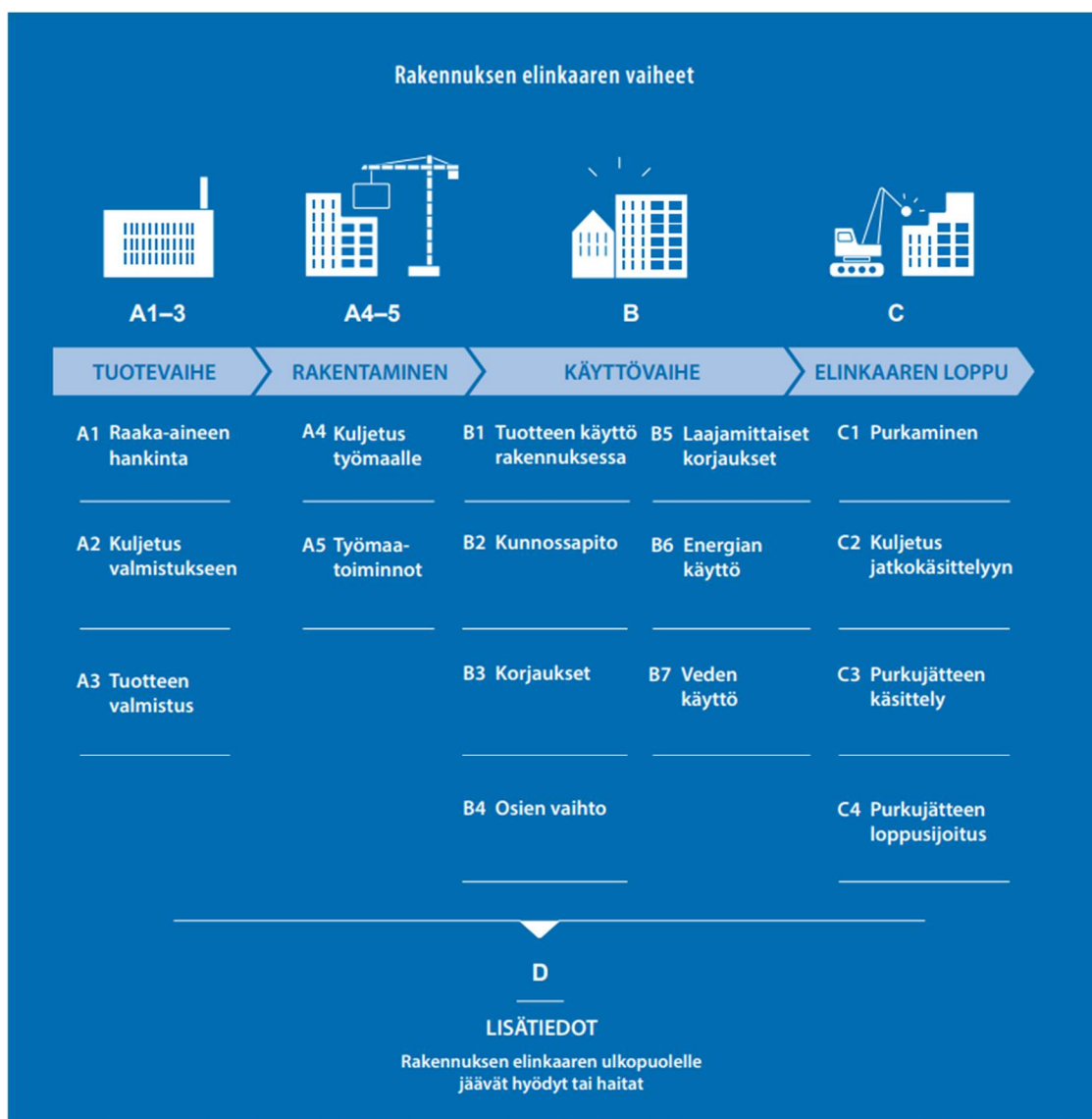
3.1 Hiilijalanjäljen laskenta

Hiilijalanjäljen laskennalla pyritään selvittämään elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä jo suunnitteluvaiheessa. Laskennassa on kiinnitettävä huomiota useaan tekijään, joilla varmistetaan tuloksen luotettavuus. Huomioitavia asioita ovat tavoite, rajausta, lähtötiedot ja laskennan toteutus. Laskennan yhdenmukaistamiseksi on luotu standardeja, jotka kaikki perustuvat elinkaariarvioinnin standardeihin ISO 14040 ja ISO 14044. Opinnäytetyössä tehtävässä

laskennassa on käytetty ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ohjeita, jonka pohjana ovat eurooppalaiset kestävästä rakentamisesta edistävät standardit (mm. EN 15643 –sarja, EN 15978 ja EN 15804.) Arviointimenetelmää ei kuitenkaan suoraan voi soveltaa infrahankkeiden arviointiin, joka luo laskentaan mahdollisen epätarkkuuden. (Ympäristöministeriö, 2019)

Laskennan alussa määritetään tavoite sen mukaan mihin laskentatuloksia halutaan käyttää. Laskennan tavoite vaikuttaa laskentarajauksen asettamiseen. (Siitonen, 2022) Hiilijalanjälkeä laskettaessa yritys voi rajata merkittävimmät päästölähteensä, kuitenkin laskennan ulkopuolelle jäävät asiat pitää olla perusteltuja (SFS-EN 15978:en, 2012.) Laskenta voidaan kohdistaa koskemaan koko rakennelman elinkaarta tai jotain osa-aluetta. Tavoitteen ja rajausten asettamisessa määritetään laskennan laajuus. Elinkaaren vaiheet on määritetty EN 15643 standardissa. (SFS-EN 15643:2021)

Elinkaaren laskennan osa-alueet koostuvat vaiheista A-C. A sisältää rakennustuotteen valmiiksi saamisen käyttöä varten, B kuvaa rakennustuotteiden käytön aikana syntyvää hiilijalanjälkeä ja C hiilijalanjälkeä elinkaaren loppuvaiheessa, koskien purkamista ja materiaalien kierrättämistä ja loppusijoittamista. (SFS-EN 15643:2021) Elinkaaren laskennan vaiheet on esitetty kuvassa 1. Työssä käytettävälle case tuulivoimapuistolle lasketaan hiilijalanjälki vaiheiden A1-5 osalta.



Kuva 1. Elinkaaren vaiheet. (Ympäristöministeriö 2019)

3.2 Hiilikädenjälki

Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan positiivisia ilmastohyötyjen summaa, joita voidaan saavuttaa rakennuksen elinkaaren aikana ja joita ei synny ilman rakennushanketta (Ympäristöministeriö, 2019, s. 30.) Hiilikädenjäljen laskentaan kuuluvat materiaali- ja energiatehokkuus. Hiilikädenjäljen tulos ilmoitetaan erillisenä, eikä sitä vähennetä suoraan hiilijalanjäljestä. Hiilikädenjälki ilmoitetaan negatiivisena kokonaislukuna ja yksikkönä käytetään samaa hiilidioksidiekvivalenttia, kuin hiilijalanjälkilaskennassa. (Ympäristöministeriö, 2019, s. 30)

Toisin kuin hiilijalanjälki, hiilikädenjälki ilmaisee tuotteen tai toiminnan positiivisia ilmastovaikutuksia. Kädenjäljen avulla yritys voi verrata omaa vähäpäästöistä toimintaansa muihin yrityksiin tai omaan perusratkaisuunsa. Pohjimmiltaan hiilikädenjäljen määrittäminen on hiilijalanjälkilaskentaa, sillä jokaista hiilikädenjälkeä kohti on laskettava kaksi hiilijalanjälkeä, joissa toinen hiilikädenjälkiratkaisulle ja toinen vertailukohdalle. Hiilijalanjälki pyritään saamaan mahdollisimman lähelle nollaa, kun taas hiilikädenjälkeä pyritään kasvattamaan mahdollisimman suureksi. (Siitonen, 2022b) Opinnäytetyössä case tuulivoimapuistolle lasketaan vain hiilijalanjälki. Hiilikädenjäljen laskeminen voi kuitenkin olla kehityskohde, jos pystytään vertaamaan kahden eri tyylillä tehdyn puiston hiilijalanjälkiä.

4 TUUIVOIMAPUISTON PERUSTUSTYYPIT

Laskennassa käytetyssä case tuulivoimapuistossa perustustyyppit ovat maanvaraisia- tai kallioankkuriperustuksia. Sopivan perustustyyppin valintaan vaikuttaa maaperän rakenne. Tuulivoimalan perustuksille kohdistuu käytön aikana suurta kuormitusta. Kuormitusta aiheuttavat rakenteiden suuri omapaino ja tuulen aiheuttama vaakakuorma. (Markkanen, 2016) Tuulivoimalan rakenteista aiheutuva kuorma on sama erityyppisten perustusten välillä. Perustusten tehtävä on siirtää rakenteista kohdistuvat kuormat maaperään.

