



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Netta Rintala

# UUDEN MUUNTAJAN HIILIJALANJÄLKI

Tekniikka  
2021

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
Ympäristötekniologia

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Netta Rintala
Opinnäytetyön nimi	Uuden muuntajan hiilijalanjälki
Vuosi	2021
Kieli	suomi
Sivumäärä	58 + 1 liitettä
Ohjaaja	Asseri Laitinen, Timo Tuomisto

---

Opinnäytetyössä tarkoituksena on rakentaa laskuri, jolla voidaan selvittää uuden muuntajan hiilijalanjälki. Tuloksilla haluttiin selvittää, mistä muuntajan elinkaaren aikana suurimmat päästöt syntyvät ja tutkia häviöiden vaikutusta laskennan lopputulokseen.

Laskenta perustuu yksinkertaiseen elinkaariarviointiin ja ISO 14067:2018 -standardiin, jonka tarkoituksena on tuoda johdonmukaisuutta kasvihuonepäästöjen laskentaan. Laskentaa varten käytetään päästökertoimia, jotka on kerätty useista lähteistä.

Muuntajan, jonka nimellisteho on 63 MVA ja keskiasennon häviöt 160 kW elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt ovat kokonaisuudessaan 2 388 tCO<sub>2</sub>ekv. Nimellistehoon suhteutettuna päästöt ovat 37,9 kgCO<sub>2</sub>ekv./kVA ja yhtä muuntajan kiloa kohden 29,6 kgCO<sub>2</sub>ekv./kg. Hiilijalanjälkilaskennan perusteella voidaan todeta, että muuntajan elinkaaren aikana suurimmat päästöt syntyvät käytönaikaisista tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä. Tuloksia tulkittaessa pitää kuitenkin huomioida, että ne ovat vain suuntaa antavia arvioita.

---

Avainsanat hiilijalanjälki, muuntaja, elinkaari, päästökertoimet, kasvi-  
huonekaasut

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Ympäristötekniologia

## ABSTRACT

Author	Netta Rintala
Title	Carbon footprint of new transformer
Year	2021
Language	Finnish
Pages	58 + 1 Appendices
Name of Supervisor	Asseri Laitinen, Timo Tuomisto

---

The purpose of this thesis was to build a calculator, which provides information about the carbon footprint of a new transformer. The aim was to find out where the largest emissions occur during the life cycle of the transformer and to study the effect of losses on the calculation results.

The calculation is based on the simple life cycle assessment as well as ISO 14067:2018 standard, which brings consistency to the calculation of the greenhouse gas emissions. Emission factors, collected from several resources, were used in the calculations.

For a transformer with a rated power of 63 MVA and losses of 160 kW, the greenhouse gas emissions are 2 388 tCO<sub>2</sub>ekv. Relative to the rated power, the emissions are 37,9 kgCO<sub>2</sub>eq/kg and when related to the transformers weight, the emissions are 29,6 kgCO<sub>2</sub>eq/kg. Based on the carbon footprint calculation, it can be stated that during the transformer life cycle, the largest emissions are caused by losses which are produced during the operation. However, when interpreting the results, it should be noted that they are only estimates.

---

Keywords carbon footprint, transformer, life cycle, emission factor, greenhouse gases

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	HIILIJALANJÄLKILASKENNAN TAUSTALLA .....	9
	2.1 Kasvihuoneilmiö ja kasvihuonekaasut .....	9
	2.1.1 Hiilen kiertokulku maapallolla.....	12
	2.2 Ilmastopolitiikka Euroopan Unionissa .....	13
	2.3 Hiilijalanjälki ja elinkaariarviointi (LCA).....	16
	2.3.1 ISO 14067:2018 .....	17
	2.4 Hiilijalanjälkilaskennan tavoitteet ja tarkoitus .....	18
3	MUUNTAJAN PERUSTEET .....	19
	3.1 Muuntajan toimintaperiaate .....	19
	3.2 Muuntajan rakenne .....	21
	3.3 Muuntajan häviöt .....	25
	3.4 Energiatehokkuus .....	26
4	MUUNTAJAN HIILIJALANJÄLJEN LASKEMINEN .....	28
	4.1 Laskennan rajaaminen .....	28
	4.2 Excel-laskentatyökalun rakentaminen.....	28
	4.2.1 Päästökertoimet.....	29
	4.3 Tulosten laskeminen .....	31
	4.3.1 Muuntajan materiaalit .....	32
	4.3.2 Tehtaan energian ja veden kulutus.....	33
	4.3.3 Muuntajan toimittaminen kohteeseen.....	35
	4.3.4 Häviöt .....	36
	4.3.5 Muuntajan kierrättäminen.....	38

5	MUUNTAJAN HIILIJALANJÄLKI .....	40
5.1	Häviöiden vaikutus muuntajan päästöihin .....	43
6	TULOSTEN ARVIOINTI .....	48
6.1	Epävarmuustekijät .....	48
6.2	Tulosten vertailu .....	49
7	YHTEENVETO .....	53
	LÄHTEET .....	55
	LIITTEET .....	59

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Muuntajan sydän ja käämit .....	20
<b>Kuva 2.</b> Hermeettinen aaltolevymuuntaja.....	23
<b>Kuva 3.</b> Radiaattorimuuntaja .....	23
<b>Kuva 4.</b> Posliiniläpivienti .....	24
<b>Kuva 5.</b> Muuntajan hiilijalanjälki.....	40
<b>Kuva 6.</b> Hiilijalanjälki pylväsdiagrammilla .....	42
<b>Kuva 7.</b> Häviöiden vaikutus päästöihin (nimellisteho) .....	45
<b>Kuva 8.</b> Häviöiden vaikutus päästöihin (muuntajakilo) .....	46
<b>Kuva 9.</b> Häviöiden vaikutus päästöihin (kokonaispäästöt) .....	46
<b>Kuva 10.</b> Muuntajan hiilijalanjälki 40 vuoden käyttöiällä.....	50
<b>Kuva 11.</b> Hiilijalanjälki vuodessa .....	51
<b>Taulukko 1.</b> GWP-kertoimet .....	16
<b>Taulukko 2.</b> Päästökertoimet materiaaleille .....	33
<b>Taulukko 3.</b> Päästökertoimet energialle ja vedelle .....	35
Taulukko 4 jätteiden päästökertoimet.....	39
<b>Taulukko 5.</b> Muuntajan hiilijalanjälki lukuina .....	42
<b>Taulukko 6.</b> Tyhjäkäyntihäviöiden hiilijalanjäljet .....	44
<b>Taulukko 7.</b> Kuormitushäviöiden hiilijalanjäljet .....	44
<b>Taulukko 8.</b> Häviöiden yhteenlaskettu hiilijalanjälki .....	44
<b>Taulukko 9.</b> Häviöiden vaikutus muuntajan hiilijalanjälkeen .....	45
<b>Taulukko 10.</b> Käyttöiän vaikutus hiilijalanjälkeen .....	49

**LIITELUETTELO****LIITE 1.** Hiilijalanjälkilaskuri**LIITE 2.** Hiilijalanjälkilaskurissa käytetyt kaavat

## 1 JOHDANTO

Ihmisen toiminnasta johtuva ilmastonmuutos on yksi suurimmista globaaleista haasteista, jolla tulee olemaan vaikutuksia ihmisten elämään, mutta myös liiketoimintaan tulevana vuosikymmeninä.<sup>1</sup> Suurin osa kasvihuonepäästöistä syntyy energisektorilla, minkä vuoksi alan yritykset hakevat entistä ympäristöystävällisempiä ratkaisuja, jotta ilmastotavoitteisiin päästään.<sup>2</sup>

Tässä opinnäytetyössä toimeksiantajana on Hitachi Energy Finland Oy, joka valmistaa, suunnittelee ja huoltaa Suomessa muuntajia ja reaktoreita, sähköverkon hallinnan ohjaus-, automaatio- ja valvontajärjestelmiä sekä siirto- ja jakeluverkon ratkaisuja esimerkiksi sähköasemakokonaisuuksia. Yrityksen yhtenä tavoitteena on kehittää toimintaa entistä kestävämpään suuntaan, muun muassa pyrkimällä hiili-neutraaliuteen omissa toiminnoissaan vuoteen 2030 mennessä sekä rakentamaan kestävänsä energian tulevaisuutta nykyisille ja tuleville sukupolville.<sup>3 4</sup>

Opinnäytetyön aiheena on uuden muuntajan hiilijalanjäljen laskeminen, joka tukee Hitachi Energyn tavoitteita hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Työn tarkoituksena on suunnitella laskentatyökalu, jolla voidaan selvittää Vaasan tehtaalla valmistettavan muuntajan hiilijalanjälki sen koko elinkaaren ajalta.

---

<sup>1</sup> SFS-EN ISO 14067:2018.

<sup>2</sup> Center for climate and energy solutions.

<sup>3</sup> Hitachi Energy. Perustietoja yhtiöstä Suomessa.

<sup>4</sup> Hitachi ABB Power Grids. Sustainability 2030.



## 2 HIILIJALANJÄLKILASKENTA

Kasvihuonekaasujen, erityisesti hiilidioksidin, määrä on lisääntynyt ja lisääntyy edelleen ilmakehässä, mikä on suurin syy ihmisen toimista johtuvalle ilmastonmuutokselle.<sup>5,6</sup> Hiilidioksidia on ilmakehässä nykyään noin 40 prosenttia enemmän verrattuna aikaan ennen teollistumista. Tämä johtuu erityisesti fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Ilmastonmuutoksen aiheuttamat häiriöt näkyvät muun muassa ilmaston ja merien lämpenemisenä, meren pinnan kohoamisena sekä lumen ja jään vähenemisenä.<sup>7</sup>

### 2.1 Kasvihuoneilmiö ja kasvihuonekaasut

Maapallon ilmakehä toimii kasvihuoneen lasikaton tavoin, eli päästää auringosta peräisin olevan säteilyn maan pinnalle, mutta samalla se estää maapallon lämpösäteilyn karkaamisen avaruuteen. Auringon säteilystä noin 30 prosenttia heijastuu takaisin avaruuteen ja loput 70 prosenttia jää maan ja merien pintakerrokseen, jolloin säteilyn energia muuttuu lämmöksi. Luonnollinen kasvihuoneilmiö pitää maapallon lämpötilan elämälle suotuisana ja on näin hyvä asia. Samalla ihmiskunta kuitenkin päästää ilmakehään kiihtyvällä vauhdilla lisää kasvihuonekaasuja, mikä voimistaa ilmiötä ja lämmittää maapalloa.

Tärkeimmät luonnostaan ilmakehässä esiintyvät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani, dityppioksidi ja otsoni. Kasvihuonekaasut imevät läm-

---

<sup>5</sup> Ilmasto-opas. Ilmastonmuutos ilmiönä.

<sup>6</sup> The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

<sup>7</sup> The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

pösäteilyä samalla kun ne päästävät muun säteilyn lävitseen niiden molekyylikenteen ansiosta. Kasvihuonekaasumolekyyli kykenee muuttamaan saamansa energian uudelleen lämpösäteilyksi, jolloin osa säteilyn energiasta palaa lämmitämään maan pintaa. Ihmisen toiminta lisää luonnostaan ilmakehässä olevien kasvihuonekaasujen määrää jatkuvasti, mutta samalla olemme tuottaneet kokonaan uusia, ennestään esiintymättömiä kaasuja.

Vesihöyryä syntyy ilmakehään hyvin monista ihmisen toimista, mutta ne eivät varsinaisesti vaikuta ilmastonlämpenemiseen, koska vedenkiertokulku on niin nopeaa, että yksittäinen vesimolekyyli säilyy ilmakehässä noin viikon. Vesihöyry on kuitenkin merkittävin kasvihuonekaasu, koska se toimii kasvihuonekaasujen tapaan ja absorboi lämpösäteilyä. Lämpimässä ilmassa on enemmän vesihöyryä kuin kylmässä, eli muiden kasvihuonekaasujen nostaessa lämpötilaa, myös vesihöyryn määrä lisääntyy. Vesihöyryn lisääntyminen on siis vahvistava palauteilmiö, joka vahvistaa muiden kasvihuonekaasujen aiheuttamaa lämpenemistä lähes kaksinkertaisesti. Ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista merkittävin on hiilidioksidi. Teollistumisen jälkeen sen määrä on noussut 280 ppm:stä vuoteen 2008 mennessä yli 380 ppm:ään (eli jokaista miljoonaa ilmamolekyyliä kohden ilmassa on 380 hiilidioksidimolekyyliä), kun ennen teollistumista kymmenentuhannen vuoden aikana sen määrä ilmakehässä vaihteli vain hyvin vähän. Hiilidioksidin määrä kasvaa edelleen vuosittain noin 2 ppm:llä. Suurin osa ihmiskunnan päästävästä hiilidioksidista on peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä, mutta myös maankäytön muuttuminen on isona tekijänä.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Nevanlinna, H. Muutamme ilmasto.

Toiseksi tärkein kasvihuonekaasu, metaani, on hiilidioksidia 28 kertaa tehokkaampi.<sup>9</sup> Toisaalta metaanin elinikä on vain kymmenisen vuotta, kun hiilidioksidi voi pysyä ilmakehässä jopa satoja vuosia. Metaanin pitoisuus on tästä huolimatta kaksinkertaistunut ilmakehässä verrattuna esiteolliseen aikaan.<sup>10</sup> Metaania syntyy eloperäisen aineen hapettomassa hajoamisessa, esimerkiksi kaatopaikoilla. Sitä on varastoitunut muun muassa ikiroutaan, josta sitä vapautuu ilmakehään jäätiköiden sulaessa.<sup>11</sup> Metaania on sitoutuneena lisäksi merien pohjakerroksissa kiinteässä olomuodossa, niin kutsuttuina metaanihydraatteina, jotka hajoavat, jos merien lämpötila nousee riittävästi. Tällöin sitoutunutta metaania vapautuisi suuria määriä ilmakehään, mikä nostaisi maapallon keskilämpötilaa huomattavasti. Hydraateista ei kuitenkaan todennäköisesti vapaudu metaania vielä tämän vuosisadan aikana, mutta kaukaisemmassa tulevaisuudessa se on mahdollista.<sup>12</sup>

Dityppioksidista kolmasosa syntyy ihmiskunnan toimien seurauksena ja kaksi kolmasosaa luonnossa nitraattien hajotessa. Erityisesti maataloudessa syntyy dityppioksidipäästöjä. Sen pitoisuus on kasvanut noin 20 prosenttia teollisuuden aikana, mutta pitoisuus nousee tasaisesti edelleen. Dityppioksidimolekyylit voivat hajota ainoastaan ilmakehän ylimmissä kerroksissa auringon kokonaisenergian ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta, minkä vuoksi ne voivat säilyä ilmakehässä jopa noin 120 vuotta.

---

<sup>9</sup> Suomen Virallinen Tilasto (SVT). Kasvihuonekaasut.

<sup>10</sup> Nevanlinna, H. Muutamme ilmasto.

<sup>11</sup> Koskinen, J. Hiilijalanjäljillä.

<sup>12</sup> Ilmasto-opas.

