



# Vesirakennushankkeen hiilijalanjälkilaskenta

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK)

Kevät 2025

Eero Taskinen

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| Koulutus  | Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK)     |            |
| Tekijä    | Eero Taskinen   | Vuosi 2025 |
| Työn nimi | Vesirakennushankkeen hiilijalanjälkilaskenta          |            |
| Ohjaaja   | Elis Kivi (HAMK), Päivi Stordell (Boskalis Terramare) |            |

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää vesirakennushankkeen hiilijalanjälkilaskennan perusteet sekä siihen liittyvän lainsäädännön tuomat velvoitteet ja rajoitteet. Tutkimuksessa selvitettiin esimerkkihankkeen päästörakenne sekä laskettiin hankkeen aiheuttama hiilijalanjälki. Tavoitteena oli myös luoda yritykselle Excel-laskenta-alusta, jolla voidaan laskea työmaan käyttämien materiaalien, kuljetusten sekä työkonoiden aiheuttamat päästöt. Laskenta-alusta luotiin hyödyntämään myös tulevien vesirakennushankkeiden päästöjen arviointia. Vähähiilisen rakentamisen yleistyessä on tärkeää, että hankkeiden merkittävät päästölähteet tunnistetaan, jotta niihin voidaan vaikuttaa. Hiilijalanjälkilaskenta on merkittävässä roolissa vähähiilisen rakentamisen edistyksessä. Vaikkakin infrarakentamisen sektorilla ei ole vielä säädetty lakeja tai määräyksiä, jotka ohjaavat hankkeiden vähähiilisyyttä on urakoitsijalla hyvä olla riittävä valmius, mikäli hankkeiden vähähiilisyyteen tulee vaatimuksia. Työn tilaajana toimi merirakennustoimialalla toimiva Boskalis Terramare Oy.

Työn teoriaosuudessa on kerrottu tietoa eri kasvihuonekaasujen vaikutuksista ja niiden syntymekanismeista sekä rakennussektorin merkittävimpien päästölähteiden kokonaisuuksista. Teoriaosuudessa on listattu tärkeimmät lainsäädännön ohjaustoimet sekä EU:n asettamat vaatimukset ja ohjeistukset. Työssä käydään läpi Terramaren emoyhtiön Boskaliuksen tavoitteet yrityksen aiheuttamien päästöjen vähentämiseksi sekä toimet, joilla tavoitteet saavutetaan. Työssä selvitettiin valitun laskentatavan periaatteet sekä käytiin läpi valitun GHG-laskentaprotokollan toiminta. Työssä esiteltiin vesirakennushanke, josta GHG-protokollan mukainen hiilijalanjälkilaskelma tehtiin ja kerrottiin laskennan rajauksesta sekä kuinka laskennan eri tulokset jaoteltiin. Työssä käytettiin lähdeaineistona useita aiheeseen liittyviä lähteitä, esimerkiksi tutkimuksia, asiantuntijoiden artikkeleita sekä tieteellisiä sivustoja. Laskennassa käytettyjen päästöarvot haettiin kansallisesta infrarakentamisen päästötietokannasta, jossa on listattu yleisempien materiaalien sekä työkonoiden ja kuljetusten päästöarvot. Muiden materiaalien päästöarvot haettiin suoraan materiaalien valmistajilta tai laskettiin itse.

Työn tuloksena syntyi yritykselle käyttökelpoinen Excel-laskenta-alusta, jota voidaan hyödyntää tulevien vesirakennushankkeiden laskentavaiheessa, mikäli hankkeen tilaajalla on vaatimuksia hankkeen vähähiilisyyteen liittyen. Laskenta-alusta luotiin hyvin kattavasti sekä muokattavaksi eri hanketyyppien mukaisesti. Laskenta-alustalla laskettiin esimerkkihankkeen aiheuttama hiilijalanjälki ja tuloksien avulla selvitettiin potentiaaliset päästöjen vähennyskohteet sekä pohdittiin mahdollisia toimenpiteitä, kuinka vesirakennushankkeen aiheuttamia päästöjä voitaisiin vähentää.

Avainsanat Hiilijalanjälki, päästöt, rakentaminen, hiilidioksidi, ilmastopoliittika, vesirakennushanke  
Sivut 58 sivua

DP Construction and Civil Engineering, Bachelor of Engineering  
Author Eero Taskinen Year 2025  
Subject Carbon Footprint Calculation for Marine Construction Project  
Supervisors Elis Kivi (HAMK), Päivi Stordell (Boskalis Terramare)

---

The objective of the thesis was to investigate the fundamentals of carbon footprint calculation for water construction projects and the obligations and limitations imposed by related legislation. The study examined the emission structure of an example project and calculated the carbon footprint caused by the project. The aim was also to create an Excel calculation platform for the company to calculate the emissions caused by the materials, transportation, and machinery used on the worksite. The calculation platform was also designed to be used for assessing the emissions of future water construction projects. As low-carbon construction becomes more common, it is important to identify significant sources of emissions in projects so that they can be addressed. Carbon footprint calculation plays a significant role in the advancement of low-carbon construction. Although there are no laws or regulations yet in the infrastructure construction sector that guide the low-carbon nature of projects, it is beneficial for contractors to have sufficient readiness in case requirements for low-carbon projects arise. The commissioning party for the study was Boskalis Terramare Oy, which operates in the marine construction sector.

The theoretical part of the study provides information on the impacts of different greenhouse gases and their mechanisms of formation, as well as an overview of the most significant sources of emissions in the construction sector. The theoretical part lists the most important legislative measures, and the requirements and guidelines set by the EU. The study reviews the goals of Boskalis, the parent company of Terramare, to reduce the emissions caused by the company and the actions to achieve these goals. The principles of the selected calculation method were explained, and the operation of the chosen GHG calculation protocol was discussed. The study presented a water construction project for which a carbon footprint calculation was made according to the GHG protocol, and the boundaries of the calculation and how the different results of the calculation were categorized were explained. Several relevant sources were used as reference material for the study, including studies, expert articles, and scientific websites. The emission values used in the calculation were retrieved from the national infrastructure construction emission database, which lists the emission values of the most common materials, machinery, and transportation. Emission values for other materials were obtained directly from the material manufacturers or calculated independently.

As a result of the study, a usable Excel calculation platform was created for the company, which can be utilized in the calculation phase of future water construction projects if the project client has requirements related to the low-carbon nature of the project. The calculation platform was created to be comprehensive and modifiable according to different project types. The carbon footprint of the example project was calculated using the calculation platform, and the results were used to identify potential emission reduction targets and consider possible measures to reduce the emissions caused by a water construction project.

Keywords Carbon footprint, emissions, construction, carbon dioxide, climate policy, water construction project  
Pages 58 pages

# Sisällys

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Johdanto .....   | 1  |
| 2     | Vähähiilisen rakentamisen tiekartta .....                    | 2  |
| 3     | Green deal .....   | 3  |
| 4     | Kasvihuonekaasut ja niiden vaikutus .....                    | 4  |
| 4.1   | Vesihöyry .....  | 4  |
| 4.2   | Hiilidioksidi .....  | 5  |
| 4.3   | Metaani .....  | 7  |
| 4.4   | Fluoratut kasvihuonekaasut .....                             | 8  |
| 5     | Rakentamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt .....          | 9  |
| 5.1   | Rakentamisen päästörakenne .....                             | 10 |
| 5.2   | Betonirakentaminen .....                                     | 10 |
| 5.2.1 | Sementti .....   | 12 |
| 5.2.2 | Vähäpäästöisemmän betonin käyttö .....                       | 14 |
| 5.2.3 | Kiviaines .....  | 16 |
| 5.2.4 | Harjateräs .....   | 16 |
| 5.3   | Logistiikka ja työmaatoiminnot .....                         | 17 |
| 5.4   | Louhinta ja kalliokiviaineksen ottaminen .....               | 18 |
| 6     | Lainsäädäntö ja sääntely vähähiilisessä rakentamisessa ..... | 20 |
| 6.1   | EU:n säädökset ja ilmastopolitiikka .....                    | 20 |
| 6.2   | 55-valmiuspaketti .....                                      | 21 |
| 6.2.1 | Päästökauppa .....   | 21 |
| 6.2.2 | Hiilirajamekanismi (CBAM) .....                              | 22 |
| 6.2.3 | Rakennustuoteasetuksen päivitys .....                        | 22 |
| 6.2.4 | Taakanjakosektorin päivitys .....                            | 23 |
| 6.3   | Uusi rakentamislaki .....                                    | 23 |
| 7     | Hiilidioksidipäästöjen laskenta .....                        | 24 |
| 7.1   | GHG Protokolla .....   | 24 |
| 7.1.1 | Scope 1 -luokka .....  | 25 |
| 7.1.2 | Scope 2 -luokka .....  | 25 |
| 7.1.3 | Scope 3 -luokka .....  | 26 |
| 8     | Boskalis .....   | 27 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 8.1   | Road to net-zero .....                   | 29 |
| 9     | Tutkimushanke.....                       | 31 |
| 9.1   | Mussalo D-osan laajennustyömaa .....     | 32 |
| 9.2   | Vesirakennustyöt .....                   | 33 |
| 9.2.1 | Ruoppaus .....                           | 33 |
| 9.2.2 | Louhinta.....                            | 34 |
| 9.3   | Laiturirakentaminen.....                 | 34 |
| 9.3.1 | Betonityöt ja muut työmaatoiminnot ..... | 35 |
| 9.3.2 | Maanrakennustyöt .....                   | 38 |
| 10    | Laskenta .....                           | 39 |
| 11    | Laskennan tulokset .....                 | 40 |
| 11.1  | Scope 1.....                             | 41 |
| 11.2  | Scope 3.....                             | 42 |
| 11.3  | Vertailu.....                            | 43 |
| 12    | Johtopäätökset.....                      | 44 |
| 13    | Pohdinta.....                            | 46 |
| 14    | Lähteet.....                             |    |