4.1 Gravitaatioperustus

Gravitaatioperustus, joka on esitetty kuvassa 2, on maanvarainen perustustyyppi, joka on taloudellisempi vaihtoehto silloin kun kallion pinta on liian syvällä. Gravitaatioperustus kaivetaan maahan yleisimmin 2–3 metrin syvyyteen ja perustuksen halkaisija vaihtelee 20–30 metrin välillä. (Paalatie, 2019) Maaperän päälle rakennettaessa maaperän kantavuudella on suuri vaikutus perustuksen kokoon. Kantavuuden alittaessa painumarajat, voidaan gravitaatioperustuspohjissa huonosti kantava pohjamaa kaivaa pois ja korvata maa-

aines soralla, murskeella tai louheella. Massanvaihto voidaan toteuttaa, kun kantava maakerros löydetään korkeintaan 5 metrin syvyydestä. Kantavan maakerroksen ollessa syvemmällä on hyvä valita toinen perustamistapa. (Markkanen, 2016)



Kuva 2. Gravitaatioperustus rauditusvaiheessa

4.2 Kallioankkuriperustus

Kallionpinnan ollessa näkyvissä tai lähellä maanpintaa on kallioankkuriperustus sopivin perustusvaihtoehto. Kallioankkuriperustuksessa perustus kiinnitetään ankureiden avulla kallioon. Kallioankkuriperustus on perustustyypeistä kooltaan pienin, jolloin perustukseen käytettävän betonin ja raudituksen materiaalmäärät ovat myös vähäisempiä maanvaraisiin perustuksiin verrattuna. Perustustöissä kallioon louhitaan tila perustukselle ja porataan reiät kallioankkureille. Porattuihin reikiin asennetaan kallioankkurit, jonka jälkeen ankkurit kiinnitetään injektoimalla. Yläosastaan ankkurit kiinnitetään perustukseen, joka on valettu kallioon louhittuun tilaan. (Markkanen, 2016) Kuvassa 3 on kallioankkuriperus rauditusvaiheessa.



Kuva 3. Kallioankkuriperustus raudoitusvaiheessa

4.3 Paaluperustus

Paaluperustus valitaan, kun vaadittavaa maan kantokykyä ei pystytä saavuttamaan massanvaihoilla tai massanvaihto muuttuu taloudellisesti epäkannattavaksi. Paaluperustuksessa kuorma kohdistuu paalujen avulla tiiviiseen maakerrokseen tai kallioon, joka laskee maaperän kantavuuden tärkeyttä. Paalutusta edeltää perustusalueelta orgaanisen pintamaan poistaminen, jonka jälkeen perustusalueelle levitetään ohut murskekerros, jonka päältä paalutustyö tehdään. (Markkanen, 2016) Paalutuksen jälkeen paalujen päät katkaistaan. Halkaisijaltaan paaluperustus voi olla pienempi kuin gravitaatioperustus. Kuvassa 4 on paaluperustus ennen valamista.



Kuva 4. Paaluperustus ennen valua

5 CASE TUULIVOIMAPUISTON HIILIJALANJÄLKI

Tuulipuiston infran rakentaminen koostuu monista työvaiheista. Case tuulivoimapuiston hiilijalanjäljen määrittäminen aloitettiin laskentakohteiden eli päästölähteiden rajaamisella. Laskennassa pyrittiin rajaamaan kohteen isoimmat päästölähteet, jotka vaikuttavat eniten hiilijalanjäljen kokonaispäästöihin. Laskentakohteet rajattiin yhdessä toimeksiantajayrityksen edustajan kanssa, jotta laskenta sisältäisi varmasti isoimmat päästölähteet.

Rajaukset sovittiin koskemaan esimerkki tuulivoimapuiston infratöitä perustustöiden, alueen tiestön ja kaapeloinnin kasvihuonekaasupäästöjen osalta. Laskentaan ei ole otettu mukaan case tuulivoimapuistossa olevaa sähkökenttää ja siihen liittyviä töitä. Tuloksissa on esitetty hiilijalanjälki, joka kattaa materiaaleista, raaka-aineista, kuljetuksesta ja asentamisesta aiheutuvat päästöt. Laskennassa ei ole otettu huomioon työntekijöiden työmatkoja. Kuljetuksesta

aiheutuvat ympäristökuormitukset on rajattu niin, että yksittäisten tavaratoimistusten osalta tyhjänä pois puistosta ajoa ei laskennassa huomioida. Tuulivoimapuiston sisällä tapahtuvan liikenteen, osalta huomioidaan myös tyhjänä ajo. Laskennassa ei ole huomioitu työmaan sisällä satunnaisissa töissä olevia koneita. Työssä on muutamia muita kuljetukseen kohdistuvia rajoituksia, jotka on perusteltu tekstissä.

5.1 Laskentataulukon luonti Excelillä

Opinnäytetyötä varten luotiin laskentataulukko, josta saadaan selville perustuskohtainen hiilijalanjälki, sekä rajoituksissa määritettyjen puiston muiden infratöiden hiilijalanjälki. Työn pohjana käytettiin yrityksen aikaisempaa standardeihin perustuvaa Excel-pohjaa, jota kehitettiin eteenpäin. Pohjassa käytetyt standardit on mainittu edellä.

Alkuperäinen hiilijalanjäljen selvittämiseen luotu laskentapohja, joka on esitetty kuvassa 5, sisälsi laskennan gravitaatioperustusten maatoiden, raudoituksen, pulttikehän ja betonoinnin osalta. Kuvassa 6 on esitetty muokattu taulukko. Päivittämisen ansiosta pohja on soveltuva myös paalu- ja kallioankkuri-perustusten päästölaskentaan, lisäksi uutta pohjaa pystytään hyödyntämään koko alueen infran päästöjen selvittämiseen. Vanhaan pohjaan lisättiin uusia työvaiheita ja niihin sisältyviä hiilijalanjäljen päästölähteitä. Uusia laskentapohjia luotiin kallioankkuroinnin, juotosvalun, paalutuksen ja kaapeloinnin osalta, lisäksi maarakentamiseen yhdistettiin päästölaskenta alueen tiestön hiilijalanjäljen selvittämiseksi.

Laskentapohjan laatimisen tavoitteena oli myös parantaa pohjan helppokäyttöisyyttä myöhempää käyttöä varten. Helppokäyttöisyyden edistämiseksi luotiin jokaista perustustyyppiä kohden oma materiaaliluettelo, josta tietojen on tarkoitus mennä suoraan kaavoihin, sen mukaan mikä perustustyyppi valitaan. Laskennassa hyödynnettävät tiedot kerättiin yrityksen dokumentaatiosta. Päästökertoimet ovat pääsääntöisesti lähtöisin julkisesti saatavilla olevista valmistajan laatimista ympäristötuoteselosteista tai infrarakentamisen päästötietokannasta. Kaapeleille päästökertoimet on saatu kaapelintoimittajan omista laskelmista. Opinnäytetyössä käytettävät kaapelin päästökertoimet on esitetty liitteessä 3 (ei julkinen). Tulostettava asiakaspohja luotiin suomen, englannin ja ruotsin kielellä, myöhempää asiakastytyväisyyttä ajatellen. Asiakaspohja on esitetty liitteessä 2 (ei julkinen). Pohjassa hiilijalanjälki on esitetty jaoteltuna eri työvaiheiden välille. Opinnäytetyössä laskenta on esitetty teoriassa, koska laskenta sisältää tilaajan salassa pidettäviä lähtötietoja ja on salassa pidettävä. Tarkat laskelmat on esitetty liitteessä 1 (ei julkinen).

5.2 Maanrakennus

Maanrakennustöissä ympäristökuormitukset aiheutuvat erilaisista maansiirtokoneista ja kuorma-autoista. Päästön määrään vaikuttavat kaluston ominaisuudet, ajotapa, sekä työvaiheiden ja reittien suunnittelu (Motiva Oy, 2022.) Maanrakentamisessa kaluston lisäksi päästöjä aiheutuu myös kiviaineksesta. Opinnäytetyössä maanrakennustöistä aiheutuvat päästöt on ilmoitettu erikseen perustusten ja tiestön osalta.

Maanrakennustöiden hiilijalanjälki koostuu perustusten osalta kaivuu ja täyttötöistä, sekä maa- ja kiviaineksen siirrosta ja itse maa- ja kiviaineksesta. 25 tonnin kaivinkone tuottaa 40,66 kgCO₂/h päästöjä. (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2022) Hiilijalanjäljen laskemiseksi kaivinkoneen tuottamat päästöt esitetään kuutiota kohden. Laskennasta saadut päästökertoimet, kerrotaan perustuksen tilavuudella. Yläosan täyttötöissä hyödynnettävässä tilavuudessa huomioidaan vähentävänä tekijänä betonin määrä. Laskentapohjassa käytetyt perustuksen mitat on otettu case tuulivoimapuiston

perustuskohtaisista suunnitelmista, jotka on esitetty liitteessä 7 (ei julkinen). Kaivuun ja täyttötöihin hyödynnettävän kaivinkoneen aiheuttamat, kasvihuonekaasupäästöt lasketaan kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = \left(\frac{h * \text{GWP}}{V} \right) * V, \quad (1)$$

jossa

kgCO_2e = kaivinkoneen käytöstä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt

h = työhön keskimäärin kulutettu aika

GWP = kaivinkoneen keskimäärin tunnissa tuottamat päästöt (kg/h)

V = Perustuksen tilavuus, työvarat ja kaivannon luiskaukset

Maa- ja kiviaineksesta, sekä niiden kuljettamisesta aiheutuva työ- ja materiaali määrä ja sitä kautta myös kasvihuonekaasupäästöt vaihtelevat paljon, eri perustustyyppien ja perustusten välillä. Gravitaatio ja paaluperustus ovat kooltaan suurempia verrattuna kallioankkuriperustukseen, joka vaikuttaa nostavasti päästöihin. Kallioankkuriperustuksessa kiviaineksen määrää vähentää perustus pohjan alaosan täyttötöiden puuttuminen.