Halogenisoidut hiilivedyt ovat hyvin voimakkaita kasvihuonekaasuja ja niiden lämpösäteilyä imevä vaikutus on jopa tuhansia kertoja hiilidioksidia suurempi. Kaasujen vaikutusaika vaihtelee vuodesta jopa tuhansiin vuosiin, mutta niitä on ilmakehässä hyvin vähän, joten ne voimistavat kasvihuoneilmiötä huomattavasti vähemmän kuin hiilidioksidi. Halogenisoituja hiilivetyjä ei esiinny ilmakehässä juurikaan luontaisesti, vaan ne syntyvät ihmisen toiminnoissa, kuten teollisuudessa.

Otsonia syntyy ilmakehän alimmissa kerroksissa, kun esimerkiksi autojen pakoputkista tulevat typen oksidit, häkäkaasu ja hiilivedyt reagoivat auringon valossa hapen kanssa. Se on kaasuna lyhytikäinen, joten sen pitoisuudet ilmakehässä vaihtelevat suuresti. Lyhytikäisyytensä vuoksi on mahdotonta sanoa, paljonko otsonipitoisuus on sen luonnolliseen tasoon verrattuna lisääntynyt.<sup>13</sup>

### **2.1.1 Hiilen kiertokulku maapallolla**

Hiili kiertää luonnossa jatkuvasti eri hiilivarastojen välillä. Kasvien yhteyttämisessä hiilidioksidia sitoutuu ilmakehästä kasveihin. Hiilidioksidi vapautuu takaisin ilmakehään kuolleiden kasvien maatuessa, kasvisolujen hengityksessä ja ravinnokseen kasveja käyttävien eläinten uloshengityksessä. Hiilidioksidia liukenee myös suuria määriä meriveden pintakerrokseen, mutta samalla meristä vapautuu lähes yhtä paljon hiilidioksidia takaisin ilmakehään. Yksittäinen hiilidioksidimolekyyliviipyy ilmakehässä vain noin viisi vuotta. Todellisuudessa hiilidioksidipäästöjen vaikutusaika ilmakehässä on kuitenkin paljon pidempi, jopa satoja vuosia, koska valtaosa kasvi- ja meren pintakerrosten sitomasta hiilidioksidista vapautuu pian takaisin ilmakehään.

---

<sup>13</sup> Nevanlinna, H. Muutamme ilmasto.

Ihmisen tuottama uusi hiilidioksidi jakautuu hiilen luonnollisen kiertokulun mukana ilmakehän, kasvipeitteen ja merien kesken.<sup>14</sup> Fossiilisten polttoaineiden poltosta ja metsien hakkuusta syntyvä ylimääräinen hiilidioksidi ei ole kuitenkaan kokonaan kompensoitavissa luonnollisella kiertokululla. Hiilidioksidilyijäämää syntyy vuosittain noin 18 gigatonnia, eli ilmakehään syntyy huomattavasti enemmän hiilidioksidia kuin sieltä poistuu, mikä luonnollisesti nostaa ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta.<sup>15</sup>

## 2.2 Ilmastopolitiikka Euroopan Unionissa

Euroopan Unionin ilmastopolitiikan tarkoituksena on ohjata jäsenmaiden toimia, jotta ilmastonmuutosta voitaisiin hillitä tehokkaammin. Poliitiikka perustuu YK:n ilmastopöytäkirjaan ja sitä täydentävään Kioton pöytäkirjaan sekä Pariisiin ilmastopöytäkirjaan. Sen ytimessä ovat päästökauppa, kansalliset tavoitteet päästökaupan ulkopuolisille aloille sekä EU:n sopeutumisstrategia. Samalla EU osallistuu aktiivisesti kansainvälisiin ilmastoneuvotteluihin ja rahoittaa kehitysmaiden ilmastotoimia.<sup>16</sup>

Vuonna 1994 voimaan tullut YK:n ilmastopöytäkirja (ilmastopöytäkirja) määrittää ilmastonmuutosta hillitseville toimille kansainväliset tavoitteet, periaatteet ja yleiset puitteet. Sen tavoite on vakauttaa ihmistoiminnasta johtuvat ilmakehän kasvihuonekaasut vaarattomalle tasolle. Vaaraton taso tulisi saavuttaa siinä ajassa, että ekosysteemit ehtisivät sopeutua ilmastonmuutokseen luonnollisella

---

<sup>14</sup> Nevanlinna, H. Muutamme ilmastoa.

<sup>15</sup> Koskinen, J. Hiilijalanjäljillä.

<sup>16</sup> Ympäristöministeriö. Euroopan Unionin ilmastopolitiikka.

tavalla. Kasvihuonepäästöjen vähentämisen keinona jäsenmaiden tulee muun muassa selvittää päästöjensä määrä ja raportoida niistä ilmastopöytäkirjan sihteeristölle. Ilmastopöytäkirja ei itsessään sisällä määrällisiä velvoitteita, mutta sopimuksesta on tarkennettu Kioton pöytäkirjassa, jossa teollisuusmaat sitoutuvat oikeudellisesti vähentämään kasvihuonepäästöjään.<sup>17</sup>

Kioton pöytäkirja astui voimaan vuonna 2005 ja se on ensimmäinen oikeudellisesti sitova sopimus, jota on käytetty apuna päästöjen vähentämisessä kansainvälisesti. Pöytäkirjan ensimmäinen velvoitekausi koski vuosia 2008–2012 ja toinen kausi käsittää vuodet 2013–2020. Toisen kauden aikana EU on asettanut tavoitteeksi vähentää päästöjään 20 prosenttia verrattuna vuoteen 1990. Toinen velvoitekausi ei kuitenkaan ole tullut kansainvälisesti voimaan, koska tarvittavat kolme neljäsoosa osapuolista ei ole hyväksynyt niin sanottua ”Dohan muutosta”, jolla toisesta velvoitekaudesta sovittaisiin. Toisella velvoitekaudella ei ole enää suurta merkitystä, koska voimaan astumisensa jälkeen Pariisin ilmastopöytäkirja on ohjannut kansainvälistä ilmastopolitiikkaa toista velvoitekautta laajemmin ja pitkäjänteisemmin.<sup>18</sup>

Pariisin ilmastopöytäkirja täydentää YK:n ilmastopöytäkirjasta. Se on oikeudellisesti sitova kansainvälinen sopimus ilmastonmuutoksesta. Sopimus astui voimaan 4.11.2016 ja sen päätavoitteena on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu reilusti alle kahteen asteeseen verrattuna aikaan ennen teollistumista ja kääntää kasvihuonepäästöjen määrä laskuun mahdollisimman pian, niin että ihmisten aiheuttamat päästöt ja päästöjä sitovat nielut olisivat tasapainossa vuoden 2050 jälkeen.

---

<sup>17</sup> Ympäristöministeriö. Kansainväliset ilmastoneuvottelut.

<sup>18</sup> Ympäristöministeriö. Kioton pöytäkirja.

Yhtenä keinona käytetään esimerkiksi rahavirtojen ohjaamista kohti vähähiilistä kehitystä.

Pariisin ilmastopöimukseä määritellään, että tavoitteisiin pääsyä tarkastellaan viiden vuoden välein. Tarkastelu tehdään ensimmäisen kerran vuonna 2023. Söimukseä ei aseteta määrällisiä päästövähennystavoitteita, mutta jokaisen osapuolen on valmisteltava, tiedotettava, ylläpidettävä ja saavutettava peräkkäiset kansalliset päästötavoitteensa. Kansalliset tavoitteet uusitaan joka viides vuosi ja uusien päästötavoitteiden on oltava aina edellistä kunnianhimoisempia. Jotta tavoitteisiin voidaan päästä, on oleellista, että kaikki osapuolet kiristävät ilmastopöolitikkaansa, koska toistaiseksi ilmoitetut tavoitteet eivät riitä rajoittamaan maapallon lämpötilaa söimukseen mukaisesti. Ilmastotavoitteet säilytetään julkisessa rekisterissä, jota ylläpitää YK:n ilmastosöimussihteeristö.<sup>19</sup>

Jäsenmaiden välillä järjestetään lisäksi YK:n ilmastokokouksia, joista viimeisin pidettiin marraskuussa 2021 Iso-Britannian Glasgow'ssa. Kokouksella oli tarkoitus kirittää maita kunnianhimoisissa ilmastotoimissa. Kokouksen avulla pystyttiin vahvistamaan sitoutumista Pariisin ilmastosöimukseen tavoitteisiin ja samalla saatiin valmiiksi söimukseen sääntökirja, joka konkretisoi ja käytännöllistää Pariisin söimusta.<sup>20</sup>

---

<sup>19</sup> Ympäristöministeriö. Pariisin ilmastosöimustus.

<sup>20</sup> Ympäristöministeriö. Glasgow'n ilmastokokous COP26.

### 2.3 Hiilijalanjälki ja elinkaariarviointi (LCA)

Tuotteen hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen elinkaaren aikana syntyvien kasvi-  
huonepäästöjen ja -poistojen summaa, jotka ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalent-  
teina (CO<sub>2</sub>ekv.).<sup>21</sup> Hiilidioksidiekvivalenttia varten eri kasvihuonekaasut muute-  
taan ilmastoa lämmittävältä vaikutukseltaan vastaavaksi määräksi hiilidioksidia, eli  
yksikkö kertoo kaikkien kasvihuonepäästöjen yhteenlasketun ilmastoa lämmittä-  
vän vaikutuksen. Kasvihuonekaasujen muuntamiseen käytetään GWP-kertoimia  
(Global Warming Potential), jotka on määritelty IPCC:n eli hallitustenvälisen ilmas-  
tonmuutospaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change) arviointirapor-  
tissa. Muiden kasvihuonekaasujen GWP suhteutetaan hiilidioksidin GWP-arvoon,  
joka on yksi. Ilmastoa lämmittävä vaikutus ilmoitetaan tietylle ajanjaksolle ja hiili-  
jalanjälkeä laskettaessa se on sata vuotta. Esimerkiksi metaanin lämmittävä vaiku-  
tus hiilidioksidin suhteutettuna on 28 sadan vuoden tarkasteluajalla (taulukko  
1).<sup>22 23</sup>

**Taulukko 1.** GWP-kertoimet<sup>24</sup>

Kasvihuonekaasu	GWP
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	28
N <sub>2</sub> O	265
SF <sub>6</sub>	23 500
NF <sub>3</sub>	16 100
HFC- ja PFC yhdisteet	4–12 400

<sup>21</sup> ISO 14067:2018

<sup>22</sup> OpenCO<sub>2</sub>.net.

<sup>23</sup> Tilastokeskus.

<sup>24</sup> Tilastokeskus.



Tuotteen hiilijalanjäljen laskeminen perustuu elinkaariarviointiin, joten myös tässä opinnäytetyössä tutkitaan tuotteen hiilijalanjälkeä sen koko elinkaaren ajalta.<sup>25</sup> Elinkaariarviointi (life cycle assessment) eli LCA tarkoittaa menetelmää, jolla voidaan arvioida tuotteen vaatimia resursseja ja ympäristövaikutuksia. Tuotteen täydellinen elinkaari sisältää raaka-aineiden hankinnan, niiden prosessoinnin ja kuljetuksen tuotantolaitokselle sekä tuotteen valmistamisen, jakelun, käytön, uudelleenkäytön, huollon, kierrätyksen ja hävityksen. Näin laajasti toteutettu elinkaariarviointi on kuitenkin hyvin työläs toteuttaa, joten tässä työssä käytetään yksinkertaistettua elinkaariarviointia, eli arviointi on rajattu vain tuotteen eli muuntajan kasvihuonekaasupäästöihin.<sup>26</sup>

### **2.3.1 ISO 14067:2018**

Opinnäytetyössä muuntajan hiilijalanjäljen laskemisen perustana käytetään ISO 14067:2018 -standardia, joka on osa ISO 14060 -standardisarjaa. Sarjan tarkoitus on tuoda selkeyttä ja johdonmukaisuutta kasvihuonepäästöjen laskemiseen ja seurantaan. Standardi ISO 14067:2018 määrittelee tuotteen hiilijalanjälkilaskennalle ja raportoinnille perusteet ja vaatimukset. Sen perustana on elinkaarinäkökulma, eli tuotteen hiilijalanjälki huomioidaan laskelmissa koko sen elinkaaren ajalta. Asiakirja käsittelee vain yhtä vaikutusluokkaa, ilmastonmuutosta, eikä esimerkiksi huomioi taloudellisia näkökulmia tuotteen elinkaareissa.

---

<sup>25</sup> ISO 14067:2018

<sup>26</sup> Suomen Ympäristökeskus. Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaariklinikatoimintamallista pk-yrityksille.

Standardin mukaisessa hiilijalanjälkilaskennassa tuotteen kasvihuonepäästöt on osoitettava siihen elinkaaren vaiheeseen, jossa päästöt tapahtuvat, jotta vältytään päällekkäisyyksiltä.

Standardin mukaisella hiilijalanjälkilaskennalla voidaan edesauttaa hiilijalanjäljen tason seuranta ja saada parempaa ymmärrystä siitä, missä kohtaa elinkaarta tuotteen suurimmat päästöt syntyvät. Näiden tietojen valossa on helpompaa lähteä myös vähentämään tuotteen kasvihuonepäästöjä, mikä tukee vähähiilistä ja kestävää taloutta. Standardin avulla hiilijalanjälkilaskentaa saadaan johdonmu-kaistettua, mikä lisää myös laskennan tulosten luotettavuutta.<sup>27</sup>

#### **2.4 Hiilijalanjälkilaskennan tavoitteet ja tarkoitus**

Hiilijalanjälkilaskennan yleistavoite on selvittää tuotteen vaikutukset ilmastonlämpenemiseen hiilidioksidiekvivalentteina ilmaistuna laskemalla yhteen kaikki tuotteen elinkaaren merkittävät kasvihuonepäästöt. Samalla voidaan selvittää määrällisesti, missä kohtaa muuntajan elinkaarta suurimmat päästöt syntyvät.<sup>28</sup>

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena rakentaa Excel-laskentatyökalu, jolla voidaan selvittää uuden muuntajan hiilijalanjälki. Tavoitteena on, että laskentatyökalun avulla voidaan tuottaa Hitachi Energyn asiakkaille räätälöityä tietoa juuri heidän muuntajansa hiilijalanjäljestä. Työkalun avulla voidaan myös hahmottaa selkeämmin, miten muuntajassa käytön aikana syntyvät häviöt vaikuttavat sen hiilijalanjälkeen.

---

<sup>27</sup> ISO 14067:2018

<sup>28</sup> ISO 14067:2018

### 3 MUUNTAJAN PERUSTEET

Sähköenergiaa tuottavien voimalaitosten sijainti määräytyy pääasiassa ympäristötekijöiden mukaan. Esimerkiksi vesivoimalaitokset on sijoitettava koskien varsille ja runsaasti lauhdevettä tarvitsevat suuret voimalaitokset sopivien vesistöjen äärelle. Mahdolliset sijoituspaikat ovat yleensä kaukana sähkön kulutuspisteistä, joten sähkön tuotanto ja käyttö on yhdistettävä toisiinsa sähköverkolla.