## Kuvat

|  |    |
|--|----|
| Kuva 1. Vesihöyryn määrän muutos kuutiometrissä (Ilmasto-opas, 2020).....                        | 5  |
| Kuva 2. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu vuosina 1958–2011 (Ilmasto-opas, 2019).....     | 6  |
| Kuva 3. Metaanipitoisuuden kehitys (Ilmasto-opas, 2022).....                                     | 8  |
| Kuva 4. Kylmäaineiden GWP-arvoja (Uudenmaan Kone- ja Kylmätekniikka, n.d.) .....                 | 9  |
| Kuva 5. Vuoden 2020 sementtituotannon jakautuminen globaalisti (Heatmap, 2023). .....            | 11 |
| Kuva 6. Sementtituotannon päästöjen syntyminen (Ahlberg, 2020, s. 76).....                       | 13 |
| Kuva 7. Sementtilaatujen ominaispäästöt (betoni, n.d.-b).....                                    | 14 |
| Kuva 8. Kuljetusten ja työmaatoimintojen energiankulutus (Laine, ym., 2024). .....               | 18 |
| Kuva 9. Kuvassa Rockmate poralautta sekä edustalla George palkoproomu (Donner, 2022). .....      | 19 |
| Kuva 10. Boskaliksen hiilidioksidipäästöt vuonna 2023 (Boskalis, 2023a, s. 60) .....             | 28 |
| Kuva 11. Edustalla vedyllä toimiva Medusa 2 kuokkakauharuoppaaja (Boskalis, 2023a, s. 36). ..... | 31 |
| Kuva 12. Valmiit K- ja S-elementit rantapenkereen päällä (Donner, 2022). .....                   | 35 |
| Kuva 13. Elementtien asennus uivalla nosturilautalla (Donner, 2022). .....                       | 36 |
| Kuva 14. Dronekuva reunapalkkivaiheesta (Taskinen, 2023).....                                    | 37 |
| Kuva 15. Taustatäyttövaihe käynnissä (Donner, 2022). .....                                       | 38 |
| Kuva 16. Kuvaaja hankkeen päästöjen jakaumasta. ....   | 41 |
| Kuva 17. Scope 1 -päästöjen jakauma.....   | 42 |
| Kuva 18. Scope 3 -päästöjen jakauma.....   | 43 |
| Kuva 19. Betonilaadun vaikutus betonirakenteiden päästöihin.....                                 | 44 |

## Taulukot

|   |    |
|---|----|
| Taulukko 1. Scope 3 -luokan päästöt jaoteltuna ylävirran sekä alavirran päästöihin..... | 26 |
| Taulukko 2. Boskaliksen valitut päätavoitteet.....                                      | 27 |
| Taulukko 3. Päästöjenvähennys toimet.....   | 29 |

# 1 Johdanto

Ilmastomme keskilämpötila on noussut kiihtyvällä tahdilla teollisen vallankumouksen alettua toden teolla 1800-luvun lopussa. Nopean keskilämpötilan nousu on aiheutunut ihmisen toiminnan seurauksena ja lämpötilan nousemisen taltuttamiseksi on tehtävä monia perustavanlaatuisia muutoksia elämäntapoihimme sekä tottumuksiimme. YK:n ilmastoneuvotteluissa on päädytty tavoittelemaan alle kahden asteen keskilämpötilan nousua. Alle kahden asteen keskilämpötilan nousua tavoiteltaessa, on kaikkien sektorien ja valtioiden tehtävä yhteistyötä vähentää omia kasvihuonepäästöjään.

Suomi on sitoutunut noudattamaan kansallista ilmastolakia, joka ohjaa Suomen päästövähennystavoitteita. Suomessa vuonna 2022 voimaan tullut päivitetty ilmastolaki, jossa on mm. määritetty Suomen hiilineutraaliustavoite sekä päästövähennystavoitteet. Lakiin on kirjattu, että Suomen on oltava hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2023). Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on tehtävä merkittäviä päästövähennystoimia jokaisella sektorilla.

Suomessa rakentaminen ja rakennukset tuottavat kolmanneksen Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Saavuttaakseen kansalliset sekä kansainväliset ilmastotavoitteet on Suomessa rakennussektorin tehtävä merkittäviä päästövähennystoimia. Suomessa on pitkään pyritty olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuuden parantamiseen sekä toteuttamaan mahdollisimman energiatehokkaita ratkaisuja. Vuonna 2018 voimaan tulleet uudet energiamääräykset määräävät uudisrakennukset suunniteltaviksi ja rakennettaviksi lähes nollaenergiataloiksi. Energiatehokkaiden uudisrakennusten takia on päästövähennystoimet löydettävä rakennuksen elinkaaren alku- ja loppupäästä. (Ympäristöministeriö, 2019)

Suomessa vuoden 2025 voimaan tullut uusi rakentamislaki määrää uusille rakennuksille vähähiilisyysvaatimukset sekä eri raja-arvot rakennuksen tyyppin mukaan. Infrarakentamisen vähähiilisyys arviointi ei kuitenkaan ole lakisääteistä eikä tällä hetkellä ole valmisteilla säädösohjailua liittyen vähähiiliseen rakentamiseen infrarakentamisen piirissä. Lainsäädännön puutteesta huolimatta infrarakentamisen päästöjen arvioiminen tulee olemaan tärkeässä roolissa, sillä infrarakentamisen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä ei ole pystytty tarkasti arvioimaan. (Viitanen, 2023) Suomessa monet julkiset tahot ovat solmineet

Green Deal -sopimuksen, jonka myötä infrahankkeiden päästöjen arviointi voi tulla tulevaisuudessa vaatimuksena.

Tässä opinnäytetyössä selvitetään hiilijalanjälkilaskennan perusteet sekä selvitetään lainsäädännön ja määräyksien tuomat vaatimukset vähähiilisuuden osalta. Opinnäytetyö on toiminnallinen sekä tutkimuspainotteinen. Työn tavoitteena on luoda Terramare Oy:lle Excel-laskenta-alusta vesirakennushankkeen päästöjen arvioinnin työkaluksi sekä tutkia esimerkkihankkeen kautta vesirakennushankkeen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen määrä, sekä kartoittaa hankkeen päästöjen jakautuminen. Tuloksien pohjalta arvioidaan potentiaaliset päästöjen vähennystoimet sekä selvitetään, voidaanko vesirakennushankkeen päästöjä vähentää kuinka tehokkaasti.

## 2 Vähähiilisen rakentamisen tiekartta

Vuonna 2024 julkaistussa vähähiilisen rakentamisen tiekartassa on selvitetty koko Suomen rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vuosittainen hiilijalanjälki. Tiekartan tilaajana toimi Suomen hallitus ja tiekartan laati Rakennusteollisuus RT yhdessä yhteistyökumppanien kanssa. Tiekartassa on määritetty päästövähennystoimet sekä menetelmät niiden saavuttamiseksi. Tiekartan tavoitteena on tunnistaa merkittävimmät päästölähteet sekä selvittää vähähiilisyyteen tähtäävät tärkeimmät toimenpiteet. Laskelman mukaan rakennettu ympäristö tuotti Suomessa vuonna 2021 14,5 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>e päästöjä, vuoteen 2017 verrattuna kokonaispäästöt laskivat 15 %. (Rakennusteollisuus, 2024, s. 63)

Merkittävin osa rakennetun ympäristön hiilidioksidipäästöistä koostuu olemassa olevan rakennuskannan käytönaikaisesta energiankulutuksesta. Olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuuden parantaminen on merkittävässä roolissa päästöjen vähennystalkoissa. Rakennetun ympäristön aiheuttamien päästöjen vähentämisessä on myös tärkeää huomioida työmaatoimintojen sekä rakennusmateriaalien aiheuttamat päästöt. Suomessa vuonna 2021 talo- ja infrarakennussektorin rakentamisaikaisten päästöistä 65 % aiheutui rakennusmateriaalien valmistuksesta. (Laine, ym., 2024, ss. 26-32) Infrarakentamisen päästöjen vähentämisessä korostuu merkittävästi työmaatoimintojen

tehostaminen, kiviainesten alueellinen tehokas hyödyntäminen sekä kierrätys- ja uusiomateriaalien suosiminen.