Maa- ja kiviainesten kuljettamisesta aiheutuvat päästöt on laskettu kaavan (2) avulla. Kolmeakselisen maansiirtoauton lavalle mahtuu noin 11–12 m^3 maa-ainesta kerralla mikä vastaa noin 19 tonnia maa-ainesta (Kiviasema, 2022.) Edestakainen ajomatka perustukselle ja takaisin on keskimäärin noin 6 km. Maansiirtoauto tuottaa 0,761 $\text{kgCO}_2\text{e/km}$ päästöjä (VTT Lipasto, 2017.) Kai- vetusta maa-aineksesta noin 30 % kuljetetaan pois perustusalueelta. Maasta suurin osa kerätään perustuksen ympärillä olevaan maastoon, ja hyödynnetään myöhemmin maisemointiin ja perustuksen täyttöön. Pois kuljetettavan maan määrä vaihtelee 190 m^3 -600 m^3 välillä. Hiilijalanjälkilaskennan perusteella saadaan tulos, jonka mukaan maa- ja kiviaineksen kuljettamisesta aiheutuvat päästöt perustustöiden osalta kattavat noin 2 % perustuksen maanrakennustöiden hiilijalanjäljestä.

$$\text{kgCO}_2\text{e} = \left(\left(\frac{m_1}{m_2} \right) * s \right) * \text{GWP}, \quad (2)$$

jossa

m_1 = Siirrettävän maan- tai kiviaineksen määrä, (m^3)

m_2 = Maansiirtoauton lavalle mahtuva määrä, (m^3)

s = kuljettu edestakainen matka, (km)

GWP = maansiirtoauton tuottamat päästöt kilometriä kohden, ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{km}$)

Kiviaineksesta itsestään syntyvät päästöt ovat perustuksen maanrakennustöistä noin 28–40 %, perustustyyppin mukaan. Kiviaineksen päästökerroin saadaan oikeaan yksikköön kaavan (3) avulla, jossa kerrotaan murskeen päästökerroin $6 \text{ kgCO}_2/\text{t}$ (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2022.) murskeen tiheydellä ja hukkakertoimella.

$$(6 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{t} * 1,05 * 2,1\text{t}/\text{m}^3) = 13,23 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3 \quad (3)$$

Päästökertoimen laskemisen jälkeen. Kiviaineksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt saadaan kaavalla (4)

$$\text{kgCO}_2\text{e} = (m * \text{GWP}), \quad (4)$$

jossa

m = kiviaineksen määrä (m^3)

GWP = kiviaineksen päästökerroin (kgCO_2e)

5.3 Tiestön rakentaminen

Laskentaan sisältyy myös päästölaskenta tiestön rakentamisen osalta. Puuston poistolle ei lasketa hiilijalanjälkeä, koska se on tehty jo aikaisemmin toisen toimijan puolesta. Laskentaan mukaan otetut työvaiheet ovat maaleikkaus, pengerrys ja tiestön täyttötöyt. Työvaiheiden suorittamiseen käytettävän

kaivinkoneen tuottamat päästöt on laskettu kaavan (1) mukaan. Hiilijalanjälki tiestön maanrakennustöiden osalta on esitetty liitteessä 1 (ei julkinen). Kiviainesten osalta päästöt on laskettu jakava, eristys, väli, ja kantavalle kerrokselle. Kiviaineksen kuljettamisesta aiheutuvat päästöt on laskettu edellä esitetyn kaavan (2) avulla, jonka tuloksista nähdään kuljetuksen kattavan 4 % tiestön teosta aiheutuvista päästöistä. Tiestön tekoon kuluu valtavia määriä mursketta ja murskeesta aiheutuvat päästöt kattavatkin 90 % tiestön teosta aiheutuvista päästöistä. Kiviaineksen hiilijalanjälki on saatu hyödyntämällä edellä esitetyssä kaavassa (3) laskettua kiviaineksen päästökerrointa $13,23 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$, jonka jälkeen murskeesta aiheutuvat kaikkien murskekerrosten kokonaispäästöt saadaan kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = (m_1 * m_2) * \text{GWP}, \quad (5)$$

jossa

m_1 = murskeen määrä, (m^3) jakavassa, eristyskerroksessa ja välikerroksessa

m_2 = murskeen määrä, (m^3) kantavat kerrokset

GWP = laskettu kiviaineksen päästökerroin ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$)

5.4 Paalutus

Paalutuksen avulla on tarkoitus saada perustuksesta tukeva ja liikkumaton. Case tuulivoimapuistossa käytetään teräsbetonilyöntipaaluja, joiden paino on noin 309 kg/m ja joiden pituudet vaihtelevat eri paaluperustusten kohdalla $10\text{--}15 \text{ m}$. Teräsbetonipaalun päästökerroin on $0,174 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$. (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2022) Yhdessä perustuksessa paaluja on yhteensä 100 kappaletta. Paalujen hiilijalanjäljeksi saadaan $53 \text{ t CO}_2\text{e}$. Tulos on saatu kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = (m * l * \text{GWP}) * n, \quad (6)$$

jossa

m = paalun paino metriä kohden (kg/m)

l = paalun kokonaispituus

GWP = teräsbetonipaalun päästökerroin ja hukkakerroin ($\text{CO}_2\text{kg/kg}$)

n = perustuksessa olevien teräsbetonipaalujen määrä

Paalujen toimituksesta aiheutuvaa päästökuormaa ei ole laskennassa otettu huomioon, sillä paalut tulevat toisen urakoitsijan puolesta, joten niiden kuljesta on vaikea selvittää. Toimituksesta aiheutuvien päästöjen voi kuitenkin olettaa olevan vähäinen, sillä paalut voidaan laskea lähimateriaaliksi, samoin kuin betoni. Paalujen asentamisesta aiheutuvat päästöt aiheutuvat pääasiassa paalujen pystyttämiseen käytettävästä paalutuskoneesta. Lyöntipaalutus on menetelmä, jossa paalu upotetaan maahan lyömällä paalua pudotusjärjelleellä, täryttämällä tai painamalla paalu maahan (YIT, 2023.) Paalujen katkaisu taas on nopea työvaihe, eikä työstä ehdi aiheutua valtavia päästöjä, verrattuna kokonaisuuteen. Paalujen asentamisesta aiheutuvat päästöt saatu kaavan (7) avulla ja laskelmat ovat näkyvissä liitteessä 1 (ei julkinen).

$$\text{kgCO}_2\text{e} = (h_1 * GWP_1) + (h_2 * GWP_2), \quad (7)$$

jossa

h_1 = paalujen upottamiseen kuluva aika

GWP_1 = yli 40 t paalutuskoneen CO_2 -päästöt tunnissa

h_2 = paalujen leikkaamiseen kuluva aika

GWP_2 = 14 t kaivinkoneen päästöt tunnissa

5.5 Pulttikehä

Pulttikehä materiaalina tuottaa suuren ympäristökuorman ja sen osuus onkin noin 90 % työvaiheen kokonaispäästöistä. Pulttikehä painaa noin 18 000 kg ja on valmistettu teräksestä. Teräsrakennusten ja infrassa käytettyjen terästen materiaalipäästöt ovat yli 6 % rakennusmateriaalien päästöistä, joista suurin osa syntyy jo valmistusprosessissa (Mölsä, 2021.) Kaavassa (8) esitetty ankkurikehän hiilijalanjäljen laskenta, tuotteen osalta

$$\text{kgCO}_2\text{e} = m * \text{GWP}, \quad (8)$$

jossa

m = materiaalin yhteispaino, (kg)

GWP = päästökerroin ($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)

Kuljetuksen hiilijalanjälkeä laskettaessa on rajattu pois tavarantoimittajan kulkema tyhjänä ajo pois työmaalta, koska sen ei ajatella sisältyvän laskettaviin päästöihin, lisäksi on vaikea tietää rekan kulkemaa tarkkaa paluumatkaa. Laskennasta on rajattu pois myös matkalla oleva lyhyt lauttamatka, jonka vaikutuksen ajatellaan olevan vähäinen lopputuloksen kannalta. Kuljetuksen hiilijalanjälki lasketaan seuraavalla kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = m * s * \text{GWP}, \quad (9)$$

jossa

m = ostettujen tavaroiden tai materiaalien massa, (t)

s = kuljettu matka, yhteen suuntaan, (km)

GWP = ajoneuvotyyppin päästökerroin, ($\text{kgCO}_2\text{e/tkm}$)

Asennusvaiheen päästöt ovat 742 kgCO_2e , riippumatta perustustyypistä. Päästöt syntyvät asennuksessa hyödynnettävästä nosturista, GWP 26,3 CO_2 ekg/h ja asennuksen aikana käynnissä olevasta dieselgeneraattorista, GWP 15,26 $\text{CO}_2\text{kg/h}$ (Suomen ympäristökeskus SYKE, 2022.) Asennusnosturia tarvitaan kuitenkin suhteellisen vähän aikaa, vain noin viisi tuntia. Vähäisen käyttötarpeen vuoksi päästöjä ei tässä työvaiheessa kaluston puolesta suuremmin synny. Tulos asennusvaiheen päästöistä saadaan kertomalla asennusnosturin ja dieselgeneraattorin käyttöaika niiden päästökertoimilla.