Muuntajan tehtävä on muuntaa jännitettä sähköverkossa korkeammaksi tai matalammaksi. Jotta sähköverkossa syntyvät häviöt pystytään pitämään mahdollisimman pieninä, jännitetasot tulee sovittaa siirrettävän tehon ja etäisyyden mukaan. Suomessa sähköverkot jaetaan jännitetason perusteella siirto- ja jakeluverkkoihin, joista siirtoverkossa jännitteet ovat 400, 220 ja 110 kilovoltia. Jakeluverkkoon taas kuuluvat keski- ja pienjänniteverkot. Keskijännite on useimmiten Suomessa 20 kilovoltia ja pienjänniteverkossa 400 voltia.<sup>29</sup>

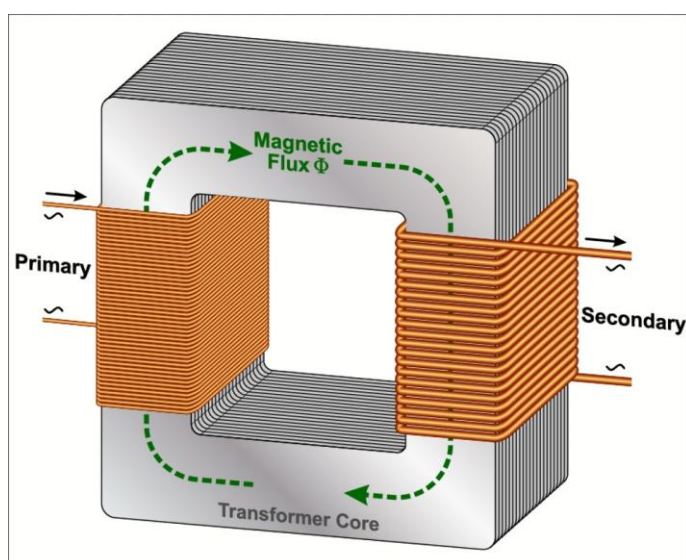
#### 3.1 Muuntajan toimintaperiaate

Muuntajan ydin koostuu rautasydäimestä ja käämityksistä. Käämityksiä on vähintään kaksi, joista toinen on ensiökäämi, johon teho syötetään ja toinen taas toisiokäämi, josta teho tulee ulos. Muuntajan suurinta jännitettä kutsutaan yläjännitteeksi ja pienempää jännitettä alajännitteeksi, joita voi erikoismuuntajissa olla useita. Yläjännitekäämitys on useimmiten ensiöpuoli.

---

<sup>29</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.

Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Ensiökäämiin kytetään vaihtojännite, jolloin rautasydämeen saadaan muuttuva magneettivuo. Samalla sydämellä olevaan toisiokäämiin indusoituu jännite, kun magneettivuo lävistää sen. Kuvassa 1 esitettynä muuntajan rautasydän ja magneettivuo. Ensiökäämi magnetoi rautasydämen ja toisiokäämiin indusoituu jännite suhteessa kierrosmääriin.<sup>30</sup>



**Kuva 1.** Muuntajan sydän ja käämit<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.

<sup>31</sup> Nicore.

### 3.2 Muuntajan rakenne

Muuntajan perusrakenne on pysynyt keksimisestään asti, yli sadan vuoden ajan, pääpiirteittäin samanlaisena. Sen aktiiviosa koostuu sydäimestä, käämeistä, eristeosista sekä sisäisestä johdotuksesta. Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti muuntajan yleisimpien osien materiaaleja ja rakennetta.

Muuntajan sydän koostuu pylväistä, (yleensä kaksi tai kolme kappaletta yhdessä muuntajassa) jotka ladotaan rautalevystä sekä ala- ja yläikeistä, joiden tehtävä on yhdistää pylväät toisiinsa. Rautalevy on valmistettu niin kutsutusta kidesuunnasta levystä, eli magneettivuo pääsee kulkemaan helposti levyn pituussuunnassa, mutta kohtaa suuren vastuksen poikittaissuunnassa. Rautalevyt tulevat tehtaalle toimittajalta ja ne leikataan muuntajatehtaalla oikean kokoiseksi ennen latomista. Valmiiksi ladotut sydänpylväät päällystetään lopuksi lakalla tai liimalla, mikä parantaa sydämen lujuutta. Sydämen poikkipinta-ala riippuu siitä, kuinka suuri tehoinen muuntaja on kyseessä.

Kuten edellä on mainittu, muuntajassa on aina vähintään kaksi käämitystä, ylä- ja alajännitekäämitys. Erikoimuuntajissa voi olla useampia alajännitekäämityksiä, kun taas yläjännitekäämin jatkeeksi on voitu lisätä säätökäämi, joka mahdollistaa muuntajan jännitteensäädön. Käämit valmistetaan puhtaasta kuparista tai sähköalumiinista. Niiden rakenne riippuu muuntajan tehosta ja käämin jännitteestä sekä virrasta. Hitachi Energyn tehtaalla Vaasassa käytetään pääasiassa nauhakäämejä, kerroskäämejä, laippakäämejä, ruuvikäämejä ja lieriökäämejä.

Muuntajan sydän eristetään kiinteillä eristeillä, eli paperilla tai prespaanilla. Eristysaineista prespaania käytetään myös tukirakenteissa puun lisäksi. Vaasan tehtaalla valmistettavissa muuntajissa käytetään lisäksi nestemäistä eristettä, muuntajaöljyä, joka toimii eristeen lisäksi jäähdytysaineena. Öljy on useimmiten mineraaliöljyä, mutta myös synteettistä ja luonnon esteriä käytetään. Öljyn imeytyessä

paperiin saadaan hyvä eristerakenne ja yhdessä käytettynä ne kestävätkin suurempaa jänniterasitusta, kuin erikseen.

Muuntajan aktiiviosa lasketaan valmistusvaiheessa säiliöön, joka täytetään öljyllä. Aktiiviosan on oltava kokonaan öljyn peitossa. Öljysäiliön lisäksi muuntajan säiliö toimii kantavana runkona aktiiviosalle sekä jäähdyttimenä muuntajalle. Vaasan tehtaalla käytetään kahdenlaisia säiliöitä; aaltolevy- ja radiaattorisäiliöitä. Aaltolevysäiliö valmistetaan 1,25 millimetrin paksuisesta teräslevystä, mikä muotoillaan aaltoelementeiksi. Elementit yhdistetään kokoonpanossa pohjalaatikkoon ja kaulavanteeseen. Hermeettisessä, eli ilmatiiviisti suljetussa muuntajassa, teräslevyn aaltoelementit joustavat öljyn tilavuuden kasvaessa. Aaltolevysäiliöihin voidaan lisätä myös erillinen paisuntasäiliö, joka toimii öljyn paisuntatilana. Jos tarvitaan tehokkaampaa lämmön poistoa, käytetään radiaattorisäiliötä. Radiaattorisäiliö valmistetaan 8-10 millimetrin paksuisista teräslevyseistä, 20 millia paksusta pohjasta ja 16-22 millia paksusta kaulavanteesta, jotka hitsataan yhteen. Näissä säiliöissä on myös erilliset jäähdyttimet, yleensä radiaattorit.



**Kuva 2.** Hermeettinen aaltolevymuuntaja<sup>32</sup>



**Kuva 3.** Radiaattorimuuntaja<sup>33</sup>

Muuntajan kytkeminen sähköverkkoon tapahtuu läpivientien kautta, jotka sijoitetaan yleensä muuntajan kannelle, mutta toisinaan myös muuntajan kylkeen. Läpivientejä on olemassa erityyppisiä, mutta yleisimpiä niistä ovat posliiniläpiviennit, joiden sisällä on kupari- tai messinkitanko. Yli 52 kilovoltin jännitteissä käytetään kondensaattoriläpivientejä, joiden sisällä on kuparitanko tai johto suojausputkessa. Suojausputken ulkopuolella, posliinikuoren sisässä, on paperista valmistettuja eristekerroksia, jotka on kyllästetty muuntajaöljyllä.<sup>34</sup>

---

<sup>32</sup> Hitachi ABB Power Grids. Ground-mounted distribution transformers.

<sup>33</sup> Hitachi ABB Power Grids. Large-Medium distribution transformers.

<sup>34</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.



**Kuva 4.** Posliiniläpivienti<sup>35</sup>

Läpivientien ja käämien välillä kulkee virtaa kuljettava sisäinen johdotus. Johdotukset on useimmiten tehty kuparikaapelista, mutta suurivirtaisissa alajännitekeskityksissä voidaan käyttää kuparikiskoa, jotta saadaan riittävä johdinpoikkipinta-ala ja oikosulkulujuus.

Riippuen muuntajasta, siihen voidaan lisätä myös erilaisia lisävarusteita, kuten kaasurele, lämpömittari tai radiaattoreita. Näiden osien rakennetta ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä tarkemmin, koska niiden osuus muuntajan materiaalien hiilijalanjäljestä jää hyvin pieneksi ja niitä lisätään vain tiettyihin muuntajiin.<sup>36</sup>

---

<sup>35</sup> Hitachi ABB Power Grids. AC Bushings type GOB

<sup>36</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.



### 3.3 Muuntajan häviöt

Muuntajasta saatava nimellisteho on sisään tulleesta tehosta vähennettynä muuntajan sisäiset häviöt. Muuntajan häviöt muuttuvat lämmöksi, jolloin hukataan sähköenergiaa. Häviön suuruudet ovat normaalisti noin 0,5-1 prosenttia nimellistehosta ja ne voidaan jakaa tyhjäkäynti- ( $P_0$ ) ja kuormitushäviöihin ( $P_k$ ).

Tyhjäkäyntihäviötä syntyy aina, kun muuntaja on kytketty jännitteelliseen verkkoon, vaikka siihen ei kohdistuisikaan kuormitusta. Tyhjäkäyntihäviöt syntyvät pääasiassa rautasydämessä. Kuormitushäviöt taas ovat riippuvaisia muuntajan kuormituksesta ja ne syntyvät käämeissä. Muuntajan käytön aikaisia häviöitä voidaan vähentää materiaaliratkaisuilla, mutta ne tarkoittavat asiakkaalle suurempia materiaalikustannuksia. Tyhjäkäyntihäviöihin vaikuttaa sydänlevyjen materiaali ja laatu, eli miten hyvin ne on valmistettu, leikattu ja ladottu. Myös vuontiheyksillä voidaan vähentää tyhjäkäyntihäviöitä – mitä pienempi vuontiheys, sitä pienemmät häviöt. Kuormitushäviöitä voidaan pienentää laskemalla virtatiheyttä, eli lisäämällä johtimien poikkipinta-alaa. Lisäksi sydämen halkaisijaa ja korkeutta muuttamalla voidaan optimoida tyhjä- ja kuormitushäviöiden suuruutta ja niiden välistä suhdetta.

Häviöiden vaikutuksesta syntyvä lämpöhäviö poistetaan muuntajasta eristysnesteen ja jäähdyttimien avulla. Muuntajien eristysnesteenä on useimmiten mineraaliöljyä tai synteettistä eristysnestettä, jonka syttymislämpötila on korkeampi, vähintään 300 Celsiusastetta. Eristysneste voi kiertyä muuntajassa luonnollisesti tai pakotetusti esimerkiksi pumpuilla. Lisäksi muuntajan ulkoinen jäähdytysaine voi

vaihdella ilman tai veden välillä, jotka voivat myös kiertää joko luonnollisesti tai pakotetusti esimerkiksi tuulettimien avulla.<sup>37</sup>

### 3.4 Energiatehokkuus

Verrattuna muihin sähkölaitteisiin muuntajat ovat erittäin energiatehokkaita yli 99 prosentin hyötysuhteellaan. Hyötysuhdetta on kuitenkin edelleen järkevää parantaa, koska muuntajien valtavan määrän vuoksi jo pienikin kehitys näkyy merkittävänä energian säästönä. Muuntajia koskevat vaatimukset on määritelty EU:n laa- timassa ekodirektiivissä, jonka tarkoituksena on parantaa muuntajien hyötysuh- detta sekä vähentää häviöitä ja samalla lisätä energiatehokkuutta.

Ekosuunnitteludirektiivin ensimmäinen vaihe, Tier 1, on ollut voimassa vuodesta 2015 lähtien. Asetusta päivitettiin vuoden 2021 heinäkuussa toisella vaiheella, (Tier 2) jonka vaatimukset määriteltiin jo samaan aikaan Tier 1:n kanssa. Direktiivi koskee sellaisten muuntajien markkinoille saattamista ja käyttöönottoa, joiden vä- himmäisteho on 1 kVA ja joita käytetään 50 Hz:n sähkönsiirto- ja jakeluverkoissa. Asetusta sovelletaan vain muuntajiin, jotka on hankittu 11.6.2014 jälkeen. Muun- tajien maahantuojiin ja valmistajien tulee varmistaa, että EU:n sisäisille markki- noille tuodaan vain direktiivin vaatimukset täyttäviä tuotteita. Joissain tilanteissa muuntajalle, joka ei täytä toisen vaiheen vaatimuksia, voidaan kuitenkin hakea poikkeuslupaa. Poikkeusluvan voi saada esimerkiksi sen takia, että uusi päivitetty muuntaja ei mahdu edellisen tilalle vanhalle sähköasemalle ja aiheuttaa näin koh- tuuttoman suuret kustannukset. Toisen vaiheen vaatimuksia ei tarvitse noudattaa

---

<sup>37</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.

myöskään siinä tapauksessa, jos Tier 1:n mukainen muuntaja on ostettu esimerkiksi sähköyhtiön varastoon ennen vuoden 2021 heinäkuuta.<sup>38 39</sup>

Sähkön tuotantopaikan ja lopullisen kulutuspaikan välillä on keskimäärin 4-5 muuntajaa, jolloin muuntajat voivat kuluttaa lähes 5 prosenttia maailmanlaajuisesti tuotetusta sähköstä häviöiden kautta. Osana ratkaisua Hitachi Energy on tuonut markkinoille EconiQ-muuntajia, joiden tarkoitus on edistää kestävämpiä energiaratkaisuja. Näiden muuntajien suunnittelussa hyödynnetään muun muassa elinkaariarviointia ja kiinnitetään huomiota myös materiaalien vastuulliseen käyttöön sekä luonnollisesti häviöiden pienentämiseen. EconiQ-muuntajan hiilijalanjäljen on laskettu olevan 23 prosenttia pienempi verrattuna tavalliseen muuntajaan.<sup>40 41</sup>

---

<sup>38</sup> Heino, T. 2020.

<sup>39</sup> EUR-Lex. 2014.

<sup>40</sup> Hitachi Energy lanseeraa EconiQ-muuntajia edistämään kestäväää energiatulevaisuutta kaikille. 2021.

<sup>41</sup> Hitachi Energy. EconiQ Transformers. Decarbonization.

## **4 MUUNTAJAN HIILIJALANJÄLJEN LASKEMINEN**

Muuntajan hiilijalanjäljen selvittämiseksi rakennettiin laskentatyökalu Exceliin, jota voidaan myöhemmässä vaiheessa myös päivittää tarpeen vaatiessa esimerkiksi päästökertoimien osalta. Työkalu rakennettiin niin, että sillä olisi jatkossa vaivatonta laskea erilaisten muuntajien päästöjä. Laskentaa rajattiin sulkemalla ulos sellaiset päästölähteet, joilla olisi ollut lopputulokseen hyvin pieni vaikutus ja joita olisi ollut haastavaa määrittää tarkasti.