### 3 Green Deal

Green Deal -sopimus on luotu edistämään kestävä kehityksen tavoitteita. Se on määräaikainen sopimus, joka solmitaan valtion ja elinkeinoelämän välillä. Sopimus voidaan solmia julkisen sektorin kanssa, kuten julkisten virastojen tai kuntien kanssa. Yksittäinen yritys ei kuitenkaan voi toimia sopijaosapuolena vaan sopijana toimii elinkeinoelämää edustava toimialajärjestö ja kuntaryhmittymä. Sopijaosapuolet sitoutuvat sopimuksessa tavoitteisiin, joiden tulokset ovat suhteellisen nopeita sekä seurattavissa. Sopimuksen etuna on sen joustavuus sopijaosapuolien välillä, joka mahdollistaa uusien ja innovatiivisten ratkaisujen löytymisen. Sopimus rajataan aina alakohtaisesti ja tavoitteet asetetaan sen mukaisesti. (Ympäristöministeriö, 2024a)

Rakennussektorin päästövähennys talkoissa olisi tärkeää, että tilaaja osapuolina toimivat kunnat ja julkinen sektori osallistuisivat aktiivisesti Green Deal -sopimuksiin, joka toisi Päästön Työmaa -konseptin yleisemmäksi rakennusalalla. Päästötön Työmaa konsepti on Green Deal -sopimukseen liittyvä tavoite. Tavoitteena on, että sopimuksen solmineiden toimijoiden rakennushankkeet olisivat vuoden 2025 loppuun mennessä fossiilittomia ja vuoteen 2030 mennessä 50 % työmailla olevista työkoneista sekä kuljetuksista käyttäisi energian lähteenään sähköä, biokaasua tai vetyä. (Ympäristöministeriö, 2024b)

Esimerkiksi Helsingin, Vantaan, Espoon, Turun kaupungit ovat solmineet kyseisen sopimuksen, jonka myötä näiden toimijoiden urakkahankinnoissa noudatetaan päästöttömän työmaan kriteerejä. Hankkeen tilaajan noudattaessa päästöttömän työmaan toimintamallia aiheuttaa tämä urakoitsijan kalustolle tiettyjä teknisiä vaatimuksia, joita urakoitsijan voi olla hankala toteuttaa ilman, että hankkeen kustannusarvio nousisi, jonka myötä hankkeiden kokonaishinnat voivat nousta.

## 4 Kasvihuonekaasut ja niiden vaikutus

Kasvihuonekaasut lämmittävät ilmastoa absorboimalla itseensä auringosta tulevaa lämpösäteilyä. Liiallisen lämpöenergian sitoutumisen vuoksi ilmaston keskilämpötila kohoaa, joka kiihdyttää kasvihuoneilmiötä, jonka myötä ilmastomme muuttuu. Liiallinen ilmaston keskilämpötila nousu muuttaa ilmastoamme, jonka myötä keskilämmöt kasvavat, vesi- ja lumimäärät muuttuvat sekä ääri-ilmiöt yleistyvät.

Vuoden 2024 kesäkuun jälkeen maapallon keskilämpötila on ollut 1,5 celsiusastetta korkeampi viimeisen 12 kuukauden aikana verrattuna esiteolliseen aikaan vuosina 1850–1900. Esimerkiksi vuoden 2023 kesäkuu oli Suomessa 1,5–3,5 celsiusastetta tavanomaista lämpimämpi. Erityisen paljon lämpimämpää oli Lapissa, jossa mitattiin useilla havaintoasemalla 4 celsiusasteen eroja verrattuna vertailukauden 1991–2020 keskilämpötilaan. (Euroopan parlamentti, 2023)

Kasvihuonekaasuja esiintyy luonnostaan ilmakehässä mutta ihmisen toiminta lisää merkittävästi näiden kaasujen määrää. Luonnostaan ilmakehässä esiintyviä merkittäviä kasvihuonekaasuja ovat, vesihöyry (H<sub>2</sub>O), hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>), dityppioksidi (N<sub>2</sub>O) ja otsoni (O<sub>3</sub>). Kasvihuonekaasujen molekyylirakenteet mahdollistavat lämpöenergian sitoutumisen itseensä tietyillä aallonpituuksilla. Ilmakehää merkittävästi lämmittävät kaasut, joita vapautuu ilmakehään ihmisen toiminnan seurauksena, ovat vesihöyry, hiilidioksidi, metaani ja fluoratut kasvihuonekaasut. (Ilmasto-opas, 2022)

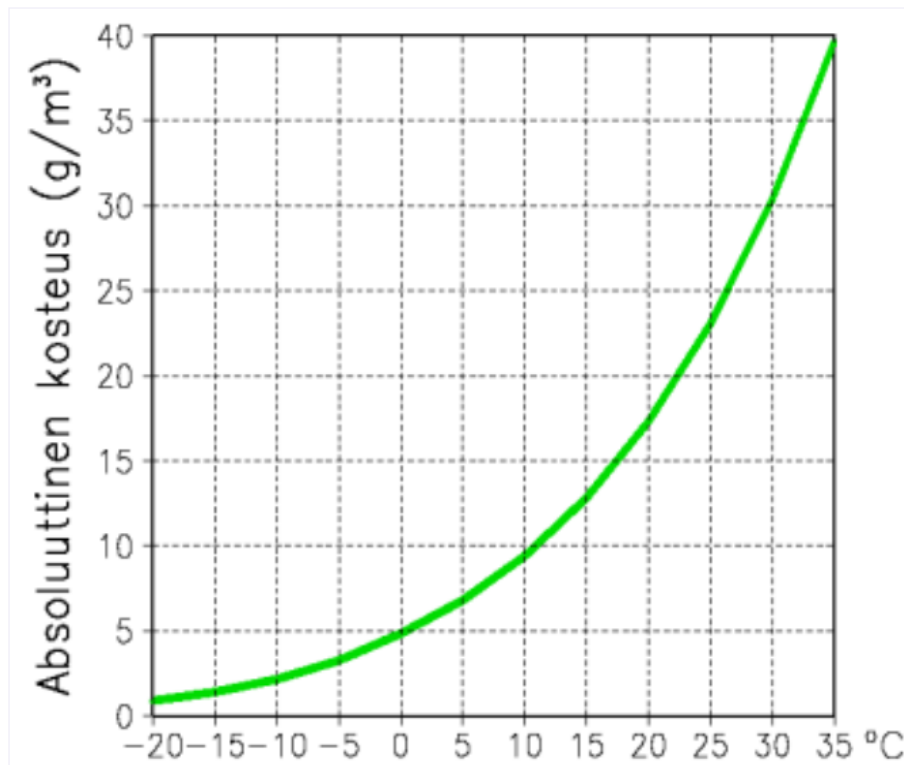
### 4.1 Vesihöyry

Vesihöyryn osuus luonnollisessa ilmaston lämpenemisessä on suurin ja se on merkittävä kasvihuonekaasu maapallon luonnollisessa lämmöntasausjärjestelmässä. Ihmisen tuottama vesihöyry ei itsessään ole merkittävä ilmaston lämmön nousun kannalta mutta keskilämpötilan nousu aiheuttaa myös vesihöyrypitoisuuden kasvua. Vesihöyryn lisääntynyt määrä aiheuttaa vastaavasti vahvistavan palauteilmiön. (Ilmasto-opas, 2020)

Teetettyjen mallikokeiden perusteella voidaan arvioida, että vesihöyryn aiheuttama palauteilmiö kaksinkertaistaa muiden kasvihuonekaasujen vaikutuksen, sillä keskilämmön noustessa yhden celsiusasteen vesihöyrypitoisuus nousee noin 7 %, joka vahvistaa merkittävästi lämpöenergian absorptumista. Kuva 1 havainnollistaa vesihöyrypitoisuuden

eksponentiaalisen kasvun lämpötilan noustessa. Lämpötilan ollessa 0 celsiusastetta kuutiometrissä ilmaa voi olla maksimissaan 5 grammaa vettä, vastaavasti lämpötilan ollessa 30 celsiusastetta kuutiometrissä ilmaa voi olla maksimissaan 30 grammaa vettä (Ilmasto-opas, 2020)

Kuva 1. Vesihöyryn määrän muutos kuutiometrissä (Ilmasto-opas, 2020).