5.6 Raudoitus

Raudan ja teräksen valmistus aiheuttaa noin 7 % maailman hiilidioksidipäästöistä (Häkkinen & Kuittinen, 2020, s. 47.) Tuulipuiston perustusten raudoituksessa ympäristökuormitusta aiheutuu materiaalista, asennuksesta, kuljetuksesta ja asennuksen aikana hyödynnettävästä generaattorista, jonka käyttöaste on riippuvainen vuodenajasta. Yhden perustuksen tekoon kuluu noin 30 000–110 000 kg harjaterästä. Case tuulivoimapuiston perustuksiin kuluvat harjateräsmäärät on esitetty liitteessä 7 (ei julkinen). Raudoitusvaiheessa materiaalista koostuvat päästöt ovat merkittäviä, kuitenkin hiilijalanjälkeen on alentavasti pystytty vaikuttamaan materiaalin toimittamisena työmaalle jo valmiiksi oikeaan kokoon leikattuina ja taivutettuina. Tämä helpottaa raudoituksen kasaamista, mutta alentaa myös aiheutuvia päästöjä, sillä kokonaisuuden ollessa, kuin iso palapeli, turhaa hukkaa työmaalla ei synny. Harjateräksistä aiheutuvat päästöt on selvitetty hyödyntämällä kaavaa (8).

Myös raudoituksen asennuksessa hiilijalanjälkeä tuottavat asennusnosturi ja asennuksen aikana hyödynnettävä dieselgeneraattori. Generaattoria hyödynnetään pääasiassa veden poistoon ja raudoittajien avuksi, mutta vuodenajan mukaan myös valaistukseen. Asennuksesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen suuruus on riippuvainen perustustyyppistä ja siihen kuluva raudan määrästä. Kuljetus matka työmaalle on noin 220 km, joten kuljetuksen päästöiksi saadaan, kaavan (9) mukaan vain noin 2 % raudoitusvaiheen päästöistä.

5.7 Betonointi

Maailman hiilipäästöistä noin 7 % aiheutuu betonin ja sementin valmistuksesta (Rinne, 2022, s.2.) Betonoinnin ympäristökuormitukset voidaan jakaa neljään osaan, jotka ovat raaka-aineista johtuvat, valmistuksesta johtuvat, kuljetuksesta johtuvat ja betonoinnista johtuvat. Laskenta on toteutettu neljälle eri kohteessa käytettävälle betonin lujuusluokalle, joita on hyödynnetty case tuulivoimapuistossa. Työssä käytettävät lähtötiedot on saatu case tuulivoimapuiston dokumentaatiosta. Betonoinnissa käytettävät massan yksiköt on ilmaistu kuutiometreinä.

Kestävän kehityksen kannalta betonirakenteiden merkittävämmäksi tekijäksi nousee sementti ja sen CO₂-päästöt. Negatiivisten vaikutusten lisäksi täytyy huomioida betonirakenteiden hyvät ominaisuudet, jotka pienentävät betonirakenteiden hiilijalanjälkeä elinkaaren eri vaiheissa. Positiivisia vaikutuksia ovat pitkä käyttöikä, vähäinen huollon tarve, lähimateriaali ja kierrätettävyys. (Suomen Betoniyhdistys, 2018, s. 144–147) Case tuulivoimapuistossa on käytetty perustusten valamiseen Oiva-sementtiä, jota markkinoidaan ympäristöystävällisempänä sementtinä, sen korkeamman seosainemäärän ansiosta (Finnsementti, 2022.) Betonin muut raaka-aineet tasapainottavat sementin päästöjä. Lähes 90 tilavuus-% betonin raaka-aineista aiheuttaa vähäisiä päästöjä. Vähäisiä päästöjä aiheuttavia aineita ovat betonin runkoaineet, eli kiviainekset ja vesi.

Laskenta on toteutettu betonin raaka-aineiden osalta selvittämällä hiilijalanjälki jokaista lujuusluokkaa kohden. Betonin valmistukseen hyödynnettävien raaka-aineiden määrät on saatu case tuulivoimapuiston betonointisuunnitelmasta ja betoniasemalta kyselemällä, lähtötiedot esitetty liitteissä 5–6 (ei julkinen). Päästökertoimet on otettu raaka-aineiden toimittajan antamista EPD-selosteista. Lopuksi on kerrottu hiilijalanjälki osuudet suunnitelmista saaduilla betonimäärillä. Laskenta on toteutettu kaavalla

$$\text{kgCO}_2 \text{ e} = (m_1 * GWP_1 + m_2 * GWP_2 \dots) * m, \quad (10)$$

jossa

m_1 = x-raaka-aineen määrä tietyssä betonilujuudessa

GWP_1 = x-raaka-aineen päästökerroin

m_2 = z-raaka-aineen määrä tietyssä betonilujuusluokassa

GWP_2 = z-raaka-aineen päästökerroin

m = Suunnitelmista saatu betonin määrä.

Lisäaineiden kuormitukset ovat suuria noin 1 kg-CO₂/kg-lisäaine. Lisäaineiden käyttö tarve on kuitenkin vähäinen, eivätkä päästöt täten pääse kasvamaan lisäaineiden osalta valtavasti. Vaikka lisäaineiden ominaispäästöt ovat

verrattain suuret, on niillä myös positiivisia vaikutuksia hiilijalanjälkeen. Erityisesti notkistavilla aineilla voidaan vaikuttaa betonin päästöihin. Notkistavia aineita lisäämällä betonin tarvitsema vedentarve vähenee, jolloin voidaan vähentää sementin määrää. (Suomen Betoniyhdistys, 2018, s. 146)

Valmisbetonin massan valmistusprosessi kuluttaa varsin vähän energiaa, mutta vastaavasti energiaa kuluu työmaalla riippuen vuodenajasta. Valmisbetonin päästöt ovat tyypillisesti 220... 260 kg (Suomen Betoniyhdistys, 2018, s. 146.) Valmistuksessa ympäristökuormituksia aiheuttaa myös materiaalihukan syntyminen. Hukka kasvattaa suoraan tuotteen hiilijalanjälkeä. Valmistusprosessin osalta hiilijalanjälkeä ei ole laskettu ajan rajallisuuden vuoksi. Betonoinnin osalta hiilijalanjälki on laskettu perustuksen valuun käytettävän dieselkäyttöisen työkoneen mukaan. Laskenta on toteutettu kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = h * \text{GWP} * \left(\frac{m}{m_{\text{kok}}} \right), \quad (11)$$

jossa

h = pumppauksen kesto

GWP = dieselkäyttöisen siirrettävän työkoneen päästökerroin (kg/h)

m = betonin määrä tiettyä lujuusluokkaa kohden

m_{kok} = perustukseen menevän betonin kokonaismäärä

Betonia voidaan pitää lähimateriaalina, sillä betonia kuljetetaan usein vain muutamia kymmeniä kilometrejä, joten kuljetuksen kasvihuonekaasupäästöt jäävät suhteellisen vähäisiksi. (Suomen Betoniyhdistys, 2018, s. 146-147) Kuljetuksista aiheutuvat päästöt on laskettu raaka-aineiden kuljetuksesta betoniasemalle, sekä betonin siirrosta perustukselle. Raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvat päästöt on laskettu kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = s_1 * \text{GWP}_1 * m_1 + s_2 * \text{GWP}_2 * m_2 \dots, \quad (12)$$

jossa

s_1 = matka betoniasemalle, (km)

GWP_1 = raaka-aineen päästökerroin, (kgCO₂e/tkm)

m_1 = raaka-aineen määrä, (kg/m³)

s_2 = matka betoniasemalle, (km)

GWP_2 = raaka-aineen päästökerroin, (kgCO₂e/tkm)

m_2 = raaka-aineen määrä, (kg/m³)

Case tuulivoimapuiston läheisyyteen on perustettu siirrettävä betoniasema, joka vähentää kuljetusmatkaa, valuaikaa ja tätä kautta työstä aiheutuvia päästöjä. Betoniautojen keskimääräinen kuutiotilavuus vaihtelee 12m² – 15m³ välillä, mutta yleisin kuutiotilavuus on 12m³. Betonin kuljettamisesta aiheutuvat päästöt saadaan selville kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = \left(\frac{m_1}{m_2}\right) * s * GWP, \quad (13)$$

jossa

m_1 = betonin määrä lujuusluokkaa kohden, (m³)

m_2 = betoniautoon keskimäärin mahtuvan betonin määrä, (m³)

s = kuljettu edestakainen matka, (km)

GWP = betoniauton päästökerroin kilometriä kohden, (kgCO₂e/km)

5.8 Kallioankkurityöt

Laskettaessa hiilijalanjälkeä kallioankkuriperustukselle päästöjen lähteinä ovat juottamisesta ja ankkureiden asentamisesta aiheuttavat työt. Kallioankkuriperustuksissa hyödynnettävä juotosmassa eroaa perustuksen betonoinnissa hyödynnettävästä massasta siten että juotosmassa on paljon sementtipohjaisempaa.