### **4.1 Laskennan rajaaminen**

Muuntajan hiilijalanjäljen laskenta aloitettiin rajaamalla laskettavat päästölähteet. Valmistusvaiheessa laskuista rajattiin ulos materiaalihävikin syntyminen ja materiaalien kuljettaminen tehtaalle, koska niiden osuus hiilijalanjäljestä olisi jäänyt pieneksi. Lisäksi olisi ollut vaikeaa määrittää materiaalikuljetusten etäisyyksiä ja kuljetuskalustoa, koska materiaaleja toimitetaan Vaasan tehtaalle monista vaihtelevista kohteista ja eri toimittajilta. Käytönaikaisista päästölähteistä rajattiin ulos mahdolliset huollon päästöt, esimerkiksi työntekijän kulkeminen muuntajan sijaintiin, koska nekään eivät olisi vaikuttaneet juurikaan lopputulokseen. Muuntajan hävitysvaiheen päästöistä rajattiin myöskin kierrätettävien materiaalien kuljettaminen jatkokäsittelyyn, koska kuljetukset sijoittuvat erinäisiin kohteisiin. Lisäksi kuljetuksen päästöt voidaan tulkita kuuluvaksi kierrätyksestä vastaavalle yritykselle.

### **4.2 Excel-laskentatyökalun rakentaminen**

Muuntajan hiilijalanjäljen selvittämiseksi rakennettiin Excel-laskentatyökalu, johon voidaan sijoittaa muuntajaa koskevat tiedot. Työkalu rakennettiin niin, että sitä on helppoa käyttää myös myöhemmin eri muuntajien hiilijalanjäljen laskemiseen. Eri elinkaaren vaiheet jaettiin kolmelle välilehdelle, jotka ovat Valmistus,

Käyttö ja Käytöstä poisto. Näille välilehdille laskurin käyttäjä sijoittaa laskentaan tarvittavat tiedot, jotka vaihtelevat muuntajakohtaisesti.

Valmistusta koskevat taulukot rakennettiin koskemaan materiaalien päästöjä sekä tehtaan energian-, kaukolämmön- ja vedenkulutusta. Sähkön ja kaukolämmön kulutuksessa huomioitiin erilaiset energiantuotantomuodot ja niitä varten tehtiin pudotusvalikko, josta käyttäjä voi valita sopivimman vaihtoehdon. Lisäksi laskuriin on mahdollista täyttää toimittajan antama tietty päästökerroin koskien kaukolämpöä ja sähköä, jolloin laskennasta voidaan tehdä tarkempi. Käyttö-välilehdelle koottiin taulukot, jotka koskevat valmiin muuntajan kuljettamista kohteeseen, sekä käytön aikaisista häviöistä syntyviä päästöjä. Häviöiden kuluttaman energian päästöissä on valmistuksen tapaan lisätty pudotusvalikko, jossa voidaan valita muuntajan käyttämä energiatyyppi tai lisätä valmistajan antama tarkka päästökerroin. Muuntajan käytöstä poiston päästöihin huomioitiin vain kierrätyksestä syntyvät päästöt pois lukien aikaisemmin mainittu kuljetus jatkokäsittelyyn.

Lisäksi laskuriin lisättiin Ohjeet-, Hiilijalanjälki- ja Päästökertoimet-välilehdet. Näiden välilehtien on tarkoitus selventää laskurin käyttöä, jotta sitä olisi yksinkertaista käyttää myöhemmin. Koko hiilijalanjälkilaskennan yhteenveto on koottuna Hiilijalanjälki-välilehdelle, jossa päästöt ilmoitetaan myös yhtä muuntajakiloa sekä kilovolttiampeeria kohden. Välilehdellä tulokset esitetään myös diagrammeissa, jotta hiilijalanjälkeä on helpompi hahmottaa. Lopuksi Excel-laskuriin lisättiin välilehti, johon on koottu kaikki päästökertoimet lähteineen, jotta kertoimien ajan-kohtaisuus voidaan tarkastaa.

#### **4.2.1 Päästökertoimet**

Työkalua varten päästökertoimia kerättiin useista eri lähteistä. Muuntajan materiaaleja koskevien kertoimien selvittäminen aloitettiin kysymällä arvoja suoraan

materiaalintoimittajilta. Niitä oli kuitenkin saatavilla niukasti, joten lopulta suurimaksi osaksi päädyttiin käyttämään internetlähteitä. Päästökertoimet valittiin niin, että ne vastaisivat muuntajan materiaaleja. Tehtaan sähköä ja kaukolämpöä koskevia kertoimia kerättiin useampia, jotta laskuria voidaan mahdollisesti käyttää myös muilla, kuin Vaasan muuntajatehtaalla. Tässä opinnäytetyössä esitellyissä laskuissa käytetään kuitenkin sähkön- ja kaukolämmön toimittajan ilmoittamaa tarkkaa päästökerrointa, joka pätee Vaasan tehtaaseen. Tehtaalla on siirrytty vuonna 2021 uusiutuvaan energiaan, jonka päästökerroin on 0 kgCO<sub>2</sub>ekv/MWh. Muuntajat, joille hiilijalanjälki laskettiin, on valmistettu kuitenkin ennen tätä, joten kertoimena käytetään vielä 277 kgCO<sub>2</sub>ekv/MWh.<sup>42</sup>

Valmiin muuntajan kuljetuksen päästöihin kertoimet on otettu LIPASTO-päästötietokannasta, joka on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n toteuttama ja ylläpitämä.<sup>43</sup> Tietokanta kattaa työssä tarvittujen tie- ja vesiliikenteen päästöarvot. Muuntajan käytössä syntyvien häviöiden päästökertoimia kerättiin useampia tehtaan energiankäytön tapaan. Päästökerroin valitaan sen mukaan, mikä kuvaa parhaiten muuntajan sijainnissa käytettävää sähköä.

Materiaalien kierrätyksestä koskevat päästökertoimet kerättiin Y-HIILARI-hiilijalanjälkilaskurista,<sup>44</sup> jossa kertoimien arvot kuvaavat kierrättämisestä syntyviä päästöjä sekä osaksi Suomen ympäristökeskuksen rakentamisen päästötietokannasta.<sup>45</sup> Lisäksi laskurissa huomioitiin mahdollinen negatiivinen päästökerroin, joka saavute-

---

<sup>42</sup> ABB. 2020.

<sup>43</sup> Teknologian Tutkimuskeskus VTT.

<sup>44</sup> Suomen Ympäristökeskus.

<sup>45</sup> Rakentamisen päästötietokanta.

taan materiaalien uusiokäytöllä. Kertoimet on tarkoitettu alun perin rakennusmateriaaleille, mutta tietokannasta valittiin arvot, jotka kuvaavat mahdollisimman hyvin myös muuntajan materiaalien uusiokäyttöä, jotta saataisiin arvio negatiivisista päästöistä.

### 4.3 Tulosten laskeminen

Hiilijalanjäljen laskeminen tapahtuu kertomalla esimerkiksi kulutetun materiaalin määrä, käytetty energia tai kuljettu matka niiden päästökertoimilla. Hiilijalanjälki esitetään hiilidioksidiekvivalentteina ja massan ilmoittamiseen voidaan käyttää grammoja, kiloja tai tonneja. Tässä työssä hiilijalanjälki ilmoitetaan kilogrammoina. Käytetyt kaavat 1–4 on esitetty alla.

Materiaalin päästöt (kgCO<sub>2</sub>ekv.):

$$\text{Materiaalin massa (kg)} * \text{materiaalin päästökerroin (kgCO}_2\text{ekv./kg)} \quad (1)$$

Energian päästöt vuodessa (kgCO<sub>2</sub>ekv.):

$$\text{Vuoden energian kulutus (MWh)} * \text{energian päästökerroin (kgCO}_2\text{ekv./MWh)} \quad (2)$$

Vedenkulutuksen päästöt vuodessa (kgCO<sub>2</sub>ekv.):

$$\text{Vuoden vedenkulutus (m}_3\text{)} * \text{veden päästökerroin (kgCO}_2\text{ekv./m}^3\text{)} \quad (3)$$

Kuljetuksen päästöt tonnakilometrejä kohden (kgCO<sub>2</sub>ekv.):

$$(\text{kuljetut matkat (lkm)} * \text{kuorma matkaa kohden (t/lkm)} * \text{ajetut km yhteen suuntaan (km)}) * \text{kuljetuksen päästökerroin (kgCO}_2\text{ekv./}$$

tkm)

(4)

Seuraavien kappaleiden laskuissa on laskettu hiilijalanjälki muuntajalle, jonka nimellisteho on 63 MVA ja sen käämin ollessa keskiasennossa häviöt ovat 160 kW. Muuntajan eristeöljynä on mineraaliöljyä ja käämit on valmistettu kuparista alumiinin sijaan. Muuntajan käyttöiän pituudeksi arvioitiin 30 vuotta.

#### 4.3.1 Muuntajan materiaalit

Laskuriin eriteltiin muuntajan materiaaleista rauta, sydänteräs, kupari, alumiini, prespaani, eristepaperit, puristepuu ja mineraaliöljy sekä luonnollinen- ja synteettinen esteri. Laskennassa käytetyt massat on esitetty tarkemmin liitteessä 1. Muuntajan rakenteesta riippuen siinä käytetään vain osaa edellä mainituista materiaaleista. Muuntajan materiaalien massat saatiin Hitachi Energyltä muuntajaa koskevassa laskelmassa, jossa ne on esitetty kiloittain. Materiaalien hiilijalanjälki laskettiin kaavan 1 mukaisesti. Alla on esimerkkinä laskettu rautaosien hiilijalanjälki, joka koostuu muuntajan säiliöstä, radiaattoreista, puristuspalkeista, liitostangoista ja muista ulkoisista metalliosista.

$$19357,1 \text{ kg} * 2,5 \text{ kgCO}_2\text{ekv/kg} = 48\,392,75 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}$$

Kaikkien materiaalien hiilijalanjäljet laskettiin samalla periaatteella, jolloin niiden yhteenlasketuksi hiilijalanjäljeksi saatiin 216 791 kgCO<sub>2</sub>ekv.

Taulukossa 2 on esitetty laskuissa käytetyt päästökertoimet lähteineen, joita materiaalien hiilijalanjäljen laskennassa käytettiin.



**Taulukko 2.** Päästökertoimet materiaaleille

<b>Materiaali</b>	<b>Päästökerroin kgCO<sub>2</sub>ekv./kg</b>	<b>Lähde</b>
Rauta (muuntajan säiliö, radiaattorit, puristuspalkit, liitostangot, muut ulkoiset metalliosat)	2,50	Keskiarvo rautaosille, joita käytetään Hitachi Energyn tuotteissa. <sup>46</sup>
Rauta (sydänteräs)	2,77	Keskiarvo sydänteräkselle, jota käytetään Hitachi Energyn tuotteissa. <sup>47</sup>
Kupari	4,74	Keskiarvo kupariosille, joita käytetään Hitachi Energyn tuotteissa. <sup>48</sup>
Prespaani	0,82	Keskiarvo paperieristeille, joita käytetään Hitachi Energyn tuotteissa. <sup>49</sup>
Puristepuu	0,60	Röchling Groupin päästökerroin yhdelle kilolle raakamateriaalia <sup>50</sup>
Paperi	0,82	Keskiarvo paperieristeille, joita käytetään Hitachi Energyn tuotteissa. <sup>51</sup>

**4.3.2 Tehtaan energian ja veden kulutus**

Tehtaan kuluttaman sähkön, kaukolämmön ja veden määrät saatiin Hitachi Energyltä Excel-tiedostona, josta kävi ilmi vuosittainen kulutus. Tehdas käytti vuodessa 8083 MWh sähköä ja 7918 MWh kaukolämpöä. Lisäksi tiedossa oli toimittajakoh-

---

<sup>46</sup> Kulasek, K.

<sup>47</sup> Kulasek, K.

<sup>48</sup> Kulasek, K.

<sup>49</sup> Kulasek, K.

<sup>50</sup> Röchling Group's Carbon Emissions

<sup>51</sup> Kulasek, K.

taiset päästökertoimet molemmille, joita käytettiin laskennassa. Sähkön ja kaukolämmön kulutus laskettiin kaavalla 2. Alla laskettu vuosittain kulutetun sähkön hiilijalanjälki.

$$8083 \text{ MWh} * 277,25 \text{ kgCO}_2\text{ekv./MWh} = 2\,238\,991 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}$$

Jotta voidaan selvittää muuntajakohtainen energiankulutus pitää koko tehtaan kuluttaman energian hiilijalanjälki jakaa vuodessa tuotetuille muuntajakiloilla, jolloin saadaan päästöt yhtä kiloa kohden:

$$\frac{2238991 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}}{10281435 \text{ kg}} = 0,21777 \text{ kgCO}_2\text{ekv./kg}_{\text{muuntaja}}$$

Kilokohtainen päästö kerrotaan valmistettavan muuntajan painolla ja saadaan yhden muuntajan valmistamiseen kulutetun sähkön hiilijalanjälki:

$$0,21777 \text{ kgCO}_2\text{ekv.} * 80600 \text{ kg} = 17\,552 \text{ kgCO}_2\text{ekv./muuntaja}$$

Muuntajakohtainen kaukolämmönkulutus laskettiin samaan tapaan ja sen hiilijalanjäljeksi saatiin 4779,6 kgCO<sub>2</sub>ekv/muuntaja.

Tehtaan käyttöveden kulutus vuodessa oli 3802 m<sup>3</sup>. Veden päästökertoimena käytettiin internetlähteestä löytynyttä arvoa, jonka voidaan olettaa vastaavan Vaasan käyttövettä.<sup>52</sup> Koko tehtaan vuoden vedenkulutuksen hiilijalanjälki laskettuna alla:

$$3802 \text{ m}^3 * 0,69 \text{ kgCO}_2\text{ekv./m}^3 = 2623,38 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}$$

---

<sup>52</sup> Tolvanen, K.

Energiankulutuksen tavoin laskettiin yhden muuntajan valmistamiseen käytetyn veden hiilijalanjälki, jolloin arvoksi saatiin 20,6 kgCO<sub>2</sub>ekv/muuntaja. Laskuihin va-  
littavissa olevat päästökertoimet lähteineen esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Päästökertoimet energialle ja vedelle

Päästökertoimet energialle	Päästökerroin kgCO <sub>2</sub> ekv./MWh	Lähde
Uusiutuvasti tuotettu sähkö	0	OpenCO <sub>2</sub> -sivuston kerroin uusiutuvasti tuotetulle sähkölle. <sup>53</sup>
Keskimääräinen sähkö, Suomi	131	Keskiarvo sähkölle Suomessa <sup>54</sup>
Keskimääräinen sähkö, EU	285	Keskiarvo sähkölle Euroopassa. <sup>55</sup>
Uusiutuvasti tuotettu kaukolämpö, Suomi	0	Uusiutuvasti tuotetun kaukolämmön päästökerroin, Helen Oy. <sup>56</sup>
Keskimääräinen kaukolämpö, Suomi	148	Keskiarvo kaukolämmölle Suomessa <sup>57</sup>
Vesi	0,69	Tampereen korkeakoulu-yhteisön hiilijalanjälki-laskennassa käytetty käyttövedenkerroin. <sup>58</sup>

#### 4.3.3 Muuntajan toimittaminen kohteeseen

Muuntaja toimitetaan Suomeen keskimäärin noin 400 km päähän Vaasan muuntajatehtaasta. Yleensä kotimaahan toimitetut muuntajat kuljetetaan täysperävaunuyhdistelmällä, jonka kokonaismassa on 60 tonnia. Tämän lisäksi kuljetukseen useimmiten kuuluu 1-3 puoli- tai täysperävaunullista muuntajan tarvikkeita, jotka

<sup>53</sup> OpenCO<sub>2</sub>.