## 4.2 Hiilidioksidi

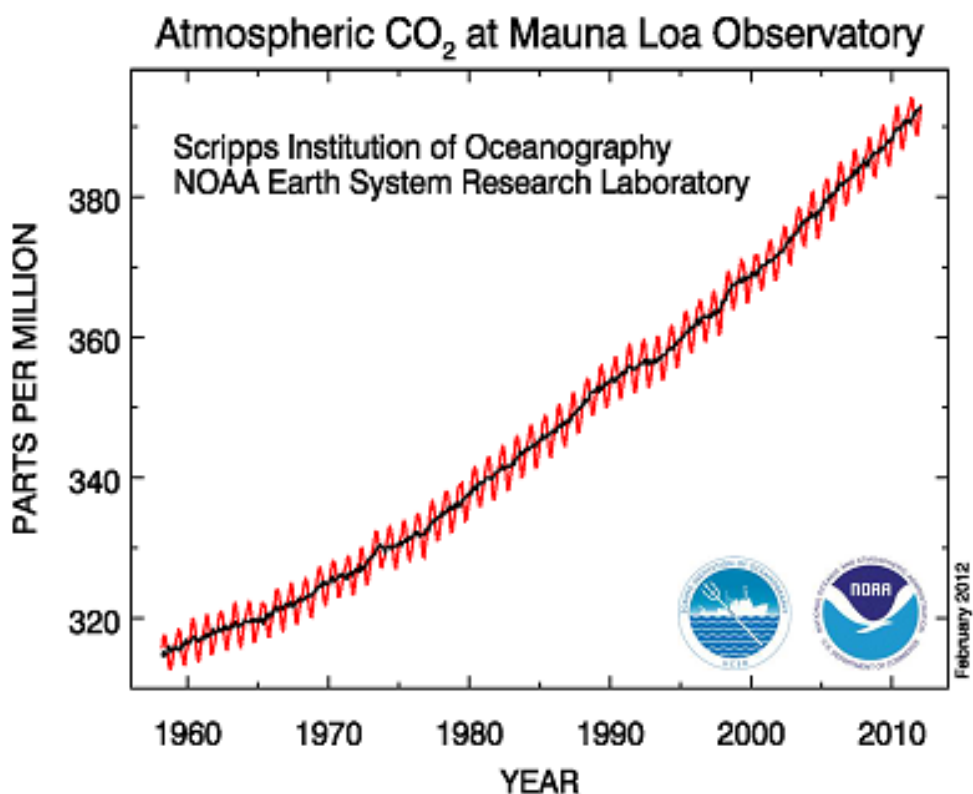
Hiilidioksidi on merkittävin kasvihuonekaasu, jota ihmiskunta tuottaa ilmakehään. Hiilidioksidin osuus kaikista kasvihuonekaasuista on noin 80 %. Hiilidioksidia syntyy eniten fossiilisten polttoaineiden käytöstä sekä trooppisten metsien tuhoamisesta ja maankäytön muuttumisesta. Hiilidioksidi absorboi itseensä tehokkaasti infrapunasäteilyä, jonka myötä auringosta säteilevän lämpöenergian lämpövaikutus kohoaa merkittävästi. Metsien tuhoutuminen ja maankäytön muuttuminen edesauttaa tärkeiden hiilinielujen vähentymistä. Hiilinielujen rooli hiilen kiertokulussa on tärkeä, sillä hiili varastoituu hiilinieluihin toimien luonnollisena termostaattina ilmakehän lämmönsäätelyssä. (Tykkä, 2023)

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksia on mitattu 1950-luvulta lähtien, sitä varhaisempien aikojen hiilidioksidipitoisuuksia voidaan arvioida napajäätiköiden sisälle jääneistä kaasukuplista. Mittauksia vertaamalla voidaan todeta, että hiilidioksidipitoisuudet ilmakehässä ovat nousseet teollistumista edeltävästä ajasta lähes 50 %.

Hiilidioksidipitoisuus ennen teollistumista on ollut noin 280 ppm (miljoonaosaa) ja vuonna 2019 pitoisuus oli noin 419 ppm. Keskimäärin hiilidioksidipitoisuus kohoaa noin 2 ppm vuodessa nykyisellä tahdilla. (Ilmasto-opas, 2019) Kuvassa 2 esitetään Mauno Loan havaintoasemalta mitattuja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksia vuosilta 1958–2011.

Pystyakseli kuvaa hiilidioksidipitoisuutta tilavuuden miljoonaosina (ppm). Vaaka-akseli kuvaa aikaa vuosina. Kuvasta voidaan havaita hiilidioksidipitoisuuden selvä kohoava kasvu.

Kuva 2. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu vuosina 1958–2011 (Ilmasto-opas, 2019).



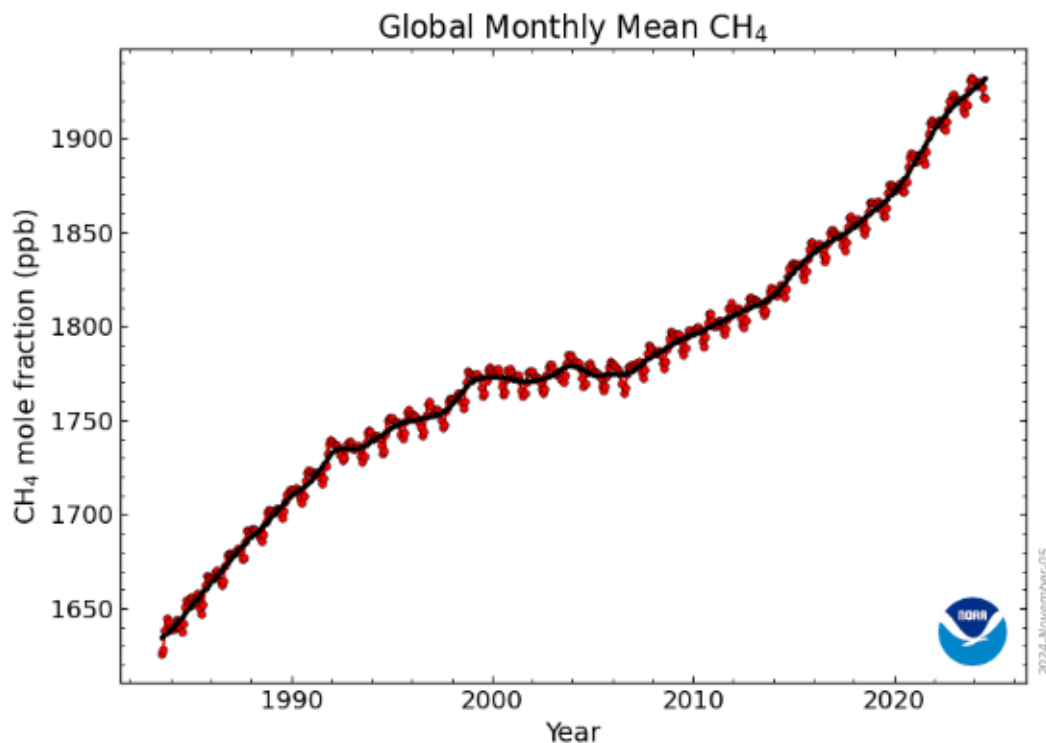
### 4.3 Metaani

Metaani (CH<sub>4</sub>) on voimakas kasvihuonekaasu, jonka lämmönsitomiskyky hiilidioksidiin verrattuna on moninkertainen. Metaania syntyy elonperäisen aineen hajoamisprosessissa, jossa hiili ja vety yhtyvät. Suurin osa (60 %) ilmakehässä olevasta metaanista on peräisin ihmisen toiminnasta. Ilmakehään päätyvän metaanin pääosallinen lähde on maatalous sekä kaasun- ja öljynjalostus. The Global Methane Budget- tutkimuksessa on listattu merkittävämpien metaanipäästöjen aiheuttajat ja määrät. Tutkimuksen mukaan ihmisen tuottaman metaanipäästöjen määrä vuonna 2017 oli noin 407 milj. tonnia. Ilmaston lämmön kohoaminen altistaa ikiroudan sekä merenpohjan jäisten kerrosten sulamisen, joka altistaa ilmaston suuremmille metaanipäästöille. Suurin osa maapallolla olevasta metaanista sijaitsee ikiroudassa sekä merenpohjan kerrostumissa. (Jensen, 2023)

Metaanin puoliintumisaika ilmakehässä on 10–12 vuotta. Hajoamisreaktio saa energian auringon lämpösäteilystä ja hajoamisreaktion hajoamistuotteina syntyy hiilidioksidia sekä vettä. (Ilmasto-Opas, 2013) Lyhyen elinkaarensa vuoksi metaanipäästöjen vähentäminen tuottaisi suhteellisen nopean avun ilmaston lämpenemisen hillitsemiseksi. COP26 ilmastokokouksessa tehtiin Global Methane Pledge -aloite, jonka tavoitteena on pyrkiä vähentämään metaanipäästöä 30 % vuoteen 2030 mennessä.