Kallioankkuriperustuksessa juotosmassaa käytetään kolmeen työvaiheeseen tiivistysinjektointiin, ankkurien kiinnittämiseen ja ankkurikehän ylälevyn kiinnittämiseen perustukseen. Tiivistysinjektoinnissa ja ankkurien kiinnittämisessä käytettävälle vahvalle juotosmassalle ei ole saatavissa päästökertoimia, joten laskennassa on hyödynnetty sementtipohjaisemman Rabbit sementin EPD:stä saatua päästökerrointa, koska juotosmassan tiedetään sisältävän

suurimmaksi osaksi Rabet sementtiä. Rabet sementin päästökerroin on 0,782 kgCO₂e/kg, päästökerroin sisältää hukkakertoimen. (Finnsementti, 2021) Juotosmassan päästökertoimenä ylälevyn juottamisessa on käytetty raaka-aineen toimittajan dokumenteista saatua EPD-arvoa. Tätä arvoa ei kuitenkaan voi hyödyntää muihin juotostöihin massan paljon pienemmän lujuuden ja tätä kautta pienemmän päästökertoimen takia. Kallioankkuritoissa käytettäville massoille on laskettu hiilijalanjälki kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = (m_1 * \text{GWP}_1) + (m_2 * \text{GWP}_1) + (m_3 * \text{GWP}_2), \quad (14)$$

jossa

m_1 = injektointi työssä käytetty juotosmassa, (kg)

GWP_1 = juotos massan päästökerroin,

m_2 = ankkurien juottamiseen kuluva juotosmassa, (kg)

GWP_1 = juotos massan päästökerroin,

m_3 = ylälevyn kiinnittämiseen kuluva juotosmassa, (kg)

GWP_2 = ylälevyn kiinnittämiseen käytettävän juotosmassan päästökerroin,

Juotosmassat eivät ole betonin tapaan ole lähimateriaalia. Kuljetuksen hiilijalanjälkeä laskee kuitenkin se, että massojen raaka-aineet varastoidaan perustuksen läheisyyteen ja valmistetaan suoraan perustuksella. Juotosmassan kuljetuksen päästöt on laskettu kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = (m_1 * \text{GWP}_1 * s_1) + (m_2 * \text{GWP}_1) + (m_3 * \text{GWP}_2), \quad (15)$$

jossa

m_1 = injektointi juotosmassa, (kg)

s_1 = kuljettu matka, (km)

GWP_1 = Puoliperävaunun yhdistelmän päästökerroin

m_2 = ankkurointi juotosmassa, (kg)

s_2 = kuljettu matka, (km)

GWP_2 = Puoliperävaunun yhdistelmän päästökerroin

m_3 = ylälevyn juotosmassa, (kg)

s_3 = kuljettu matka, (km)

GWP_3 = Puoliperävaunun yhdistelmän päästökerroin

Juotostöistä aiheutuvat päästöt ovat 10 % juotosvalun aiheuttamista kokonaispäästöistä. Päästöt aiheutuvat työssä hyödynnettävästä dieselikäyttöisestä työkoneesta. Tarkemmat laskelmat ovat liitteestä 1.

Ankkuroinnista aiheutuvat päästöt ovat noin 17 000 kgCO₂e. Päästöistä 95 % aiheutuu asennettavista jännepunoksista. Jännepunosten päästökerroin 2,32 kgCO₂e/kg on saatu EPD-selosteesta (NEPD-1235-389-EN, 2017.) Loput päästöistä koostuu asentamiseen hyödynnettävästä kallioporavaunusta ja asennusnosturista. Kallioankkuritöiden hiilijalanjälki saadaan kaavalla

$$\text{kgCO}_2\text{e} = h_1 * GWP_1 + h_2 * GWP_2 + (m * n * GWP_3) \quad (16)$$

jossa

h_1 = kallioporavaunun työhön käyttämä aika

GWP_1 = kallioporavaunun tuottamat päästöt (kgCO₂e/h)

h_2 = nosturin punostyöhön käyttämä aika

GWP_2 = nosturin tuottamat päästöt (kgCO₂e/h)

m = jännepunosten yhteispaino

n = jännepunosten porausreikien yhteismäärä

GWP_3 = jännepunosten hiilijalanjälki

5.9 Kaapelointi

Kaapeloinnissa käytetään tuulipuistoihin suunniteltuja keskijännitekaapeleita, joiden avulla voidaan siirtää sähköä lyhyillä ja keskipitkillä etäisyyksillä. Puistossa hyödynnettävät kaapelit ovat kolmi- ja yksijohdinkaapeleita, joiden kokoluokka vaihtelee 150–800 mm² välillä. (Reka kaapeli, 2022) Ympäristökuormaa kaapelit tuottavat suurimmaksi osaksi niiden sisältämän alumiinijohtimen puolesta. Alumiinin valmistukseen kuluu runsaasti energiaa, joka kasvattaa materiaalin hiilipäästöjä, verrattuna muihin kaapelin materiaaleihin. Kaapelien osalta laskenta on tehty huomioiden koko puistoalue. Laskennassa on käytetty

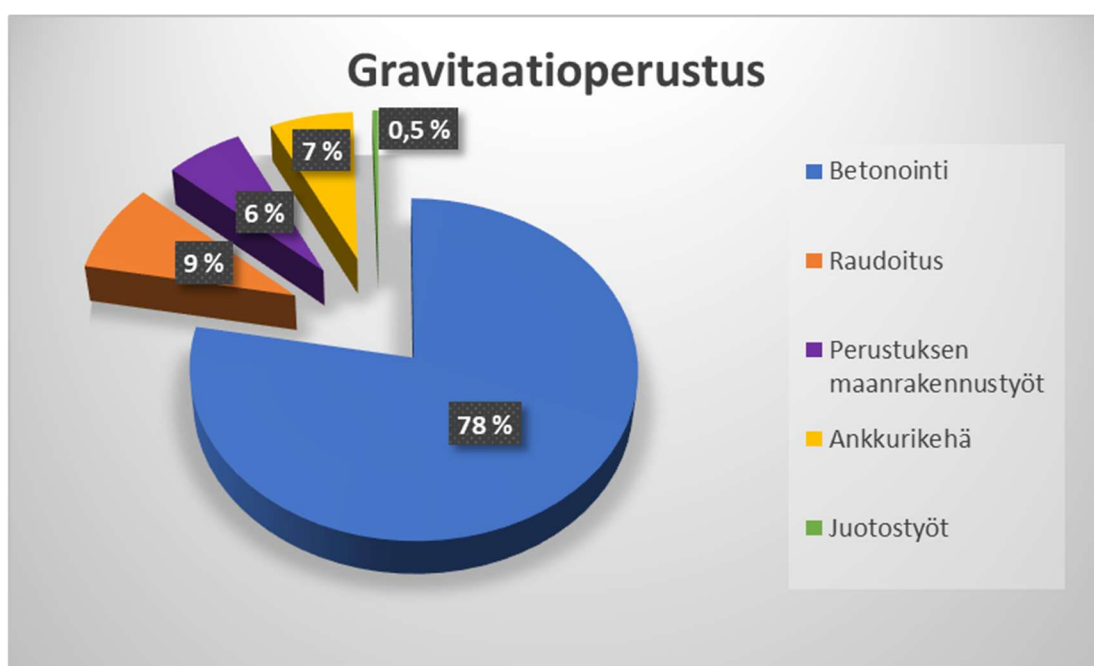
case tuulivoimapuiston kaapelilistoja, joista nähdään kokonaiskaapeli määrä ja kaapelien tyypit. Päästökertoimena on käytetty kaapelintoimittajan laskelmista saatuja päästö arvoja kaapeli metriä kohden. Kaapelien määrät ja päästökertoimet nähdään liitteistä 3–4 (ei julkinen).