<sup>54</sup> Federley, J.

<sup>55</sup> European Environment Agency.

<sup>56</sup> Helen.fi.

<sup>57</sup> Federley, J.

<sup>58</sup> Tolvanen, K.

liitetään muuntajaan vasta paikan päällä.<sup>59</sup> Kyseisen muuntajan massa on 80 600 kg, joten voidaan tehdä oletus, että kuljetukseen tarvitaan kolme täysperävauunuyhdistelmää (kantavuus 40 t). Kuljetuksen päästöt lasketaan kaavan 4 mukaan. Päästökertoimena käytettiin VTT Lipaston päästötietokannasta löytyvää arvoa, joka kuvaa päästöjä, kun kuljetus toteutetaan täysperävauunuyhdistelmällä, jonka kokonaispaino on 60 tonnia, maantieajossa ja 70 prosentin osakuormalla. Päästökerroin on keskiarvo vuoden 2016 liikenteessä olevasta kalustosta.<sup>60</sup>

$$(3 * 26,87 \text{ t} * 400 \text{ km}) * 39 \text{ gCO}_2\text{ekv./tkm} = 1\,257\,360 \text{ gCO}_2\text{ekv.}$$

Tulos ilmoitetaan kiloina, jolloin kuljetuksen hiilijalanjälki on 1 257 kgCO<sub>2</sub>ekv/muuntaja.

#### 4.3.4 Häviöt

Muuntajan häviöt ilmoitettiin yritykseltä saadussa teknisessä erittelyssä. Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ( $P_0$ ) ovat 25,6 kW ja kuormitushäviöt ( $P_k$ ) 152 kW. Tyhjäkäyntihäviöiden laskeminen aloitettiin selvittämällä vuodessa syntyvien häviöiden määrä ja muuttamalla se megawattitunneiksi:

$$\frac{25,6 \text{ kW} * 24\text{h} * 365}{1000} = 224,256 \text{ MWh/a}$$

---

<sup>59</sup> Rintala. 2021.

<sup>60</sup> Teknologian tutkimuskeskus VTT.

Tyhjäkäyntihäviöiden hiilijalanjäljen laskemiseen hyödynnettiin kaavaa 2 ja vuodessa syntyvät tyhjäkäyntihäviöt kerrottiin Suomen keskimääräisen sähkön päästökertoimella, joka on esitetty myös taulukossa 3.<sup>61</sup>

$$\begin{aligned} 224,256 \text{ MWh/a} * 131 \text{ kgCO}_2\text{ekv./MWh} \\ = 29\,377,536 \text{ kgCO}_2\text{ekv./muuntaja/vuosi} \end{aligned}$$

Muuntajan käyttöiäksi arvioitiin tässä laskussa 30 vuotta, joten vuosittaiset tyhjäkäyntihäviöt tulee kertoa kolmellakymmenellä:

$$29377,536 \text{ kgCO}_2\text{ekv.} * 30 = 881\,326,08 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}$$

Kuormitushäviöt ovat riippuvaisia muuntajaan kohdistetusta kuormituksesta, mikä pitää huomioida myös laskuissa.<sup>62</sup> Suomessa sähköverkkomuuntajien kuormitusaste on tyyppillisesti noin 50 %, mitä käytetään myös tämän muuntajan kuormituskertoimena. Vuosittaiset kuormitushäviöt ( $P_k$ ) saadaan seuraavalla yhtälöllä:

$$P_k/a = (\text{kuormituskerroin}^2) * P_k \text{ (kW)} * 24 \text{ h} * 365 \quad (5)$$

Eli esimerkkimuuntajan tapauksessa vuosittaiset kuormitushäviöt ovat:

$$\frac{(0,5^2) * 152 \text{ kW} * 24\text{h} * 365}{1000} = 332,88 \text{ MWh}$$

---

<sup>61</sup> Federley, J.

<sup>62</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.

Kuormitushäviön hiilijalanjälki lasketaan tyhjäkäyntihäviöiden tapaan, jolloin hiilijalanjäljeksi saadaan 1 308 218,4 kgCO<sub>2</sub>ekv. Muuntajan häviöistä yhteensä syntyvät päästöt saadaan, kun tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt lasketaan yhteen, jolloin arvoksi saadaan 2 189 544 kgCO<sub>2</sub>ekv.

#### 4.3.5 Muuntajan kierrättäminen

Muuntajan kierrättämisestä syntyvien päästöjen laskemisessa jätelajit on jaettu samoin, kuin materiaalien päästöissäkin, paitsi rauta ja teräs on yhdistetty samaksi jätelajiksi (metalli). Lisäksi tahdottiin selvittää, paljonko voidaan saavuttaa negatiivisia päästöjä, kun materiaalit uusiokäytetään. Tätä varten käytettiin rakentamisen päästötietokantaa, jossa on kerätty eri rakennusmateriaalien negatiiviset päästökertoimet. Tietokannasta valittiin kertoimet, jotka vastaisivat parhaiten muuntajan materiaaleja. Kaikille materiaaleille ei kuitenkaan ole mahdollista käyttää negatiivista päästökerrointa, joten esimerkkimuuntajan hiilijalanjäljessä negatiivisia päästöjä saavutettiin pelkästään metallin kohdalla. Päästökerroin, jota laskennassa käytettiin, kuvasi keskiarvoa, joka saavutetaan metallien uusiokäytöllä.<sup>63</sup> Esimerkkinä on laskettu metallin kierrättämisen päästöt ja negatiiviset päästöt. Aluksi tuli selvittää materiaalin uudelleenkäytettävä osuus, joka kerrotaan negatiivisella päästökertoimella. Metalleissa osuus on 95 %, eli siitä uusiokäytetään 47 914,39 kg.

$$\frac{50457,8 \text{ kg}}{100} * 95\% = 47\,914,39 \text{ kg}$$

---

<sup>63</sup> Häkkinen, T. Generic Data for Metals - Stainless steel

Tämän jälkeen hyödynnetään kaavaa 1 ja kerrotaan uudelleenkäytettävän osuuden paino negatiivisella päästökertoimella.

$$47914,39 \text{ kg} * 1,5 \text{ kgCO}_2\text{ekv./kg} = -71\,871,56 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}$$

Materiaalien päästöt laskettiin samalla tavalla, kuin negatiivisetkin päästöt, mutta kierrätyksen päästöt laskettiin koko materiaalin massalle, koska päästöjä aiheutuu aina, kun materiaaleja käsitellään. Metallia kierrätetään siis yhteensä 50 436,2 kg, jolloin kasvihuonekaasupäästöt metallin käsittelylle ovat:

$$50457,8 \text{ kg} * 0,024 \text{ kgCO}_2\text{ekv./kg} = 1210,99 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}$$

Kaikkien kierrätettävien jätelajien yhteenlaskettu hiilijalanjälki on 23 098,9 kgCO<sub>2</sub>ekv. Taulukossa 4 on esitetty laskuissa käytetyt päästökertoimet lähteineen.

#### Taulukko 4. Jätteiden päästökertoimet

Jätteet	Päästökerroin, kgCO <sub>2</sub> ekv./kg	Lähde
Rauta, teräs, metalli	0,024	Metallien kierrätyksen päästöt, Y-HIILARI laskuri <sup>64</sup>
Kupari	0,024	Metallien kierrätyksen päästöt, Y-HIILARI laskuri. <sup>65</sup>
Puu	0,14	Puun polton päästöt, Y-HIILARI laskuri <sup>66</sup>
Prespaani	0,05	Paperin kierrätys, Y-HIILARI laskuri <sup>67</sup>
Paperi	0,05	Paperin kierrätys, Y-HIILARI laskuri <sup>68</sup>
Mineraaliöljy	1,12	Muiden jätteiden poltto, Y-HIILARI laskuri <sup>69</sup>

<sup>64</sup> Suomen Ympäristökeskus. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu.

<sup>65</sup> Suomen Ympäristökeskus. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu.

<sup>66</sup> Suomen Ympäristökeskus. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu.

<sup>67</sup> Suomen Ympäristökeskus. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu.

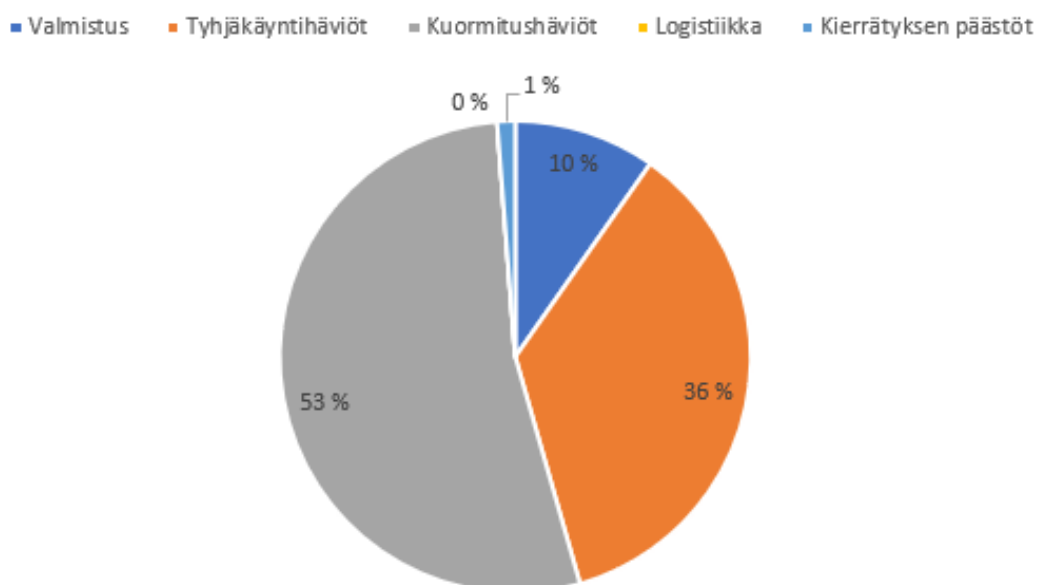
<sup>68</sup> Suomen Ympäristökeskus. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu.

<sup>69</sup> Suomen Ympäristökeskus. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu.

## 5 MUUNTAJAN HIILIJALANJÄLKI

Muuntajan hiilijalanjälki on luonnollisesti riippuvainen muuntajan tyypistä, materiaalivalinnoista ja käytöstä. Tässä kappaleessa esitetään hiilijalanjälkilaskennan tulokset edellä esitellylle muuntajalle, jonka nimellisteho on 63 MVA ja häviöt 160 kW käämin ollessa keskiasennossa. Jo ennen laskurin rakentamista pystyttiin päättelemään, että suurimmat päästöt syntyvät todennäköisesti käytönaikaisista häviöistä, mitä myös saadut tulokset lopulta tukivat, kuten voidaan nähdä kuvasta 5.

### Yhteenveto muuntajan päästöistä



**Kuva 5.** Muuntajan hiilijalanjälki

Kuvan 5 ympyrädiagrammista voidaan huomata, että yli puolet päästöistä syntyvät kuormitushäviöistä. Kuormitushäviöiden suuruuteen vaikuttaa muuntajan kuormitusaste, joka on tyypillisesti Suomen sähköverkossa olevalla muuntajalla noin 50 %, jota on myös tässä laskennassa käytetty kuormituskertoimena. Tyhjäkäyntihäviöitä taas syntyy aina, kun muuntaja on kytkettynä verkkoon. Kyseisen muuntajan häviöt ovat keskimääräistä hieman pienemmät, mikä pienentää myös

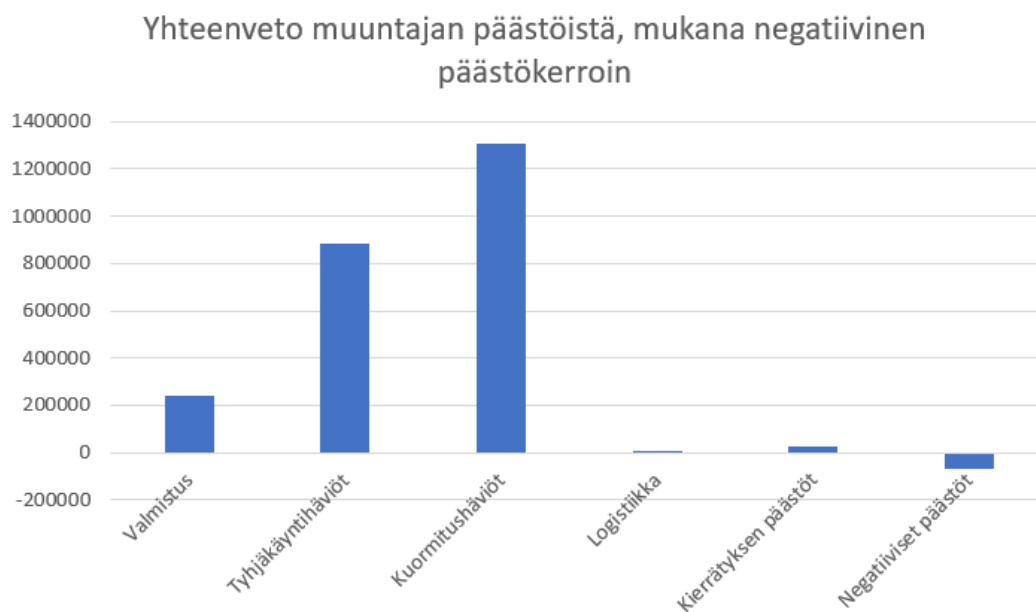


hiilijalanjälkeä. Häviöiden jälkeen eniten päästöjä syntyy valmistuksesta (materiaalit ja tehtaan energian- sekä vedenkulutus), joiden osuus kokonaisuudesta on 10 prosenttia. Tulee kuitenkin ottaa huomioon, että nykyisin Vaasan tehtaalla käytetään uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä, mikä laskee valmistuksen päästöjä entisestään myöhemmin toteutettavissa laskelmissa. Lisäksi materiaaleina on käytetty muun muassa kierrätysmetalleja, joiden päästökertoimet ovat neitseellistä materiaalia pienemmät.<sup>70</sup>

Kierrätyksen ja logistiikan päästöt ovat häviävän pienet verrattuna kokonaisuuteen. Kierrätyksen päästöjen osuutta pienentää entisestään materiaalien uudelleenkäytöllä saavutettu negatiivinen hiilijalanjälki, joka on esitetty kuvan 6 pylväsdiagrammissa.

---

<sup>70</sup> Rakentamisen päästötietokanta.



**Kuva 6.** Hiilijalanjälki pylvädiagrammilla

Muuntajan, jonka nimellisteho on 63 MVA ja häviöt 160 kW elinkaaren päästöt kokonaisuudessaan ovat 2 381 173 kgCO<sub>2</sub>ekv., kun mukaan on laskettu negatiiviset päästöt. Hiilijalanjälki on esitetty tonneina taulukossa 2, josta käyvät myös ilmi eri päästölähteiden hiilijalanjälkien suuruudet.