Metaanin määrän vähentämiseksi on kehitettävä uusia teknologioita ja yhtenä ehdotuksena esimerkiksi on kerätä ilmakehästä metaania ja muuttaa se hiilidioksidiksi zeoliitin avulla. Teknologiat kuitenkin laahaavat perässä ja isompien metaanipäästölähteiden siirtyessä vähemmän kehittyneisiin maihin vaikeuttavat metaanipäästöjen vähentämistä merkittävästi. (Nature , 2024) Kuvassa 3 on esitetty maailmanlaajuisten metaanipäästöjen kehitys vuosina 1983–2023. Kuvaajasta voidaan todeta, että vuonna 1980 metaanipitoisuus on ollut noin 1650 ppb (miljardiosaa) ja vuonna 2022 se on ollut noin 1900 ppb.

Kuva 3. Metaanipitoisuuden kehitys (Ilmasto-opas, 2022).



#### 4.4 Fluoratut kasvihuonekaasut

Fluoratut kasvihuonekaasut eli F-kaasut ovat erittäin voimakkaasti ilmastoa lämmittäviä kaasuja. F-kaasujen ryhmään kuuluvat fluorihilivedyt (HFC-yhdisteet), perfluorihilivedyt (PFC-yhdisteet), rikkiheksafluoridi (SF<sub>6</sub>) ja typpitrifluoridi (NF<sub>3</sub>). Näitä kaasuja käytetään mm. lämmönsiirto- ja kylmäaineissa, palontorjunnassa, aerosoleissa ja liuottimissa. F-kaasuilla on korvattu ensimmäisen ja toisen sukupolven kylmäaineita, joiden haittavaikutuksena oli ilmakehän otsonikerroksen tuhoutuminen. Näiden kylmäaineiden luopumisesta sovittiin Montrealin pöytäkirjassa, joka solmittiin vuonna 1987. F-kaasut eivät tuhoa otsonikerrosta mutta niiden ilmastoa lämmittävä vaikutus verrattuna hiilidioksidiin on 1000 kertainen. Tiedetyt F-kaasut kertyvät myös vesiekosysteemiin aiheuttaen haittaa niiden suojojen myrkyllisyyden vuoksi. (Ympäristö, 2024)

Vuonna 2015 voimaan tullut F-kaasusetus pyrkii vähentämään fluorikaasujen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä 60 % vuoteen 2030 mennessä. Asetuksessa on määritetty käyttörajoituksilla ja kiintiöillä. Korkean GWP (lämmityspotentialin) omaavien kaasujen

käyttö on kielletty asetuksen myötä 2020 vuodesta lähtien. Asetuksessa on myös määritetty pätevyysvaatimuksia sekä sähköisen rekisterin raportointia varten.

(Ympäristöministeriö, 2014, ss. 1-2) Kuviossa 4 on esitetty erilaisten kylmäaineiden GWP-arvo sekä hiilidioksidipäästöjä vastaava arvo tonneissa. Taulukosta voidaan todeta, että kyseisten F-kaasuksi luokiteltujen kylmäaineiden lämmityspotentiaali on suuri.

Kuva 4. Kylmäaineiden GWP-arvoja (Uudenmaan Kone- ja Kylmätekniikka, n.d.).

| Kylmä-<br>aine | GWP-<br>arvo | Hiilidioksidiekvivalenttonneja<br>vastaava kylmäainetäytös<br>kilogrammoissa |                                    |                                     |
|----------------|--------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|
|                |              | 5 tonnia<br>CO <sub>2</sub> -ekv.  | 50 tonnia<br>CO <sub>2</sub> -ekv. | 500 tonnia<br>CO <sub>2</sub> -ekv. |
| R428A          | 3607         | 1,39   | 13,8                               | 138                                 |
| R434A          | 3245         | 1,54   | 15,4                               | 154                                 |
| R437A          | 1805         | 2,77   | 27,7                               | 277                                 |
| R438A          | 2265         | 2,21   | 22,0                               | 220                                 |
| R442A          | 1888         | 2,65   | 26,4                               | 264                                 |
| R448A          | 1387         | 3,60   | 36,0                               | 360                                 |
| R449A          | 1397         | 3,58   | 35,7                               | 357                                 |
| R450A          | 604          | 8,28   | 82,7                               | 827                                 |
| R452A          | 2140         | 2,34   | 23,3                               | 233                                 |
| R507           | 3985         | 1,25   | 12,5                               | 125                                 |
| R508A          | 13214        | 0,38   | 3,78                               | 37,8                                |
| R508B          | 13396        | 0,37   | 3,73                               | 37,3                                |
| R513A          | 631          | 7,92   | 79,2                               | 792                                 |
| ISCEON® MO89   | 3805         | 1,31   | 13,1                               | 131                                 |

## 5 Rakentamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt

Suomessa ja muissa EU-maissa rakentamisen aiheuttama hiilijalanjälki on tärkeä indikaattori kestävän rakentamisen kehityksessä. Rakentamisen aiheuttaman ilmastorasituksen ja hankkeiden hiilijalanjäljen arvioiminen on ollut jo osana tiettyjä rakennushankkeita.

Uuden rakennuslain tullessa voimaan tulee rakennushankkeen ilmastaselvityksen tekeminen pakolliseksi. (Rakennusteollisuus, 2023). Rakennushankkeiden hiilijalanjälkeä arvioitaessa on tärkeää ymmärtää merkittävimmät päästölähteet rakennussektorilla.

## 5.1 Rakentamisen päästörakenne

Rakentamisen vaikutus ympäristöön on moniulotteinen. Rakentaminen vaikuttaa rakentamiskaupan ympäristöön maankäytön takia, jolloin luonnontilassa oleva ympäristö muuntautuu osaksi rakennettua ympäristöä, ja rakentamisen aiheuttamat kasvihuonepäästöt rasittavat ympäristöä. Suuri osa ympäristöä kuormittavista tekijöistä aiheutuu rakennusteollisuudesta, sekä rakentamisen eri prosesseista. Suurimman päästörasitteen aiheuttaa olemassa olevan rakennuskannan energiankäyttö. Rakennuskannan päästövaikutuksia laskettaessa on huomioitava tuotteen koko elinkaari, rakentamisesta purkuvaiheeseen. (Mattila, 2015, s. 116)

Vähähiilisen rakentamisen tiekartassa rakennussektorin aiheuttamaa hiilijalanjälkeä voidaan tarkastella talonrakennus ja infrarakennus sektorien välillä. Vuonna 2021 lasketun rakennussektorin tuottaman hiilijalanjäljen suuruus oli 14,5 miljoonaa tCO<sub>2</sub>e, josta 86 % aiheutui rakennusten rakentamisesta ja rakennusten käyttämästä energiasta, vastaavasti infrarakentamisen osuus oli 14 %. (Laine, ym., 2024, s. 26)

Mikäli rakennusten käyttämää energiankulutusta ei huomioida, talo- ja infrarakentamisen aiheuttama hiilijalanjälki oli yhteensä noin 5,3 miljoonaa tCO<sub>2</sub>e. Infrarakentamisen aiheuttama hiilijalanjälki oli noin 2,03 miljoonaa tCO<sub>2</sub>e. (Laine, ym., 2024, s. 26)

Rakennetun ympäristön aiheuttaman energiankäyttö voidaan jakaa käytönaikaiseen energiankäyttöön sekä rakentamisaikaiseen energiankäyttöön. (Laine, ym., 2024, s. 5)

Tässä opinnäytetyössä keskitytään rakentamisaikaiseen energiankäytön aiheuttamiin hiilidioksidipäästöjen laskentaan ja isoimpien päästölähteiden tunnistamiseen, joka aiheutuu rakennusmateriaalien- ja tuotteiden valmistuksesta, logistiikasta, työmaatoiminnoista sisältäen rakennusmateriaalien ja tuotteiden yhdistämisen lopputuotteeksi.