Tuulivoimapuisto on alue, joka koostuu toisiinsa liitetyistä tuulivoimaloista, jotka on kytketty kokonaisuutena sähköverkkoon. Kaapelit johdetaan puiston sähköasemalta perustuksille. Voimalat sijaitsevat noin 400–1000 metrin välillä toisistaan. Kaivuu, asennus- ja kaivannon täyttötöistä muodostuvat päästöt, aiheutuvat suurimmaksi osaksi hyödynnettävästä kaivinkoneesta. Kaapelit, sisältäen maadoituskaapelit ja valokuitu asennetaan samaan kaivantoon, määrä voi vaihdella eri kohdissa. Kaivannon leveys vaihtelee kaapelien määrän mukaan. Kaapelikaivantojen mitat saadaan case tuulivoimapuiston suunnitelmista. (Suvic oy, 2022) Laskennassa on tehty rajausta niin, että on käytetty samaa leveyttä koko alueelle, lisäksi laskentaan ei ole otettu mukaan valokuitua. Kaapelien asentamisesta aiheutuvat päästöt on saatu ensin laskemalla kaivinkoneen tuottamat päästöt kussakin työvaiheessa, käyttäen aikaisemmin esitettyä kaavaa (1). Saadut päästökertoimet on kerrottu suunnitelmista saatujen kaapelikaivannon mittojen avulla lasketulla kokonaistilavuudella. Kuljetuksen päästöt muodostuvat noin 200 km matkasta, materiaali toimitetaan kuitenkin työmaalle useammassa erässä. Kuljetuksen hiilijalanjälki on laskettu edellä mainitun kaavan (9) mukaan.

6 TULOKSET

Opinnäytteessä tehdyn laskennan tuloksia analysoitiin tarkastelemalla, mistä eri osista perustusten hiilijalanjälki koostuu, ja miten eri perustusmuotojen hiilijalanjäljet eroavat toisistaan. Tuloksissa nähdään myös infratöiden kokonaiskasvihuonekaasupäästöt, kun huomioon otetaan infratyöt koko case tuulivoimapuiston osalta. Tarkemmat laskelmat ja tulokset on esitetty liitteessä 1 (ei julkinen), koska tulokset ovat salassa pidettäviä.

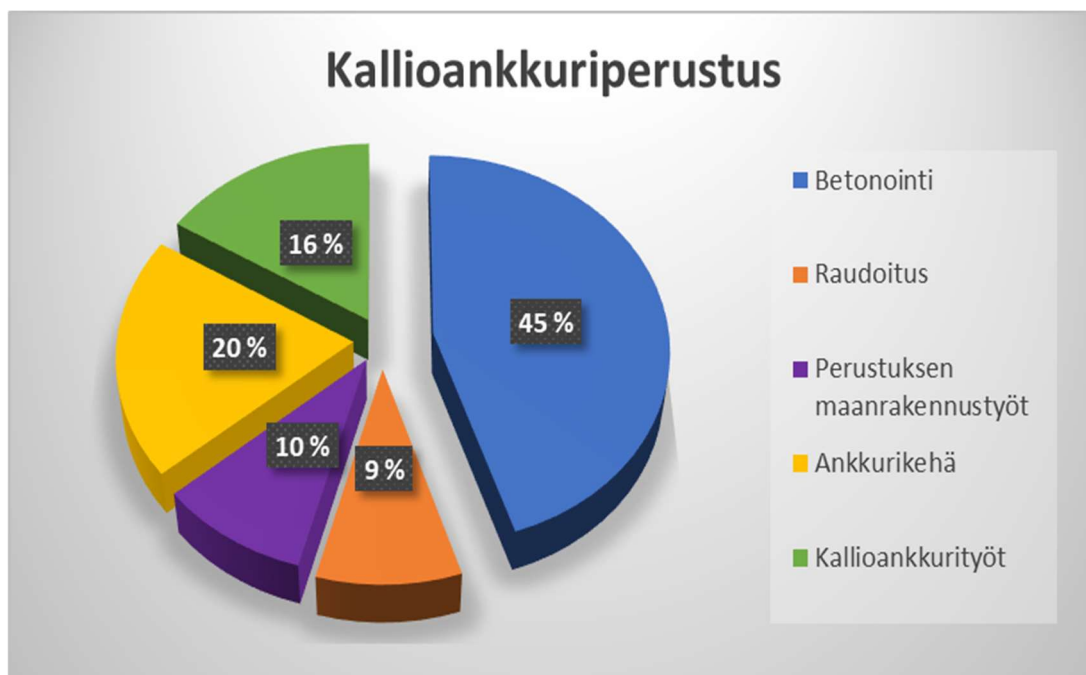
Gravitaatioperustuksen hiilijalanjälki Excel-laskentapohjan mukaan on 719 223 kgCO₂e/kg (liite 1). Kuviossa (7) on esitetty tarkemmin gravitaatiope-
rustuksen rakentamisesta syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen jakauma. Pe-
rustuspohjan rakentamisesta syntyvät kasvihuonekaasupäästöt betonoinnin
osalta kattavat 78 % perustuksen kokonaispäästöistä. Loput noin 22 % pääs-
töistä jakautuu raudoituksen, pulttikehän asennustöiden, maanrakennustöiden
ja juotosvalun välille, joiden päästöosuudet nähdään tarkemmin liitteestä 1 (ei
julkinen).



Kuvio 7. Gravitaatioperustuksen hiilijalanjälki

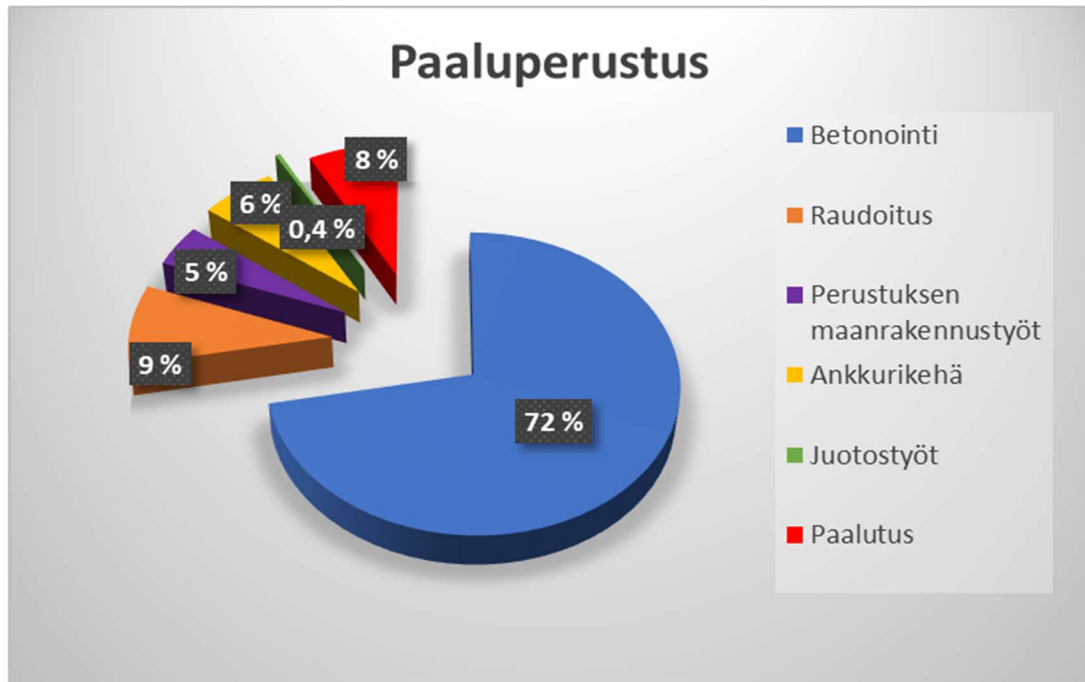
Kallioankkuriperustuksen hiilijalanjälki on 241 344 kgCO₂e/kg (liite 1). Kal-
lioankkuriperustusmuodossa säästetään perustuksen betoni ja harjateräs
määrissä, joka pienentää syntyvää hiilijalanjälkeä. Kallioankkuriperustukseen
kuluu betonia vain noin 200-400m³, kun gravitaatio ja paaluperustuksessa
määrä vaihtelee 700-800m³ välillä. Betonin ja harjateräksen määrää vähentää
kallioankkurointityöt, joka pitää sisällään ankkuroinnin ja juotostyöt. Kallioank-
kuroinnista aiheutuvat päästöt ovat noin 16 % perustuksen päästöistä. Juotos-
töiden ympäristökuormitus on kallioankkuriperustuksessa suurempi, sillä käy-
tettävät massat, varsinkin injektoinnissa ovat varsin sementtipohjaisia. Kuvio

8 esittää kallioankkuriperustuksen hiilijalanjäljen päästöosuudet. Liitteestä 1 (ei julkinen) voidaan nähdä tarkemmat hiilijalanjäljet.