**Taulukko 5.** Muuntajan hiilijalanjälki lukuina

Päästölähde	tCO <sub>2</sub> ekv.
Valmistus	239,1
Tyhjäkäyntihäviöt	881,3
Kuormitushäviöt	1 308,3
Logistiikka	1,3
Kierrätyksen päästöt	23,1
Negatiiviset päästöt	-71,9
<b>KOKONAISPÄÄSTÖT</b>	<b>2 381,2</b>

Kokonaispäästöjen määrää on haastavaa tulkita, joten tulokset päätettiin myös ilmoittaa yhtä muuntajan kiloa kohden sekä kilovolttiampeeria kohden. Kiloa kohden muuntajan päästöt saatiin, kun kokonaispäästöt jaettiin muuntajan painolla:

$$\frac{2\,381\,173 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}}{80\,600 \text{ kg}} = 29,54 \text{ kgCO}_2\text{ekv}$$

Muuntajan yhtä kiloa päästöt ovat 29,54 kgCO<sub>2</sub>ekv/kg<sub>muuntaja</sub>. Päästöt kilovolttiampeeria kohden laskettiin jakamalla kokonaispäästöt muuntajan nimellisteholla:

$$\frac{2\,381\,173 \text{ kgCO}_2\text{ekv.}}{63\,000 \text{ kVA}} = 37,80 \text{ kgCO}_2\text{ekv}$$

Parhaan kuvan muuntajan hiilijalanjäljestä saa nimenomaan suhteuttamalla kokonaispäästöt muuntajan nimellistehoon. Esimerkkinä lasketun muuntajan päästöt kilovolttiampeeria kohden ovat 37,80 kgCO<sub>2</sub>ekv/kVA.

### 5.1 Häviöiden vaikutus muuntajan päästöihin

Tässä opinnäytetyössä haluttiin erityisesti selvittää häviöiden vaikutusta muuntajan kokonaishiilijalanjälkeen. Selvitystä varten valittiin laskettavaksi useita eri muuntajia, joilla on sama nimellisteho, tässä tapauksessa 63 MVA, mutta toisistaan poikkeavat häviöt. Muuntajien hiilijalanjälki laskettiin laskentatyökalulla, mutta laskuista rajattiin ulos muuntajan kuljetus kohteeseen, koska sillä ei ole merkitystä vertailuun ja oikeaa kuljetuskalustoa olisi ollut haastavaa arvioida. Häviöiden ja niiden hiilijalanjäljen määrittämiseen on käytetty laskentatapaa, joka on esitelty tarkemmin kappaleessa 4.3.4. Eri häviöisten muuntajien häviöiden hiilijalanjäljet on esitetty taulukoissa 6–8.

**Taulukko 6.** Tyhjäkäyntihäviöiden hiilijalanjäljet

Häviöt (kW)	Tyhjäkäyntihäviöt (kgCO <sub>2</sub> ekv./kVA)	Tyhjäkäyntihäviöiden hiilijalanjälki vuodessa (tCO <sub>2</sub> ekv./MWh)
110	27,3	31,3
160	25,6	29,4
210	18,6	21,3
260	20,1	23,1

**Taulukko 7.** Kuormitushäviöiden hiilijalanjäljet

Häviöt (kW)	Kuormitushäviöt (kgCO <sub>2</sub> ekv./kVA)	Kuormitushäviöiden hiilijalanjälki vuodessa (tCO <sub>2</sub> ekv./MWh)
110	103	29,6
160	152	43,6
210	208	59,7
260	258	74,0

**Taulukko 8.** Häviöiden yhteenlaskettu hiilijalanjälki

Häviöt (kW)	Häviöiden yhteenlaskettu hiilijalanjälki vuodessa (tCO <sub>2</sub> ekv./MWh)
110	60,9
160	73,0
210	81,0
260	97,1

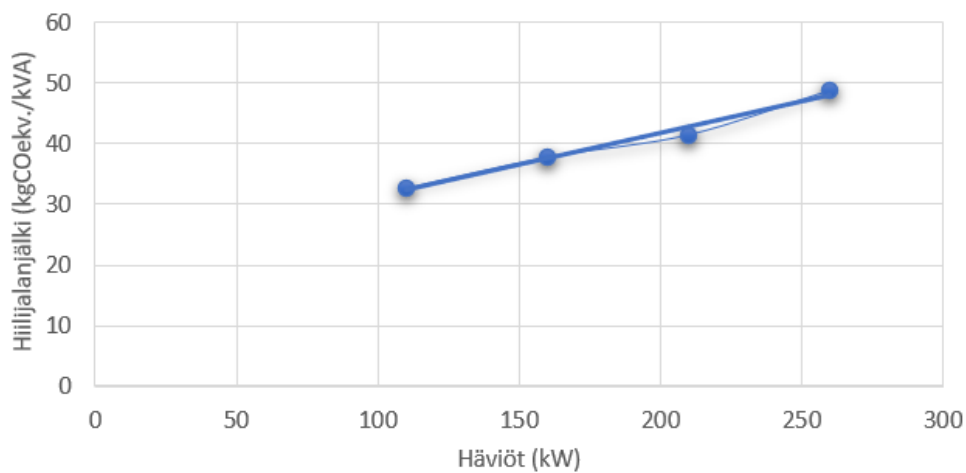
Taulukossa 9 on esitettyä eri häviöisten muuntajien kokonaishiilijalanjälki. Tulokset on ilmoitettu myös suhteutettuna muuntajan kiloihin ja nimellistehoon.

**Taulukko 9.** Häviöiden vaikutus muuntajan hiilijalanjälkeen

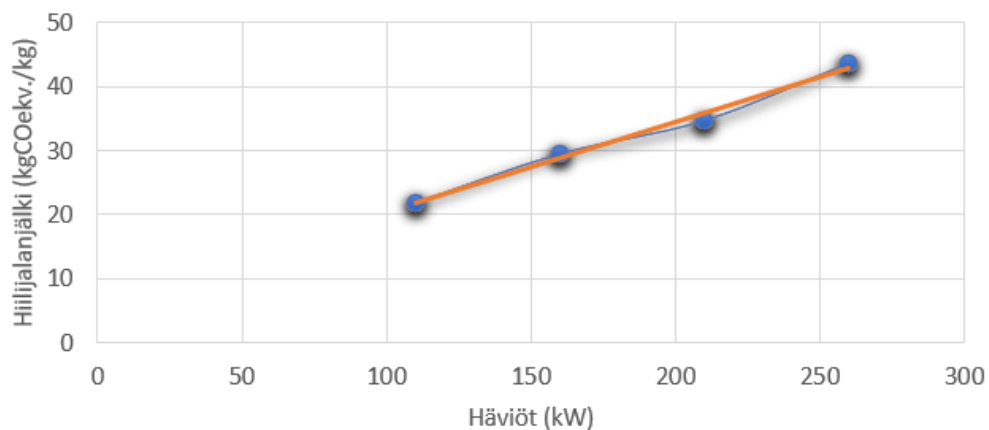
Häviöt (kW)	Hiilijalanjälki (kgCO <sub>2</sub> ekv./kVA)	Hiilijalanjälki (kgCO <sub>2</sub> ekv./kg)	Kokonaispäästöt (tCO <sub>2</sub> ekv.)
110	32,68	21,92	2 058,8
160	37,78	29,53	2 380,0
210	41,46	34,7	2 612,2
260	48,8	43,61	3 074,4

Lisäksi tulokset sijoitettiin käyrille (kuvat 7-9) tulkinan helpottamiseksi.

### Häviöiden vaikutus hiilijalanjälkeen (päästöt kVA kohden)

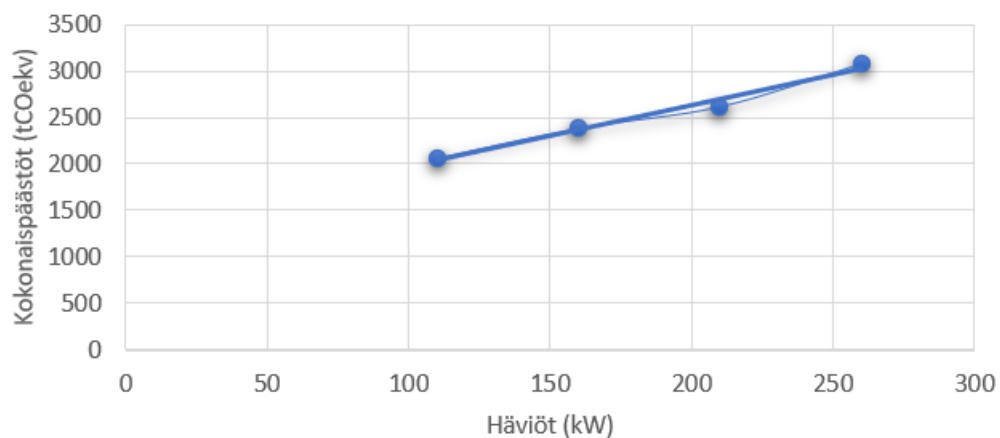
**Kuva 7.** Häviöiden vaikutus päästöihin (nimellisteho)

## Häviöiden vaikutus hiilijalanjälkeen (päästöt muuntajakiloa kohden)



**Kuva 8.** Häviöiden vaikutus päästöihin (muuntajakilo)

## Häviöiden vaikutus hiilijalanjälkeen (kokonaispäästöt)



**Kuva 9.** Häviöiden vaikutus päästöihin (kokonaispäästöt)

Saadut käyrät noudattavat selkeästi trendiviivaa, joten tulosten perusteella voidaan tulkita, että pienemmillä häviöillä saadaan pienennettyä muuntajasta aiheutuvia päästöjä, vaikka se lisääkin valmistusvaiheessa materiaalikustannuksia.<sup>71</sup> Valmistuksen päästöt jäivät kuitenkin jokaisella muuntajalla kohtalaisen pieniksi kokonaispäästöihin verrattuna, riippumatta siitä, minkä kokoiset häviöt niillä on.

---

<sup>71</sup> ABB. Muuntajatekniikan perusteet.

## 6 TULOSTEN ARVIOINTI

Laskurilla pystyttiin laskemaan asiallinen arvio muuntajan hiilijalanjäljestä. Tulosta ei voida kuitenkaan pitää täysin tarkkana, koska laskentaan liittyi muutamia epävarmuutta lisääviä tekijöitä ja laskentaa jouduttiin rajaamaan. Saadut tulokset antavat kuitenkin pätevän arvion muuntajan päästöistä ja niistä voidaan tulkita, mitkä ovat suurimmat päästölähteet muuntajan elinkaaren aikana.

### 6.1 Epävarmuustekijät

Laskentaan liittyvät suurimmat epävarmuustekijät liittyvät käytettyihin päästökertoimiin. Erityisesti materiaalien kohdalla päästökertoimina jouduttiin käyttämään internetlähteitä ja keskiarvoja, mikä aiheuttaa epätarkkuutta lopputulokseen. Mahdollinen virhe ei kuitenkaan lopputuloksessa näy kovin suurena, koska valmistuksen päästöjen osuus on noin 10 prosenttia hiilijalanjäljestä. Osa valmistuksen päästöistä koostuu myös tehtaan energiankäytöstä, josta oli tiedossa tarkat päästökertoimet, mikä pienentää virhettä. Laskennasta rajattiin ulos myös kuljetukset, jotka koskivat materiaalien toimitusta tehtaalle tai muuntajan osien kuljettamista kierrättämiseen. Rajaus tehtiin, koska saatavilla oli heikosti tietoa siitä, millaisia matkoja kuormat kulkivat ja millaisella kalustolla niitä siirrettiin. Tehtaalla materiaaleja lähetetään useista eri kohteista, joten on haastavaa kohdistaa materiaali-kuljetusten päästöt tietylle muuntajalle. Lisäksi kuljetusten vaikutus lopulliseen hiilijalanjälkeen olisi ollut hyvin pieni.

Suurin epävarmuustekijä muuntajan hiilijalanjälkeä laskettaessa on sen käyttöikä ja käyttö ylipäätään. Tässä opinnäytetyössä muuntajan käyttöikäksi arveltiin 30 vuotta, mikä voi todellisuudessa vaihdella riippuen muuntajan käytöstä ja asianmukaisesta huoltamisesta. Laskuri on kuitenkin helposti muokattavissa, joten tulokset voidaan ilmoittaa asiakkaalle käyttämällä useampia eri käyttöiän pituuksia.



Häviöiden osalta syntyy myös epävarmuutta, koska muuntaja ei välttämättä ole koko käyttöikänsä kytkettynä sähköverkkoon. Tässä laskurissa häviöitä lasketaan syntyvän vuoden jokaisena päivänä ja jokaisena tuntina, eikä mukaan ole huomioitu mahdollisia pätkiä, kun muuntaja on kytketty pois verkosta. Tältä ajalta ei luonnollisesti synny häviöitä, mikä vaikuttaa hiilijalanjälkeen.

## 6.2 Tulosten vertailu

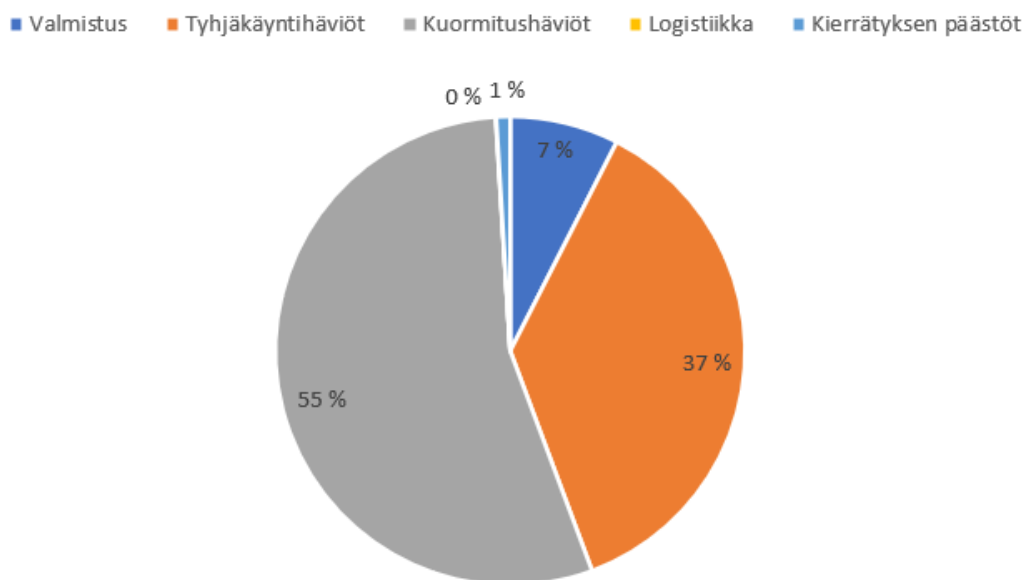
Kuten edellä mainittiin, muuntajan käyttöikä vaikuttaa myös hiilijalanjälkeen. Jotta voitiin selvittää käyttöiän vaihtelun vaikutusta hiilijalanjälkeen, laskettiin laskenta-työkalulla saman muuntajan hiilijalanjälki, mutta ensimmäisessä laskennassa käyttöajaksi arvioitiin 30 vuotta ja toisessa 40 vuotta. Tulokset laskettiin samalle muuntajalle, jota käytettiin esimerkkinä aikaisemmin, eli nimellishäviöt ovat 63 MVA ja keskiasennon häviöt 160 kW. Saadut tulokset esitettynä taulukossa 4.