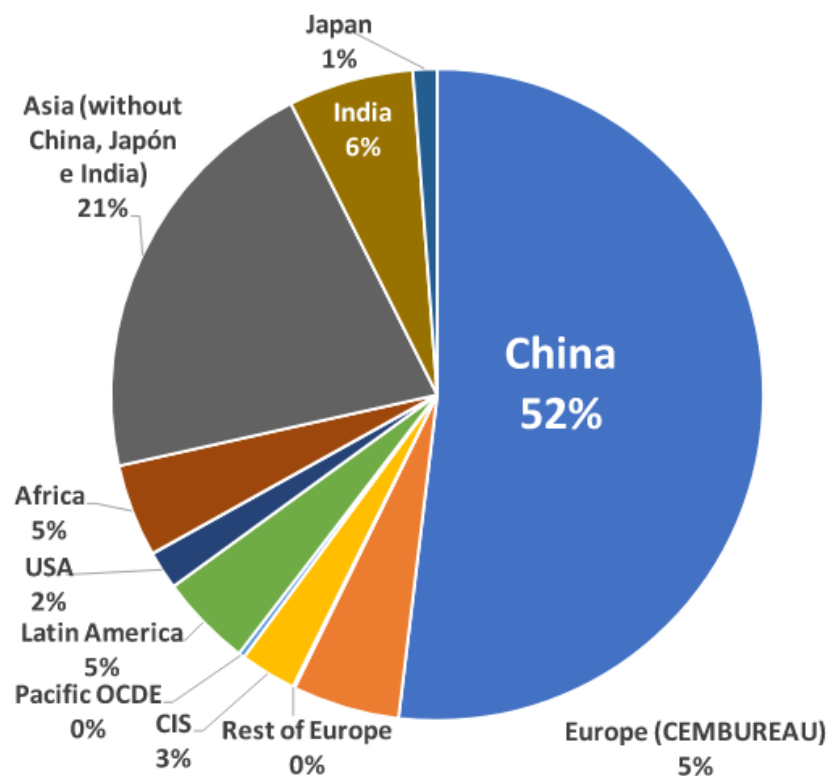
## 5.2 Betonirakentaminen

Betoni on maailmanlaajuisesti toiseksi eniten käytetty materiaali, jonka edelle menee vain vesi, joka on betonin tärkeä raaka-aine. Betonin käyttöä lisää sen edullisuus, lujuus, muokattavuus sekä turvallisuus. Betonin ominaisuuksia pystytään muuttamaan käyttökohteen mukaan, mikä lisää betonin käyttömahdollisuuksia. Betoni koostuu kolmesta peruskomponentista kiviaineksesta, sementistä ja vedestä. Betonia käytetään vuosittain

globaalisti noin 13 miljardia tonnia, josta suurimman osan käyttää nopeasti teollistuva Kiina. Kiina käytti vuosina 2011–2013 yhteensä noin 6,6 miljardia tonnia betonia. Verrattuna Yhdysvaltoihin, joissa käytettiin betonia noin 4,4 miljardia tonnia vuosina 1901–2000. (Tulimaa, 2024)

Betoniteollisuus ry on arvioinut, että Suomessa infrarakentamisen vuosittainen betonin käyttömäärä on 200 tuhatta kuutiometriä betonielementteinä ja valmisbetonia noin 680–940 tuhatta kuutiometriä. (Laine, ym., 2024, s. 24) Kuvassa 5 on esitetty globaalien sementintuotannon jakautuminen, kuvasta voidaan havainnoida Kiinan merkittävä osuus sementin tuotannossa, joka heijastaa myös Kiinan vuosittaista betonin käyttöä. Kiinan osuus globaalissa sementintuotannossa on 52 %.

Kuva 5. Vuoden 2020 sementintuotannon jakautuminen globaalisti (Heatmap, 2023)



Tämän opinnäytetyön esimerkkikohteessa pääasiallisena rakennusmateriaalina, oli teräsbetoni. Hankkeen betonirakenteet olivat pääsääntöisesti runsaasti raudoitettuja, jolloin

on tärkeää huomioida betoniterästen osuus hankkeen päästörakenteessa. Hankkeen betonirakentamisesta aiheutuvia päästöjä laskettaessa, on huomioitava myös betonin kuljetuksesta sekä pumppauksesta syntyvät päästöt. Betonimäärän ollessa suuri, kertyy betonin kuljetuksesta aiheutuvia päästöjä merkittävä määrä

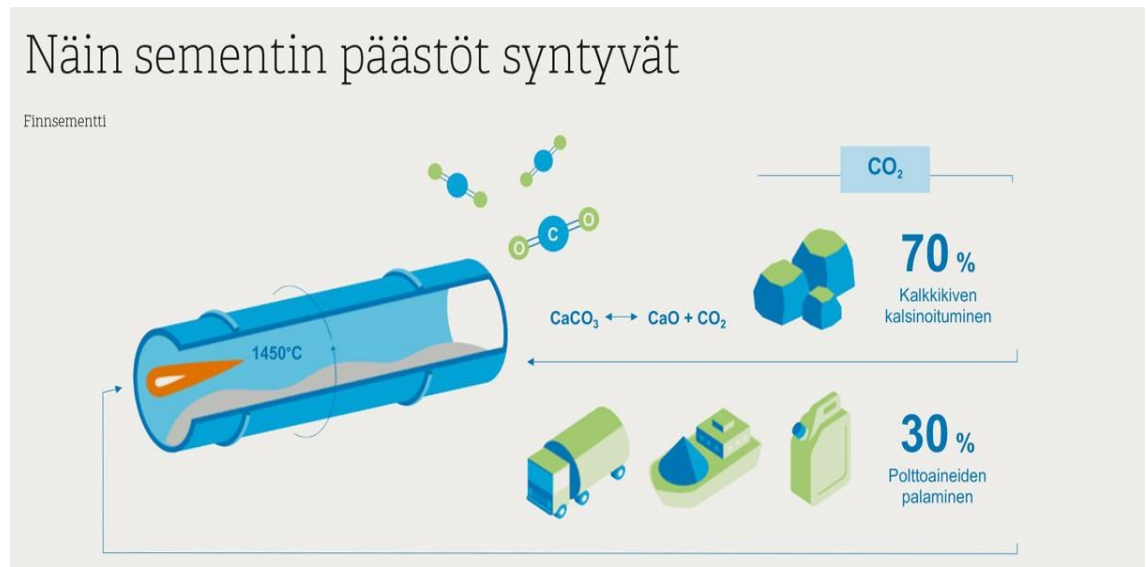
### 5.2.1 Sementti

Sementti on betonin peruskomponenteista tärkein, se toimii betonin sideaineena, joka mahdollistaa betonin kovettumisreaktion. Sementti muodostaa yhdessä veden kanssa kemiallisen reaktion, jossa ensin muodostuu sementtiliima, joka kovettuu lopulta sementtikiveksi. (Tiehallinto, 2007) Sementin osuus betonissa betonilaadusta riippuen on normaalisti noin 200–400 kg/m<sup>3</sup>. Sementtiä valmistetaan pääosin kalkkikivestä, joka on maankuoren yleisin kivilaji. (betoni, n.d.-a) Sementti koostuu pääosin kalkkikivestä saatavasta kalsiumkarbonaatista (CaCO<sub>3</sub>) sekä valmistuksessa käytetään piioksidia (SiO<sub>2</sub>), rautaoksidia (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ja alumiinioksidia (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). (Finnsementti, 2022a) Sementin valmistuksen aiheuttamat kasvihuonepäästöt aiheutuvat pääosin sen valmistukseen tarvittavasta energiamäärästä sekä kuumennusprosessissa syntyvästä hiilidioksidista, joka aiheutuu, kun kalkkikiveä kuumennettaessa kalkkikivi kalsinoituu, joka aiheuttaa hiilipitoisen karbonaatin muuttumisen oksidiksi, joka vapauttaa hiilidioksidia. Kalkkikivestä suoraan vapautuva hiilidioksidin määrä on noin 400 kg CO<sub>2</sub>/tn. (Mattila, 2015, s. 117)

Sementin valmistuksessa sen raaka-aineet jauhetaan ensin hienoksi jauheeksi raakajauhemylyssä, jonka jälkeen raakajauhe kuumennetaan kiertouunissa 1400 °C, tässä lämpötilassa raakajauheen komponentit sintraantuvat sementtiklinkkeriksi. (Finnsementti, 2022a) Sementtiklinkkeri jauhetaan sementtilaadun mukaan tiettyyn karkeuteen ja mukaan lisätään seosaineita sekä kipsiä. Seosaineena voidaan käyttää masuunikuonaa, joka on peräisin teollisuustuotannon sivuvirroista.

Sementin ominaisuuksia säädetään klinkkerin karkeudella, sekä seosaineiden suhteilla. (Finnsementti, 2022a) Puhtaan sementin tuottaminen aiheuttaa 700–800 kg CO<sub>2</sub>-eq/t, josta sementin polttaminen kiertouunissa aiheuttaa noin 600 kg CO<sub>2</sub>, jäljelle jäävä osuus koostuu louhinnasta, jauhatuksesta sekä logistiikasta. (Rudus, 2024) Kuvassa 6 on havainnollistettu sementin tuotantoprosessista syntyvien hiilidioksidipäästöjen syntyminen. Suurin osa päästöistä syntyy kalkkikiven kuumennusprosessista, jossa kalkkikivestä vapautuu hiilidioksidia sekä uunin tarvitsemasta polttoaineesta.