Kuvio 8. Kallioankkuriperustuksen hiilijalanjälki

Paaluperustuksen hiilijalanjälki on perustustyypeistä suurin, Excel-laskentapohjan perusteella tulokseksi saadaan 744 439 kgCO₂e/kg (liite 1). Kuviosta 9 nähdään Excel-laskentapohjasta saadut hiilijalanjälkiosuudet prosentteina esitettynä. Laskennan perusteella todetaan betonoinnin kattavan 72 % koko perustuksen ympäristöpäästöistä. Osuudesta suurin osa aiheutuu seos- ja sideaineista. Perustuksen päästöistä, 9 % aiheutuu raudoituksesta ja 8 % paalutuksesta. Paalutuksessa suurin päästön aiheuttaja on itse tuote. Hiilijalanjälki yhtä paalua kohden on 538 kgCO₂e/kg (liite 1). Sadan paalun asentamisesta aiheutuvat päästöt koostuvat pystytys ja leikkaustöistä, töistä aiheutuvat päästöt nähdään tarkemmin liitteestä 1 (ei julkinen). Kuten gravitaatioperustuksessa myös paaluperustuksessa juotostöiden päästö osuus on vähäinen, päästöt kattavat alle 1 % perustuksen kokonaishiilijalanjäljestä.



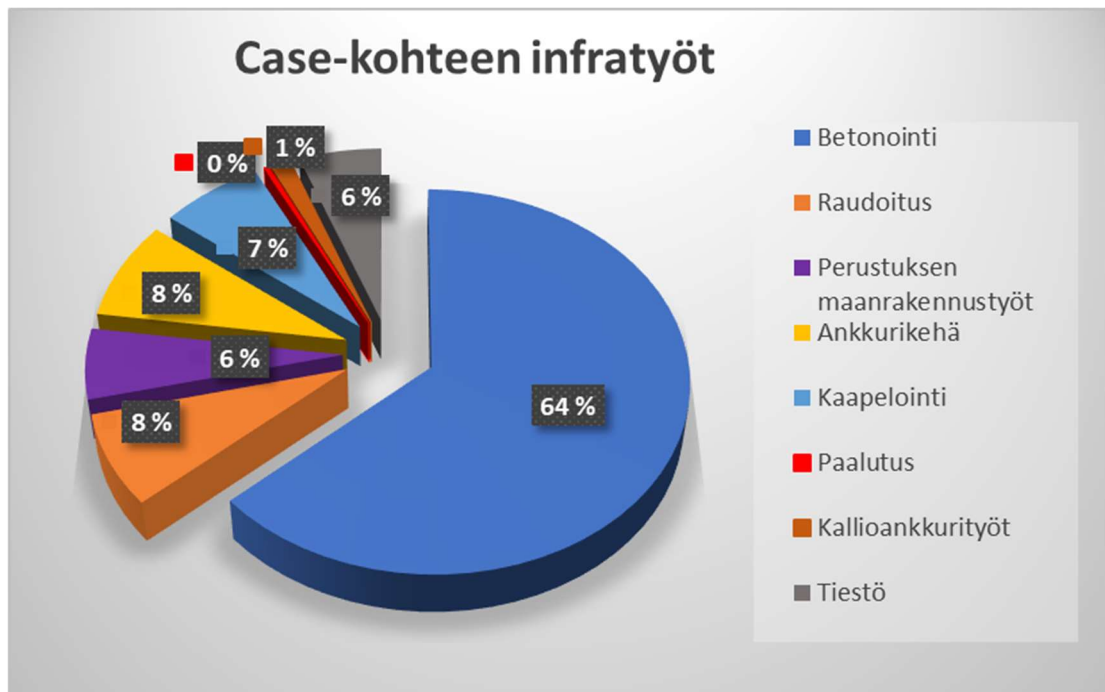
Kuvio 9. Paaluperustuksen hiilijalanjälki

6.1 Työmaan infratöiden kokonaishiilijalanjälki

Case tuulivoimapuiston infratöiden hiilijalanjälki, tässä opinnäytetyössä esitetyin rajauksin on 15712 t CO₂-ekv (liite 1). Tulos pitää sisällään kaikki Case tuulivoimapuistossa olevat perustukset, alueen tiestön ja kaapeloinnin. Laskennasta saatu tulos vastaa 1526 keskivertosuomalaisen vuosittaisia päästöjä. (Sitra, 2018.) Kuvio 10 voidaan nähdä perustuksen rakentamiseen sisältyvien infratöiden täyttävän suurimman osan hiilijalanjäljestä.

Excel-laskentapohjaan tehdyn päästölaskennan perusteella todettiin betonoinnin olevan suurimpia päästölähteitä perustustyyppistä riippumatta. Laskentaan perustuvien tulosten perusteella paaluperustuksen todetaan tuottavan suurimman hiilijalanjäljen eri perustustyyppien välillä. Kuvaajasta 11 nähdään hiilijalanjäljet eri perustusmenetelmillä. Kuvaajan 11 perusteella voidaan todeta kallioankkuriperustuksen hiilijalanjäljen olevan paljon pienempi, johon vaikuttaa suurelta osin materiaalien ja raaka-aineiden vähäisempi tarve. Kallioankkuriperustus on siis perustustyyppinä pienemmän hiilijalanjälkensä puolesta myös taloudellisin vaihtoehto. Paaluperustuksen ja gravitaatioperustuksen hiilijalanjäljet ovat lähellä toisiaan, suurimpana erottavana tekijänä perustuksien välillä

on paaluista aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt. Maanrakennustöistä aiheutuvissa päästöissä ei perustustyyppien välillä ole isoja eroavaisuuksia, jotka nähdään tarkemmin liitteestä 1 (ei julkinen). Pulttikehä on perustusmuodosta riippumatta samankokoinen ja asennustapa on aina sama, joten päästöt ovat joka perustusmuodossa yhtä suuret pulttikehän osalta, tarkempi pulttikehän hiilijalanjälki osuus nähdään liitteestä 1 (ei julkinen). Tässä työvaiheessa hiilijalanjälkeä tuottaakin pääasiassa vain kaivinkone ja materiaalit. Loput case tuulivoimapuiston hiilijalanjäljestä muodostuvat kaapelointitöistä, siihen sisältyvistä materiaaleista ja alueen tiestön rakentamistöistä, joiden kasvihuonekaasupäästöt nähdään liitteestä 1 (ei julkinen).



Kuvio 10. Case tuulivoimapuiston infratöiden hiilijalanjälki



Kuvaaja 11. Perustusten hiilijalanjäljet eri perustusmenetelmillä

7 YHTEENVETO

Tuulivoimalan käyttöikä vaihtelee 25–30 vuoden välillä, jotta tuulivoimasta voidaan puhua vihreänä energiana on tärkeää, että tuulivoimalla pystytään kattamaan myös tuulipuiston rakentamisen aikana syntyvä hiilijalanjälki. Opinnäytetyön tarkoituksena oli laskea hiilijalanjälki case tuulivoimapuiston perustuksille ja kohteen infralle. Työ rajattiin koskemaan vain merkittävimpiä päästölähteitä, joiden vaikutus ajatellaan olevan lopputuloksen kannalta suuria. Työn pohjaksi luotiin Excel-sovellus, jota on tarkoitus hyödyntää myös jatkossa yrityksen tulevien kohteiden hiilijalanjäljen arviointiin. Työn aikana käytettiin ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä ohjetta ja siihen sisältyviä standardeja. Standardeihin sisältyy paljon tietoa liittyen kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen, jonka ansiosta työtä voitaisiin syventää vielä enemmän. Opinnäytetyö on kuitenkin suoritettu annetussa ajassa, mahdollisimman kattavasti.

Laskentaan kerätyt lähtötiedot ovat peräisin case tuulivoimapuiston dokumenteista ja toiminnasta. Työssä on käytetty mahdollisimman tarkkoja löydettävissä olevia päästökertoimia. Päästökertoimia on kerätty useammasta lähteestä, kuitenkin joidenkin päästökertoimien, kuten juotosvaluun liittyvien päästölähteiden päästökertoimien saatavuus ei ole hyvällä tasolla. Kaapeloinnin osalta päästökertoimet on laskettu tavarantoimittaja yrityksen puolesta, case tuulipuiston tarpeiden mukaisesti. Laskentapohjan tulosten perusteella voidaan kallioankkuriperustuksen olevan hiilijalanjälkensä puolesta pienin, johon vaikuttaa materiaalien ja raaka-aineiden vähäisempi tarve. Gravitaatio-, ja paaluperustuksen hiilijalanjäljet ovat lähellä toisiaan, kuitenkin paaluperustuksen pohjatöissä syntyy enemmän päästöjä, jotka aiheutuvat paalutuksesta.

Laskennan lopputulosta ei voi pitää täysin oikeana, vaan pikemminkin tulos on suuntaa antava. Epävarmuustekijöitä aiheuttavat edellä mainittujen päästöker-toimien epätarkkuus. Excel-pohjaan kaikki päästökertoimet ja muut laskennan kannalta oleelliset lähtötiedot on syötetty pohjaan käsin, joten inhimillisenvirheen esiintyvyys on olemassa. Hiilijalanjäljenlaskentapohjan avulla opinnäytetyön tilaajayritys saa kokonaiskuvan siitä, mitkä yrityksen toiminnassa aiheuttavat suurimman ympäristökuormituksen ja mihin toimintavaiheeseen kannattaisi jatkossa keskittyä, haluttaessa vähentää toiminnasta aiheutuvaa ympäristökuormaa. Hiilijalanjäljenlaskentapohjaa voidaan hyödyntää myös muissa tilaajayrityksen kohteissa.