**Taulukko 10.** Käyttöiän vaikutus hiilijalanjälkeen

Käyttöiän pituus (a)	Kokonaispäästöt (kgCO <sub>2</sub> ekv)	Yhden muuntajakilon päästöt (kgCO <sub>2</sub> ekv)	Päästöt/kVA (kgCO <sub>2</sub> ekv)
30	2 381 173	29,54	37,80
40	3 111 021	38,60	49,38

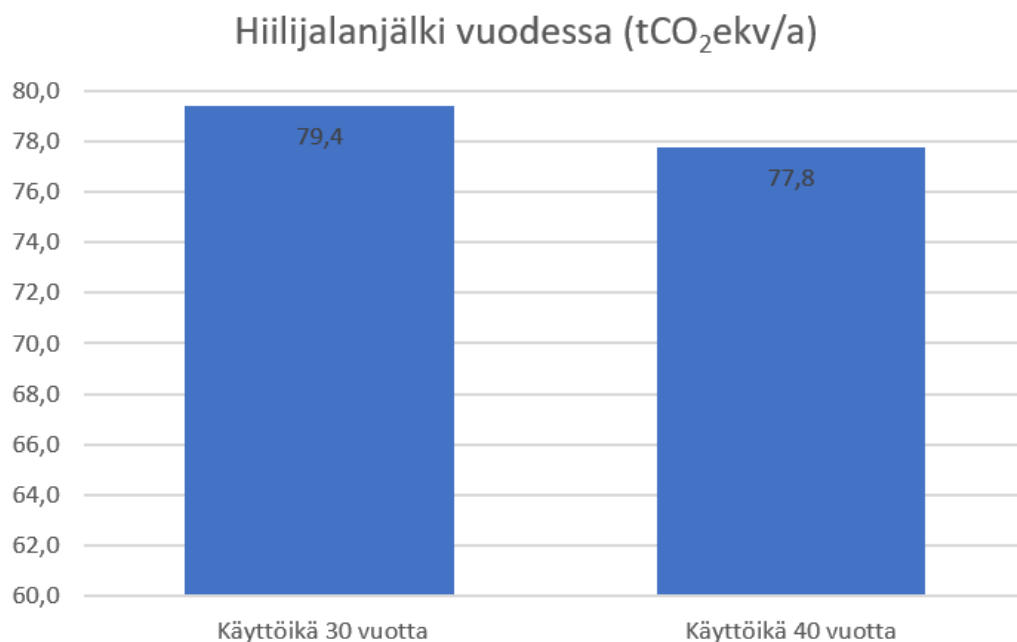
Käyttöiän pidentyessä myös hiilijalanjälki luonnollisesti kasvaa, koska vuosittaisia häviöitä syntyy enemmän. Pidempi elinkaari kuitenkin laskee valmistuksen päästöjen osuutta hiilijalanjäljessä, mikä tulee ilmi, kun vertaillaan kuvia 5 ja 10 keskenään. 40 vuoden käyttöiällä muuntajan valmistuksen päästöjen osuus laskee kolme prosenttia verrattuna lyhyempään elinkaareen.

### Yhteenveto muuntajan päästöistä



**Kuva 10.** Muuntajan hiilijalanjälki 40 vuoden käyttöiällä

Lisäksi kuvan 11 pylväsdiagrammissa on vertailtu, miten 10 vuotta pidempi käyttöikä muuttaa vuosittaista hiilijalanjälkeä. 30 vuoden käyttöiällä vuosittaiset päästöt ovat noin 1 600 kgCO<sub>2</sub>ekv. enemmän, kuin 40 vuoden käyttöiällä. Vertailulla voidaan vahvistaa, että valmistuksen päästöjen vaikutus vähenee entisestään, kun muuntajan käyttöikä pitenee.



**Kuva 11.** Hiilijalanjälki vuodessa

Laskennan luotettavuuden lisäämiseksi tehtiin vielä vertailu kirjallisuuteen. IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sivuilta löydettiin julkaisu, jossa oli toteutettu hiilijalanjälkilaskentaa huomattavasti pienemmälle muuntajalle. Verrokkimuuntajan nimellisteho on 1 MVA, paino 4425 kg, tyhjäkäyntihäviöt 0,7 kW ja kuormitushäviöt 7,6 kW sekä käyttöikäksi arvioitu 25 vuotta. Hiilijalanjäljeksi oli saatu 348,9 tCO<sub>2</sub>ekv. Laskentaan oli otettu mukaan myös materiaalien toimitus tehtaalle, toisin kuin opinnäytetyön laskennassa. Tulosten vertailu keskenään on haastavaa, koska muuntajan kokojen ja häviöiden välillä on valtavasti eroa. Aluksi vertailin muuntajien hiilijalanjälkeä kiloa kohden. Julkaisussa esitellyn muuntajan

hiilijalanjälki yhtä muuntajakiloa kohden oli 78,85 kgCO<sub>2</sub>ekv<sup>72</sup> ja tässä opinnäytetyössä lasketun muuntajan 51,63 kgCO<sub>2</sub>ekv/muuntajakilo, kun laskennassa käytettiin 25 vuoden käyttöikä ja häviöiden päästökertoimena eurooppalaisen sähkön keskiarvoa 285 kgCO<sub>2</sub>ekv/MWh.<sup>73</sup> Julkaisun muuntajan hiilijalanjälki on jonkin verran isompi, mutta tiedossa ei ollut, mitä sähkön päästökerrointa julkaisun laskelmissa oli käytetty, joten vertailua ei voida täysin luotettavasti toteuttaa.

Julkaisussa ilmoitettiin 1 MVA -muuntajan materiaalien massat, joiden avulla voitiin testata laskurin toimivuutta valmistuksen osalta. Laskurilla pikkumuuntajan materiaalien hiilijalanjäljeksi saatiin 12 612 kgCO<sub>2</sub>ekv, kun taas julkaisussa hiilijalanjäljeksi on ilmoitettu 13 485 kgCO<sub>2</sub>ekv. Tulokset ovat saman suuntaiset, joten laskurin antamia tuloksia tältä osalta voidaan pitää luotettavina. Pieni poikkeama johtuu käytetyistä materiaalien päästökertoimista sekä siitä, että pikkumuuntajan päästöihin on laskettu myös materiaalikuljetusten hiilijalanjälki mukaan.<sup>74</sup> Toteutetun vertailun avulla voidaan muutenkin vahvistaa, että laskurilla voidaan päästä päteviin arvioihin muuntajan hiilijalanjäljestä.

---

<sup>72</sup> Krishnan, R. Nair, K.

<sup>73</sup> European Environment Agency.

<sup>74</sup> Krishnan, R. Nair, K.

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoitus oli rakentaa laskentatyökalu Exceliin, jolla pystytään laskemaan hiilijalanjälki erityyppisille muuntajille. Laskurista haluttiin rakentaa sellainen, että sillä pystytään myös jatkossa vaivattomasti laskemaan asiakkaille juuri heidän muuntajansa päästöjä. Tätä varten laskentatyökalusta tehtiin helposti täytettävä ja lisättiin ohjeistusta mahdollisimman tarkkaan täydentämiseen. Laskuriin pystytään myös muokkaamaan tehtaan tietoja, jotta sitä olisi mahdollista käyttää tarvittaessa myös muilla, kuin Hitachi Energyn Vaasan muuntajantehtaalla.

Laskurilla saatuja tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina, koska laskentaan liittyy useita virhetekijöitä. Päästökertoimet ovat materiaalien osalta lähinnä keskiarvoja, joten niillä ei voida laskea täysin tarkkaa hiilijalanjälkeä valmistukselle. Lisäksi laskentaa jouduttiin rajaamaan. Vaikka ulos rajattujen tekijöiden vaikutus lopulliseen hiilijalanjälkeen on pieni, se on syytä huomioida tuloksia tulkittaessa. Suurin virhettä aiheuttava tekijä oli muuntajan käyttöiän pituus, koska sitä on mahdotonta arvioida täsmällisesti muuntajaa valmistettaessa. Laskurilla voidaan kuitenkin laskea hiilijalanjälki useammilla eri arvioilla, joten sillä päästään kuitenkin hyvään arvioon.

Laskennan lisäksi haluttiin selvittää häviöiden vaikutusta hiilijalanjälkeen. Tiedettiin jo ennalta, että kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt tulevat aiheuttamaan suurimman osan päästöistä, mitä myös laskurin tulokset tukivat. Tulosten perusteella voidaan tulla tulokseen, että jo suunnitteluvaiheessa valitut energiatehokkaat materiaaliratkaisut auttavat tehokkaimmin laskemaan muuntajan hiilijalanjälkeä. Muuntajan hiilijalanjälki myös laskee, kun jatkossa tehdään sähkö käyttäen uusiutuvaa energiaa, vaikka tässä opinnäytetyössä sitä ei vielä käytettykään laskuissa.

Jatkoa ajatellen Hitachi Energy voi hyödyntää rakennettua laskuria tarjoamaan asiakkaille suuntaa antavaa tietoa muuntajan hiilijalanjäljestä. Laskuria kannattaa kuitenkin pitää ajan tasalla, jotta päästökertoimet kuvaavat parhaiten nykyhetkeä. Erityisesti materiaalien päästökertoimia kannattaa päivittää, jos myöhemmin on mahdollista saada täsmällistä dataa suoraan materiaalien toimittajilta.

## LÄHTEET

ABB. 2020. 1/2020 - 12/2020. Quarterly energy and non-hazardous waste. Excel-tiedosto.

ABB. 2007. Muuntajatekniikan perusteet. Opintomoniste.

Center for climate and energy solutions. Global Manmade Greenhouse Gas Emissions by Sector, 2013. Viitattu 7.7.2021. <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>

European Environment Agency. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation. 2018. [Verkkoaineisto] [Viitattu 10.7.2021] Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-3/assessment>

EUR-Lex. 2014. Komission asetus (EU) N:o 548/2014, annettu 21 päivänä toukokuuta 2014, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta pienten, keskikokoisten ja suurten muuntajien osalta. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/548/oj/fin>

Federley, J. CO<sub>2</sub> -päästökertoimet. Verkkoaineisto. Viitattu 10.7.2021 Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet)

Heino, T. 2020. Muuntajien energiatehokkuus paranee edelleen direktiivin ohjauksessa. Viitattu 13.11.2021. <https://www.hitachienergy.com/us/en/news/web-stories/2020/12/fi-muuntajien-energiatehokkuus-paranee-edelleen-direktiivin-ohjauksessa>

Helen.fi. Uusituva kaukolämpöä yrityksille. [Verkkoaineisto] [Viitattu 10.7.2021] Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritykset/lampoa-yrityksille/kaukolampoa-yritykselle/uusiutuva-kaukolampoa#alkupera>

Hitachi Energy. 2021. EconiQ Transformers. Decarbonization. <https://www.hitachienergy.com/offering/product-and-system/transformers/econiq-transformers/decarbonization>

Hitachi Energy. 2021. Hitachi Energy lanseeraa EconiQ-muuntajia edistämään kestävää energiatulevaisuutta kaikille. <https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2021/11/fi-hitachi-energy-announces-econiq-transformers-for-advancing-a-sustainable-energy-future-for-all1>

Hitachi ABB Power Grids. AC Bushings type GOB. Viitattu 13.7.2021. <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/transformer-insulation-and-components/bushings/oil-impregnated-paper-oip/ac-bushings-type-gob>

Hitachi ABB Power Grids. Ground-mounted distribution transformers. Viitattu 13.7.2021. <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/transformers/distribution-transformers/small-distribution-transformers-up-to-315-kva/ground-mounted-distribution-transformers>

Hitachi ABB Power Grids. Large-Medium distribution transformers. Viitattu 13.7.2021. <https://www.hitachiabb-powergrids.com/offering/product-and-system/transformers/distribution-transformers/large-medium-up-to-10-mva-large-up-to-25-mva>

Hitachi ABB Power Grids. 2021. Sustainability 2030 Powering Good for Sustainable Energy. Viitattu 7.7.2021. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107992A3228&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Hitachi Energy. Perustietoja yhtiöstä Suomessa. Viitattu 13.11.2021. <https://www.hitachienergy.com/about-us/country-and-regional-information/finland/yhtiotietoja>

Häkkinen, T. 2020. Generic Data for Metals - Stainless steel. Saatavissa: <https://www.co2data.fi/reports/Metal-stainless-steel-2.pdf>

Ilmasto-opas. Ilmastonmuutos ilmiönä. Viitattu 13.7.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/962d9aa2-e7e3-4df5-89a2-9f1f653e0d4e/ilmastonmuutos-ilmiona.html>

Ilmasto-opas. Metaani. Viitattu 14.12.2021. <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/dec264e2-6350-418c-a1bc-3ef7c80676aa/metaani.html>

IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. 2013. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf)

Koskinen, J. 2021. Hiilijalanjäljillä. Helsinki. Like Kustannus.

Krishnan, R. Nair, K. 2019. Carbon Footprint of Transformer and the Potential for Reduction of CO2 emissions. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9353301/references#references>



Kulasek, K. Lindgren, E. Johansson, E. Jul, M. Flood, J. Oliva, M. 2020. Towards net zero emissions - The role of circularity in transformers. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A7456&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Leppilahti, J. 2015. Ekosuunnitteludirektiivin alaisen muuntaja-asetuksen vaikutukset Suomessa. Diplomityö. [https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/2642/osuva\\_6235.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/2642/osuva_6235.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nevanlinna, H. 2008. Muutamme ilmastoa - Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden katsaus ilmastonmuutokseen. Porvoo. Karttakeskus.

Nicore. Transformer core: Essential things you must know. 2020. Viitattu 8.7.2021. <https://nicoreindia.com/transformer-core/>

Open CO2. Mitä CO<sub>2</sub>-ekvivalentti tarkoittaa? Viitattu 15.7.2021. <https://www.openco2.net/fi/taustaa>

Open CO2. Uusiutuvilla (esim. tuulivoima, vesivoima, aurinkoenergia ja puu) tuotettu sähkö. [Viitattu 10.7.2021] Saatavissa: <https://www.openco2.net/fi/paastokertoimet/sahko/uusiutuvilla-esim-tuulivoima-vesivoima-aurinkoenergia-ja-puu-tuotettu-sahko/185>

Rintala, N. 2021. Opinnäytetyö muuntajan hiilijalanjäljestä. Yksityinen sähköpostiviesti 2.11.2021. Viestin saaja: Simo Kivioja. Hitachi Energy Finland Oy.

Röchling Group's Carbon Emissions. Röchling Group's emissions relative to raw materials used. [Viitattu 1.10.2021] Saatavissa: <https://www.roechling.com/responsibility/sustainability>

SFS-EN ISO 14067:2018. Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2018. 111 s.