Kuva 6. Sementtituotannon päästöjen syntyminen (Ahlberg, 2020, s. 76)

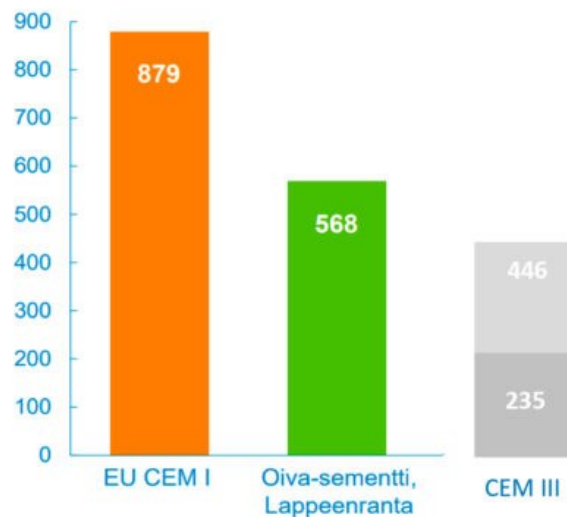


Suomen suurin sementinvalmistaja Finnsementti on sitoutunut STBi-aloitteeseen, jonka tavoitteena on edistää ilmastotoimia yksityisellä sektorilla. Se tavoitteena on pyrkiä edistämään yritysten päästövähennystavoitteiden toteutumista. Finnsementin tavoitteena on vähentää päästöjään 30 % vuoteen 2030 mennessä. Merkittävin päästövähennyskeino on vähentää CEM I- ja CEM II -sementtien käyttöä ja lisätä CEM III -sementtien osuutta (Finnsementti, 2024a). CEM I -sementti kuormittaa ilmastoa enemmän kuin CEM III -sementti sillä se saa sisältää korkeintaan 5 % muita seosaineita.

Valmisbetonilaaduissa, joissa käytetään CEM I-sementtiä voidaan käyttää vähemmän muita seosaineita, jonka takia tällaiset betonilaadut kuormittavat enemmän ilmastoa (Finnsementti, 2020). CEM III -sementissä muiden sideaineiden esimerkiksi masuunikuonan määrä voi olla peräti 65 %, joka vähentää merkittävästi tarvittavaa sementtiklinkkerin määrää. (Finnsementti, 2022b) Kuvassa 7 on vertailtu CEM I ja CEM III sementtien ominaispäästöjä. Kuvasta voidaan havainnoida CEM I-sementin ominaispäästön olevan noin kaksikertainen verrattuna CEM III-sementtiin

Kuva 7. Sementtilaatujen ominaispäästöt (betoni, n.d.-b)

## Sementin ominaispäästöt kg-CO<sub>2</sub>/sementtitonni



### 5.2.2 Vähäpäästöisemmän betonin käyttö

Masuunikuonan käyttäminen yhdessä sementin kanssa, vähentää tarvittavaa sementtiklinkkerin määrää, joka vähentää sementin tuotannon aiheuttamia kasvihuonepäästöjä. Masuunikuonan käyttöä voidaan rajoittaa kohteissa, joissa rakenteet altistuvat jäätymiselle sekä suolarasitukselle. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi sillat tai laiturirakenteet. Tällaisissa kohteissa käytetään niin sanottuja infrabetonilaatuja. Infrabetonit ovat pääsääntöisesti huokoistettuja säänkestäviä betoneita, joille on määritetty tarkat raja-arvot Väyläviraston toimesta. Masuunikuonan käyttö vähentää betonin suolapakkaskestävyyttä.

Väylävirasto on määrittänyt masuunikuonan enimmäismäärän huokoistetussa betonissa, joka on maksimissaan 50 % sideaineen määrästä. (Väylävirasto, 2020, s. 16)

Masuunikuonan käytölle voidaan suunnittelijan toimesta asettaa myös vaatimuksia, esimerkkihankkeen betonirakenteissa ei sallittu masuunikuonan käyttöä. Betonit, joissa käytetään Oiva tai CEM III sementtilaatuja kutsutaan yleisesti vihreämmiksi betoneiksi.

Vihreämmillä betoneilla tarkoitetaan sellaisia betonilaatuja, joissa voidaan käyttää sementin lisäksi muita seosaineita, kuten masuunikuonaa. Tällaisia sementtilaatuja kutsutaan seossementeiksi. Seossementtejä käytettäessä on kuitenkin huomioitava, että esimerkiksi masuunikuonaa sisältävissä seossementeissä betonin lujuudenkehitys on hitaampaa, jolloin jälkihoito- ja muotipurkamisaika pidentyy. Lujuuden kehittymisen hitaus voi olla etenkin massiivivaluissa suotava ominaisuus. Lujuudenkehityksen hidastuessa betonin lämmönkehitys ei ole niin nopeatempoista, jolloin vältetään betonin lämpötilan nousu liian korkeaksi. (Punkki, 2021, s. 78)

Masuunikuona vaikuttaa myös betonin muihin ominaisuuksiin. Merkittäviä heikentäviä ominaisuuksia on huonompi pakkasuolakkestävyys sekä karbonatisoitumisreaktion nopeutuminen. Markkinoilla on myös muita vaihtoehtoisia sideaineita, joita saadaan teollisuuden sivuvirroista sekä jättemateriaaleista. Tällaisia sideaineita ovat esimerkiksi kalsium-aluminaattisementti, kalsium-silikaattisementti ja kalsium-sulfoaluminaattisementti. Näillä seosaineilla voidaan vähentää betonin ominaispäästöjä mutta niillä pyritään myös muokkaamaan betonien muita ominaisuuksia. (Punkki, 2021, s. 79)

Eri betonilaaduille on annettu BY-Vähähiilisyysluokitukset, joka on kansallinen luokitus betonin hiilijalanjäljelle. Luokitus jaottelee betonilaadut viiteen luokkaan hiilidioksidipäästöjen perusteella. Luokituksen alapuolelle liittyy 18 eri betonilaatua. Luokitusta merkitään lyhenteellä GWP.NN, GWP lyhenne muodostuu Warming Potential ja NN on päästötaso verrattuna referenssitason. Betonilaadun, jonka vähähiilisyysluokitus on GWP.55, on tämän hiilidioksidipäästöt korkeintaan 55 % referenssitasosta. (Suomen Betoniyhdistys ry, n.d.)

Laiturihankkeissa yleisesti on määritetty jäätymistaso N2000 korkeusjärjestelmässä -2,5 metristä ylöspäin. Jäätymistason yläpuolella olevat rakenteet altistuvat jäätymiselle sekä suoloille herkemmin. Näissä rakenteissa käytetään säänkestäviä betonilaatuja, jotka kestävät suolapakkasrasitusta. Jäätymistason alapuolisissa rakenteissa ei käytetä huokoistettua betonia, jolloin voitaisiin pohtia voisiko kyseisissä rakenteissa mahdollisesti käyttää kuonabetonia tietyillä rajoitteilla.

### 5.2.3 Kiviaines

Betonin kiviaines eli runkoaine koostuu hiekasta, sorasta tai kalliomurskeesta. Betoni on kahdesta faasista muodostunut yhdistelmämateriali, jossa sementtiliima ympäröi kiviaineksia, muodostaen perusrunkorakenteen betonille. Runkoaineen määrä ja rakeisuus määräytyy betonilaadun mukaan. Runkoaineen tilavuusosuus riippuen betonilaadusta on tyypillisesti 65–80 %. Suomessa runkoaineena käytetään tyypillisesti graniittipohjaista luonnonkiviaineista. Suomessa luonnonkiviaines varannot ovat riittävät sekä laadullisesti hyvät. (Betonitieto, 2018)

Riittävän laadukasta luonnonkiviaineksista saadaan hiekka- ja soramuodostelmista, mutta tyypillistä näille alueille on pohjaveden läheisyys. Pohjaveden läheisyyden takia näiden alueiden kiviaineksien ottoa rajoitetaan, koska pohjaveden määrää ja laatua ei haluta häiritä. Kiviaineksen ottamislupia ei yleisesti myönnetä asutuksen läheisyyteen, koska kiviaineksen ottaminen aiheuttaa melu- ja pölyhaittoja. Näiden seikkojen myötä Suomessa on siirrytty suosimaan murskattua kiviainesta, joka murskataan pääosin louhitusta kalliosta. (Betonitieto, 2018) Kalliomurske tuotetaan kalliosta, joka louhitaan, murskataan ja seulotaan. Murskatun kiviaineksen tuottaminen tuottaa suhteellisen paljon kasvihuonepäästöjä, sillä tuotantoketjussa käytetään fossiilisia polttoaineita sekä räjähteitä. (Kokkonen, 2024, ss. 9-11)

### 5.2.4 Harjateräs

Betonirakentamisessa oleellisessa osassa on betoniteräksien eli harjateräksen käyttö. Betoniraudoituksen päätarkoitus on lisätä betonirakenteiden veto- ja leikkauskestävyyttä. Runsaasti raudoitetuissa kohteissa betonirakenteissa on syytä huomioida myös teräksen valmistuksen aiheuttamat päästöt. Pohjoismaissa tehtyjen kylmävalssattujen betoniterästen pääraaka-aine on pääosin romuterästä, joka on kierrätettyä. Romuteräksestä valmistettujen raudoitteiden kasvihuonepäästö on 400 kg-CO<sub>2</sub>/tn. (Mattila, 2015, s. 119)