Opinnäytetyö laskenta on kuitenkin vain pintaraapaisu verrattuna siihen, kuinka pitkälle laskentaa voidaan kehittää. Hiilijalanjäljen laskentaan kuluu runsaasti resursseja päästökertoimien etsimiseen ja vertailuun. Resursseja kuluttaa myös kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen tarvittavan datan järjestely ja kerääminen.

LÄHTEET

Anttila, V. (2020). Puhtaampaa betonia, osa 1: Betoniteollisuuden hiilidioksidipäästöt. Haettu 15. 1. 2023 osoitteesta <https://www.ruskonbetonietela.fi/puhtaampaa-betonia-osa-1-betoniteollisuuden-hiilidioksidipaastot/>

Bruce-Hyrkäs, T. (6. 2. 2020). Hiilijalanjäljen laskenta [PowerPoint-diat] Elinkaarilaskenta. Haettu 11. 11. 2022 osoitteesta https://elinkaarilaskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2020/02/One-Click-LCA_Tytti-Bruce-Hyrk%C3%A4s_Hiilijalanj%C3%A4ljen-laskenta-k%C3%A4yt%C3%A4nn%C3%B6ss%C3%A4_5.2.2020.pdf

Finnsementti. (2021). Rapid-cement, CEM II/A-LL 42,5 R Parainen. Noudettu osoitteesta <https://finnsementti.fi/tuotteet/sementit/rapidsementti-parainen/>

Finnsementti. (2022). Oiva-sementti. Noudettu osoitteesta <https://finnsementti.fi/tuotteet/sementit/oiva-sementti/>

Häkkinen, T. & Kuittinen, M. (2020). Kohti vähähiilistä rakentamista. Rakennustieto Oy.

Ilmatieteenlaitos. (n.d). Kasvihuoneilmiö ja ilmakehän koostumus. Haettu 11. 11. 2022 osoitteesta <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/kasvihuoneilmio-ja-ilmakehan-koostumus#references>

Kiviasema. (2022). Usein kysytyt kysymykset. Haettu 15. 1. 2023 osoitteesta <https://www.kiviasema.fi/ukk>

Koskinen, I. (n.d). Hiilikädenjälki. Haettu 28. 1. 2023 osoitteesta https://ecobio.fi/hiilikadenjalki/?utm_term=hii-lik%C3%A4denj%C3%A4lki&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_campaign=&hsa_net=adwords&hsa_grp=141804304983&hsa_mt=b&hsa_tgt=kwd-917948729968&hsa_kw=hii-lik%C3%A4denj%C3%A4lki&hsa_src=g&hsa_acc=1259678727&hsa_

Kuittinen, M. & Hakaste, H. (2020). Vähähiilinen rakentamisen ajankohtaiskatsaus [PowerPoint-diat] Elinkaarilaskenta. Haettu 12. 11. 2022 osoitteesta <https://elinkaarilaskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2020/03/5-Kuittinen-ja-Hakaste.pdf>

Lehto, P. (15. 09 2022). Hallituksen esitys HE 139/2022 vp. Haettu 28. 02 2023 osoitteesta https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_139+2022.aspx

Markkanen, J. (2016). Tuulipuiston alue- ja pohjarakenteiden suunnittelu [AMK-opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu]. Theseus. Noudettu osoitteesta <https://www.theseus.fi/handle/10024/107975>

Motiva Oy. (2022). Työkoneet. Noudettu osoitteesta https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tyokoneet

Mölsä, S. (2021). Sementin ja teräksen ilmastopäästöt tulevat jo valmistusprosessista – teräs puhdistuu joskus 2030-luvulla vetypelkistyksellä. Rakennuslehti. Noudettu osoitteesta <https://www.rakennuslehti.fi/2021/04/sementin-ja-teraksen-ilmastopaastot-tulevat-jo-valmistusprosessista-teras-puhdistuupian-vetypelkistyksella/>

NEPD-1235-389-EN. (2017). Noudettu osoitteesta https://www.epd-norge.no/getfile.php/136972-1658869637/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-1235-389_Permanent-Strand-Anchor-Type-060--12-strands.pdf

OpenCO2.net. (2022). CO2-termit tutuiksi. Noudettu osoitteesta <https://www.openco2.net/fi/co2-tietoa>

Paalatie, H. (2019). Tuulivoimalanperustus. Tuulivoimalehti. Noudettu osoitteesta <https://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/56-tarinaa-tuulivoimasta/osa-32.-tuulivoimalan-perustus.html?p82=3>

Reka kaapeli. (2022). DryREX, Nordic Wind -Tuulivoimakaapelit. Haettu 16. 1. 2023 osoitteesta <https://www.reka.fi/sovellusalueet/tuulivoima/>

Rinne, T. (2022). Infrarakentamisen betonin hiilijalanjäljen vähentäminen, Esiselvitys. Helsinki. Noudettu osoitteesta <https://julkaisut.hel.fi/julkaisut/infrarakentamisen-betonin-hiilijalanjaljen-vahentaminen>

SFS-EN 15643:2021. Sustainability of construction works. Framework for assessment of buildings and civil engineering works. (2021). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS. Noudettu osoitteesta <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1011195.html.stx>

SFS-EN 15978: en. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. (2012). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS. Noudettu osoitteesta <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/184359.html.stx>

SFS-EN ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. (2006). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS. Noudettu osoitteesta <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/1/648281.html.stx>

Siitonen, S. (2022a). Miten hiilijalanjälki lasketaan? OpenCO2. Haettu 28. 1. 2023 osoitteesta <https://www.openco2.net/fi/artikkelit/miten-hiilijalanjalki-lasketaan>

Siitonen, S. (2022b). Miksi hiilikädenjälki kannattaa määrittää? OpenCO2. Haettu 8. 2. 2023 osoitteesta <https://www.openco2.net/fi/artikkelit/miksi-hiilikadenjalki-kannattaa-maarittaa>

Sjöstedt, T. (2018). Mitä nämä käsitteet tarkoittavat? Sitra. Haettu 11. 11. 2022. osoitteesta <https://www.sitra.fi/artikkelit/mita-nama-kasitteet-tarkoittavat/>

Suomen Betoniyhdistys. (2018). Betonitekniikan oppikirja by 201 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. (2018). Keskivertosuomalaisen hiilijalanjälki. Haettu 8. 3. 2023 osoitteesta <https://www.sitra.fi/artikkelit/keskivertosuomalaisen-hiilijalanjalki/>

Suomen ympäristökeskus SYKE. (2022). Infrarakentamisen päästötietokanta. Noudettu osoitteesta <https://co2data.fi/infra/>

Suvic oy. (2022). Suunnitelmat.

Tilastokeskus. (2015). Laatuseloste. Noudettu osoitteesta https://www.stat.fi/til/khki/2015/khki_2015_2016-05-25_laa_001_fi.html

Tilastokeskus. (2022a). Käsitteet. Noudettu osoitteesta https://www.stat.fi/meta/kas/epasuorat_kasvi.html

Tilastokeskus. (2022b). Kasvihuonekaasut -tilaston GWP-kertoimissa ja tietokantatauluissa muutoksia 25.5.2022. Noudettu osoitteesta <https://stat.fi/muutostiedote/cl3bhkztacwpy0gvt9m6ysc83>

VTT Lipasto. (2017). Yksikköpäästöt 2017. Haettu 16. 2 2023 osoitteesta <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/index.htm>

YIT. (2022). Lyöntipaalaus. Haettu 1. 12. 2022 osoitteesta <https://www.yit.fi/infra/maarakennus/paalaus>

YK-liitto. (n.d). ILMASTONMUUTOS. Haettu 11. 11 2022 osoitteesta Suomen YK-liitto: <https://www.ykliitto.fi/kasvattajille/kestavan-kehityksen-tehtavat/ilmastonmuutos>

Ympäristöministeriö. (2019). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Noudettu osoitteesta https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ympäristöministeriö. (n.d.-a). Pariisin ilmastopöytäkirja. Noudettu osoitteesta <https://ym.fi/pariisin-ilmastopoytakirja>

Ympäristöministeriö. (n.d.-b). Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Noudettu osoitteesta <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>

LIITELUETTELO

Liitteet 1–7 sisältävät luottamuksellista tietoa.

Liite 1. Hiilijalanjäljen Excel-laskentapohja (Salainen)

Liite 2. Hiilijalanjäljenlaskennan asiakaspohja (Salainen)

Liite 3. Kaapeleiden päästökertoimet (Salainen)

Liite 4. Kaapelimäärä listat (Salainen)

Liite 5. Betoniaseman lähtötiedot (Salainen)

Liite 6. Betonointisuunnitelma (Salainen)

Liite 7. Formwork drawing (Salainen)