Suomen Ympäristökeskus. 2021. Rakentamisen päästötietokanta. Viitattu 16.11.2021. <https://www.co2data.fi/>

Suomen Ympäristökeskus. 2017. Tietoa elinkaariarvioinnista (LCA) ja elinkaariklennikkatoimintamallista pk-yrityksille. ToimintaMALLI yritysten elinkaaristen Ympäristövaikutusten kehittämiseksi (MALLI-Y) -hanke. <https://docplayer.fi/209340701-Tietoa-elinkaariarvioinnista-lca-ja-elinkaariklennikkatoimintamallista.html>

Suomen Ympäristökeskus. 2019. Y-HIILARI Hiilijalanjälki -työkalu. Viitattu 17.11.2021. [https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus\\_kehittaminen/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Laskurit/YHiilari](https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Kulutus_ja_tuotanto/Laskurit/YHiilari)

Teknologian Tutkimuskeskus VTT. 2017. LIPASTO yksikköpäästötietokanta. Viitattu 17.11.2021. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/index.htm>

Tilastokeskus. 2021. Laatuseloste: Kasvihuonekaasut. Viitattu 13.11.2021. [https://www.tilastokeskus.fi/til/khki/2019/khki\\_2019\\_2021-03-19\\_laa\\_001\\_fi.html](https://www.tilastokeskus.fi/til/khki/2019/khki_2019_2021-03-19_laa_001_fi.html)

Tolvanen, K. Tampereen korkeakouluyhteisön hiilijalanjälki 2019 – raportti hiililaskentatyöstä. 2021. Saatavissa: <https://www.tuni.fi/sites/default/files/2021-04/Hiiliraportti%202019%2C%20saavutettava.pdf> S.14

Ympäristöministeriö. Euroopan Unionin ilmastopolitiikka. Viitattu 16.7.2021. <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka>

Ympäristöministeriö. Glasgow'n ilmastokokous COP26. Viitattu 14.12.2021. <https://ym.fi/glasgown-ilmastokokous-cop26>

Ympäristöministeriö. Kansainväliset ilmastoneuvottelut. Viitattu 16.7.2021. <https://ym.fi/kansainvaliset-ilmastoneuvottelut>

Ympäristöministeriö. Kioton pöytäkirja. Viitattu 19.7.2021. <https://ym.fi/kioton-poytakirja>

Ympäristöministeriö. Pariisin ilmastopöytäkirja. Viitattu 19.7.2021. <https://ym.fi/pariisin-ilmastopoytakirja>

# LIITTEET

## LIITE 1. Hiilijalanjälkilaskuri

Tälle välilehdelle kirjataan tiedot muuntajasta ja sen valmistuksesta.

Muuntajan raaka-aineet	Paino /kg	CO2ekv (kg)	Yhteensä CO2ekv	Muuntajan lisätiedot
puristuspalmit, liittotangot, muut ulkoiset metalliosat)	19357,1	2,50	48392,75	Muuntajan kokonaispaino /kg 80000
Rauta (työntanterä)	31079,1	2,77	85933,7115	Muuntajan arvioitu käyttöikä /a 40
Kupari (käämit, kiskotukset, johdotus, kaapelit)	12215,4	4,74	57876,5652	Kuormituskerroin % 50
Alumiini (käämit)		6,00	0	Muuntajan nimellisteho /kV 63000
Prespaani (ohears)	944,2	0,82	771,4114	
Puristepuu (liimapuu)	998,7	0,60	599,22	
Eristepaperi	199,5	0,82	162,9915	
Nomex			0	
Mineraaliöljy	19108,2	1,21	23101,8138	
Syntetttinen esteri		4,10	0	
Luonnollinen esteri		3,611	0	Vuodessa valmistetut muuntajakilot /kg 10281435
<b>YHTEENSÄ</b>			<b>216888</b>	

Valitse oikea sähkö- ja kaukolämpötyyppi keltaisesta solusta. Huomaa kirjata soluun 119 & 124 toimittajakohtaiset päästökertoimet, jos ne ovat tiedossa.

Tehtaan energiankulutus	MWh/a	Valitse oikea tyyppi Toimittajakohtainen	CO2ekv (kg/MWh)	CO2ekv (kg/MWh vuodessa)	CO2ekv (kg/MWh per muuntaja kg)	CO2ekv (kg/muuntaja)	Päästökertoimet energialle	Päästökertoimen kgCO2 ekv./MWh
Sähkö	8083	sähkö		277	2238991	0,21777	Uusiutuvasti tuotettu sähkö	0
Kaukolämpö	7918	kaukolämpö		77	609686	0,1	Toimittajakohtainen sähkö	277
<b>YHTEENSÄ</b>							Keskimääräinen sähkö, Suomi	131
<b>YHTEENSÄ</b>							Keskimääräinen sähkö, EU	285
<b>YHTEENSÄ</b>							Uusiutuvasti tuotettu kaukolämpö,	0
<b>YHTEENSÄ</b>							Keskimääräinen kaukolämpö, Suomi	148
<b>YHTEENSÄ</b>							Toimittajakohtainen kaukolämpö	77

Tälle välilehdelle kirjataan tiedot valmiin muuntajan päästäistä käytön aikana.

Muuntajan toimittaminen kohteeseen (maantie)	Kuorma t	Tehdyt matkat lkm	Kuorma matkaa kohden t	Ajetut km/kerta (yhteensä)	tkm yhteensä	CO2ekv (g/tkm)	CO2ekv (kg)
Jakelukuorma-auto, pieni (5t)			0			0	168
Jakelukuorma-auto, iso (15t)			0			0	91
Puoliperävaunuyhdistelmä			0			0	49
Täysperävaunuyhdistelmä 60t	80,6	2	40,3	400	32240	39	1257,36
Täysperävaunuyhdistelmä 75t			0			0	35
<b>YHTEENSÄ</b>							<b>1257,36</b>

Meriliikenne	Kuorma t	Kuljetut km	tkm	CO2ekv (g/tkm)	CO2ekv (kg)
Konttialus (1000 TEU)			0	42	0
Konttialus (2000 TEU)			0	28	0
<b>YHTEENSÄ</b>					<b>0</b>

Valitse oikea sähkötyyppi keltaisesta solusta. Huomaa kirjata soluun K18 toimittajakohtainen päästökertoimen, jos se on tiedossa.

Häviöt	kW	MWh/a	Valitse oikea tyyppi Keskimääräinen	CO2ekv (kg/MWh)	Vuodessa CO2ekv (kg/MWh)	Yhteensä käytön aikana CO2ekv (kg/MWh)	Yhteensä käytön aikana CO2ekv (kg/MWh)	Päästökertoimet sähköille	Päästökertoimen kgCO2/MWh
Tyhjäkäyntihäviöt	25,6	224,256	sähkö, Suomi	131	29377,536	1175101,44	Uusiutuvasti tuotettu sähkö	0	
Kuormitushäviöt	152	0,50	Valitse oikea tyyppi Keskimääräinen sähkö, Suomi	131	43607,28	1744291,2	Toimittajakohtainen sähkö	131	
<b>YHTEENSÄ</b>							Keskimääräinen sähkö, EU	285	

Tälle välilehdelle kirjataan tiedot valmiin muuntajan päästöistä käytön aikana.

Muuntajan toimittaminen kohteeseen (maantie)	Kuorma t	Tehdyt matkat lkm	Kuorma matkaa kohden t	Ajetut km/kerta (yhteen suuntaan)		
				tkm yhteensä	CO2ekv (g/tkm)	CO2ekv (kg)
Jakelukuorma-auto, pieni (5t)			0	0	168	0
Jakelukuorma-auto, iso (15t)			0	0	91	0
Puoliperävaunuyhdistelmä			0	0	49	0
Täysperävaunuyhdistelmä 60t	80,6	2	40,3	400	32240	1257,36
Täysperävaunuyhdistelmä 75t			0	0	35	0
<b>YHTEENSÄ</b>						<b>1257,36</b>

Meriliikenne	Kuorma t	Kuljetut km	tkm	CO2ekv (g/tkm)	CO2ekv (kg)
Konttialus (1000 TEU)			0	42	0
Konttialus (2000 TEU)			0	28	0
<b>YHTEENSÄ</b>					<b>0</b>

Valitse oikea sähkötyyppi keltaisesta solusta. Huomaa kirjata soluun K18 toimittajakohtainen päästökerroin, jos se on tiedossa.

Häviöt	kW	MWh/a	Valitse oikea tyyppi	CO2ekv (kg/MWh)	Vuodessa CO2ekv (kg/MWh)	Yhteensä käytön aikana CO2ekv (kg/MWh)
Tyhjäkäyntihäviöt	25,6	224,256	Keskimaarainen sähkö, Suomi	131	29377,536	1175101,44
Kuormitushäviöt	152	0,50	Valitse oikea tyyppi	Keskimaarainen sähkö, Suomi	131	43607,28
<b>YHTEENSÄ</b>						<b>2919392,64</b>

Päästökertoimet sähköille	Päästökerroin kgCO2/MWh
Uusiutuvasti tuotettu sähkö	0
Toimittajakohtainen sähkö	
Keskimaarainen sähkö, Suomi	131
Keskimaarainen sähkö, EU	285

Tälle välilehdelle on koottu tietoa muuntajan hiilijalanjäljestä. Ympyrädiagrammissa on esitetty uuden muuntajan päästöt. Pylväsdiagrammi esittää päästöjä, kun mukaan on huomioitu myös negatiivinen päästökerroin, joka saadaan kierrättämällä materiaaleja.

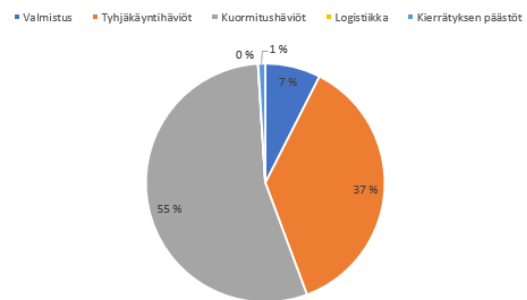
Valmistuksen päästöt	kgCO <sub>2</sub> ekv
Materiaalit	216838
Tehtaan sähkö	17552
Tehtaan kaukolämpö	4780
Tehtaan käyttövesi	21
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>239191</b>

Käytössä syntyvät päästöt	kgCO <sub>2</sub> ekv
Kuljetus	1257
Tyhjäkäyntihäviöt	1175101
Kuormitushäviöt	1744291
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>2920650</b>

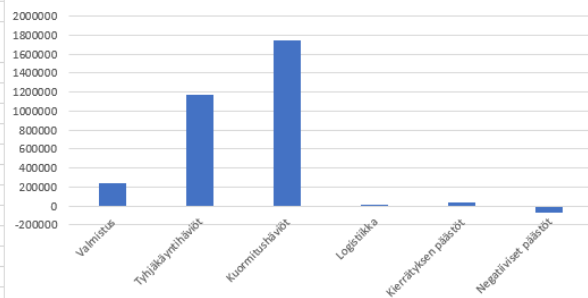
Käytöstä poiston päästöt	kgCO <sub>2</sub> ekv
Kierrätyksen päästöt	30392
Negatiivinen päästö	-71872
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>-41479</b>

YHTEENVETO MUUNTAJAN PÄÄSTÖISTÄ	kgCO <sub>2</sub> ekv
Valmistus	239191
Tyhjäkäyntihäviöt	1175101
Kuormitushäviöt	1744291
Logistiikka	1257
Kierrätyksen päästöt	30392
Negatiiviset päästöt	-71872
<b>KOKONAISPÄÄSTÖT</b>	<b>3118362</b>
<b>Yhden muuntajakilon päästöt</b>	<b>38,69</b>
<b>Päästöt/kVA</b>	<b>49,50</b>

Yhteenveto muuntajan päästöistä



Yhteenveto muuntajan päästöistä, mukana negatiivinen päästökerroin



## LIITE 2. Hiilijalanjätkilaskurissa käytetyt kaavat

Materiaalien hiilijalanjälki:

$$\text{paino} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Tehtaan energiankulutuksen hiilijalanjälki vuodessa:

$$\begin{aligned} &\text{Vuodessa kulutettu sähkö tai kaukolämpö} * \text{päästökerroin} \\ &= \text{kgCO}_2\text{ekv/MWh /a} \end{aligned}$$

Tehtaan energiankulutuksen hiilijalanjälki per valmistettu muuntajakilo:

$$\frac{\text{Vuoden sähkön tai kaukolämmön kulutuksen hiilijalanjälki}}{\text{Vuodessa valmistetut muuntajakilot}} = \text{kgCO}_2\text{ekv/kg}$$

Energiankulutuksen hiilijalanjälki per muuntaja:

$$\text{kgCO}_2\text{ekv/muuntajakilo} * \text{muuntajan paino} = \text{kgCO}_2\text{ekv/muuntaja}$$

Tehtaan vedenkulutuksen hiilijalanjälki vuodessa:

$$\text{Vuodessa kulutettu vesi} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv/m}^3 \text{ /a}$$

Tehtaan vedenkulutuksen hiilijalanjälki per valmistettu muuntajakilo:

$$\frac{\text{Vuoden vedenkulutuksen hiilijalanjälki}}{\text{Vuodessa valmistetut muuntajakilot}} = \text{kgCO}_2\text{ekv/kg}$$

Vedenkulutuksen hiilijalanjälki per muuntaja:

$$\text{kgCO}_2\text{ekv/m}^3 * \text{muuntajan paino} = \text{kgCO}_2\text{ekv/muuntaja}$$

Muuntajan kuljettaminen kohteeseen, kuorma yhtä matkaa kohden (maanteitse):

$$\frac{\text{Kuorma}}{\text{tehdyt matkat}} = \text{kuorma matkaa kohden}$$

Kuljetetut tonnikilometrit (maanteitse):

$$\begin{aligned} &\text{Tehdyt matkat} * \text{kuorma matkaa kohden} * \text{ajetut km (yhteen suuntaan)} \\ &= \text{tonnikilometrit} \end{aligned}$$

Muuntajan kuljettamisen hiilijalanjälki (maanteitse):

$$\text{tonnikilometrit} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Kuljetutut tonnikilometrit (meriteitse):

$$\text{Kuorma} * \text{kuljettu matka} = \text{tonnikilometrit}$$

Muuntajan kuljettamisen hiilijalanjälki (meriteitse):

$$\text{tonnikilometrit} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Tyhjäkäyntihäviöt vuodessa:

$$\frac{\text{Tyhjäkäyntihäviöt (kW)} * 24 * 365}{1000} = \text{MWh/a}$$

Vuoden tyhjäkäyntihäviöiden hiilijalanjälki:

$$\text{MWh/a} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv/a}$$

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöiden hiilijalanjälki:

$$\text{kgCO}_2\text{ekv/a} * \text{muuntajan käyttöikä} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Kuormitushäviöt vuodessa:

$$\frac{(\text{kuormituskerroin}^2) * \text{kuormitushäviöt (kW)} * 24 * 365}{1000} = \text{MWh/a}$$

Vuoden kuormitushäviöiden hiilijalanjälki:

$$\text{MWh/a} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv/a}$$

Muuntajan kuormitushäviöiden hiilijalanjälki:

$$\text{kgCO}_2\text{ekv/a} * \text{muuntajan käyttöikä} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Muuntajan uudelleenkäytettävien materiaalien paino:

$$\frac{\text{Materiaalin kokonaispaino}}{100} * \text{uusiokäytettävän materiaali prosentteina} \\ = \text{uusiokäytettävä materiaali (kg)}$$

Materiaalien uusiokäytöllä saavutettava negatiivinen hiilijalanjälki:

$$\text{uusiokäytettävä materiaali (kg)} * \text{negatiivinen päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Materiaalien kierrätyksen päästöt:

$$\text{Materiaalin kokonaispaino} * \text{päästökerroin} = \text{kgCO}_2\text{ekv}$$

Muuntajan hiilijalanjälki yhtä muuntajakiloa kohden:

$$\frac{\text{kokonaispäästöt}}{\text{muuntajan paino}} = \text{kgCO}_2\text{ekv/kg}$$

Muuntajan hiilijalanjälki suhteutettuna nimellistehoon:

$$\frac{\text{kokonaispäästöt}}{\text{nimellisteho}} = \text{kgCO}_2\text{ekv/kV}$$