Betonirakenteet, joissa käytetään jänneraudoituksia eli jännitettäviä teräspunoksia, on jännepunokset valmistettava rautamalmista, joka nostaa jänneterästen valmistamisesta syntyvän kasvihuonepäästön määrän 1000 kg-CO<sub>2</sub>/tn. Suomessa betoniteollisuuden vuonna 2012 käyttämän betoniterästen valmistuksessa syntyvä hiilijalanjälki vastaa

määrältään noin 15 % sementin valmistuksen syntyvistä kasvihuonepäästöistä. (Mattila, 2015, s. 119)

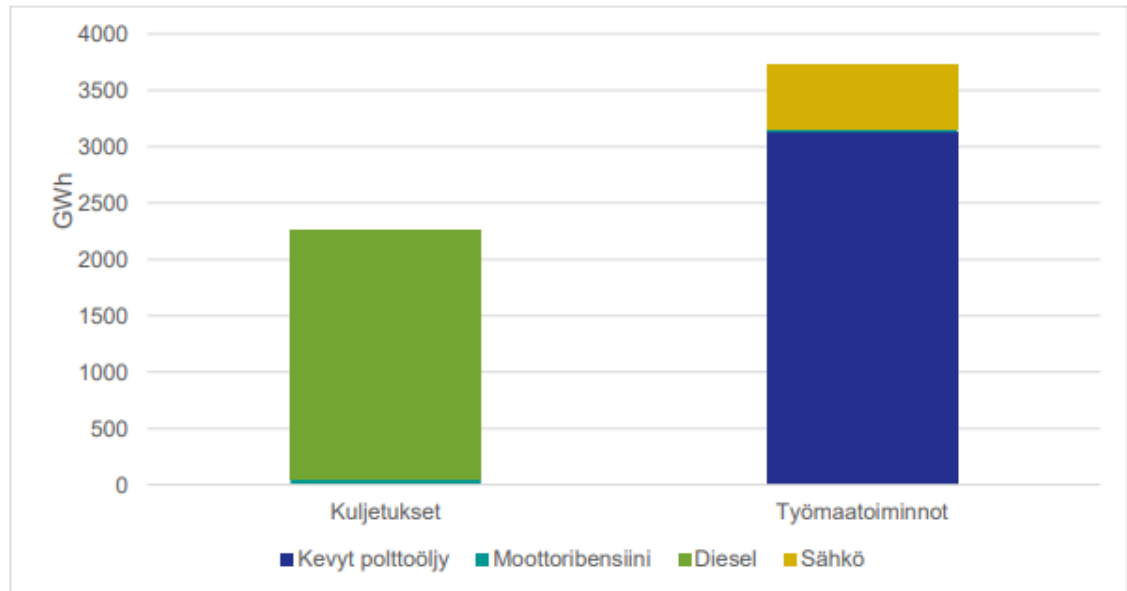
### 5.3 Logistiikka ja työmaatoiminnot

Rakentamisaikainen logistiikka ja työmaatoiminnot käsittävät rakentamisesta aiheutuvat päästöt lukuun ottamatta rakennusmateriaalien valmistamisesta aiheutuvia päästöjä. Logistiikan aiheuttamat päästöt aiheutuvat kuljetusajoneuvojen sekä työkoneiden polttoaineiden käytöstä. Koneiden aiheuttamat päästöt aiheutuvat pääosin polttomoottorien käyttämän dieselpolttoaineen palamisreaktiosta. Kuvassa 8 on esitetty työmaakuljetusten ja työmaatoimintojen käyttämä energia vuonna 2021. Kuvassa ei ole esitetty työkoneiden käyttämää energiaa. Kuvasta voidaan todeta, että suurin osan käytetystä energiasta on tuotettu kevyellä polttoöljyllä. (Laine, ym., 2024, s. 21)

Kuljetuskalustosta aiheutuvia päästöjä voidaan vähentää kiinnittämällä huomiota kuljetusetäisyyksiin, kuljetusten kuormatehokkuuteen sekä suosimalla vähäpäästöisiä polttoaineita. Työkoneiden aiheuttamia päästöjä voidaan vähentää parantamalla työkoneiden käytön optimointia, suosimalla olosuhteiden salliessa sähkökäyttöisiä työkoneita ja siirtymällä biopolttoaineiden käyttöön.

Maanrakennustöissä syntyviä kasvihuonepäästöjä voidaan myös vähentää massatalouden optimoinnilla, jolloin pyritään tehostamaan hankkeessa muodostuvien maa- ja kiviainesten hyödyntäminen hankkeen käyttöön. Ihannetilanne olisi, että hanke olisi omavarainen maa- ja kiviaineksen ottamisen sekä käytön suhteen ja massojen siirrot olisivat mahdollisimman vähäisiä, jolloin välttyttäisiin ylimääräiseltä työkoneiden käytöltä. (Helsingin kaupunki, 2024, ss. 8-9) Esimerkkihankkeessa tehdään maarakentamisen osalta pääosin täyttötöitä, jolloin massataloutta ei voida optimoida muutoin kuin vähentämällä turhia massojen siirtoja.

Kuva 8. Kuljetusten ja työmaatoimintojen energiankulutus (Laine, ym., 2024).



## 5.4 Louhinta ja kalliokiviaineksen ottaminen

Kalliokiviaines on kalliosta yleisemmin louhimalla irrotettua kiviainesta, joka murskataan ja seulotaan tiettyyn kokoluokkaan. Kiviaineksien tyypilliset käyttökohteet ovat maan- ja rautateiden rakennekerrokset sekä betoniteollisuus. Kalliokiviaineksien käyttö on lisääntynyt, sillä luonnonkiviaineksen otto on tarkoin säädeltyä, sillä yleisesti luonnonkiviottoalueet sijaitsevat pohjavesialueilla. Suomessa kalliokiviaineksen käyttö kattaa 60 % kaikesta käytetystä kiviaineksesta. (Geologian tutkimuskeskus GTK, 2019)

Kalliokiviaines irrotetaan kiinteästä kalliosta räjäyttämällä ja räjäytysaineita varten kallioon porataan louhintasuunnitelman mukaisesti tarvittava määrä panostusreikiä poravaunulla. Poraamisesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt aiheutuvat koneen käyttämän polttoaineen palamisreaktiossa syntyvistä päästöistä. Panostusreikiin panostettava räjähdde on avolouhinnassa yleisemmin pumpattava emulsioräjähdysaine, joka yleisesti on kemiittiä tai anfoa. (Pinomäki & Vuento, 2023, s. 8) Räjäyttämisen jälkeen suuret lohkarit murskataan tyypillisesti kaivinkoneeseen kiinnitetyllä hydraulisella iskuvasaralla niin, että lohkarit mahtuvat esimurskaukseen. Murskausvaihe jaotellaan kolmeen eri vaiheeseen,

esimurskaukseen, välimurskaukseen ja jälkimurskaukseen. Kalliokiviaines käy tietyt murskausvaiheet lävitse riippuen halutusta raekoosta.

Esimerkkihankkeen maanrakentamistöissä käytetään täyttömateriaaleina karkeaa louhetta raekooltaan (#0...500) ja (#0...300) ja rakennekerroksissa eri murskeita. Karkeat louheet käyvät murskausvaiheessa läpi vain esimurskausvaiheen ja rakennekerroksissa käytettävät murskeet käyvät läpi väli- ja jälkimurskauksen riippuen rakennekerroksessa käytettävästä raekoosta. Murskauksesta syntyvä hiilijalanjälki koostuu pääosin työssä käytettyjen työkoneneiden käyttämän polttoaineen palamisreaktiossa syntyvästä hiilidioksidista ja muista palamiskaasuista. Mitä hienommaksi kiviaineen raekoko halutaan, sitä enemmän murskausvaiheessa aiheutuu päästöjä. (Kokkonen, 2024, s. 24)

Hankkeessa suoritettiin myös merenpohjan vedenalaisia louhintatöitä, joiden hiilidioksidipäästöjen syntymekanismi on hieman erilainen verrattuna maanpäällä tapahtuvaan louhintaan. Vedenalaisessa louhinnassa panostus kentän panostusreiät porataan poralautassa olevilla poratorneilla, jonka jälkeen panostuskenttä panostetaan ja räjäytetään. Louhinnan jälkeen louhittu materiaali ruopataan ylös ja kuljetetaan proomuilla, joko vedenalaiselle läjitysalueelle tai nostetaan proomusta kaivinkoneella väliläjitys paikalle. Kuvassa 9 esitetty Terramare Oy poralautta, joka on varustettu kahdella poratornilla.

Kuva 9. Kuvassa Rockmate poralautta sekä edustalla George palkoproomu (Donner, 2022).



## 6 Lainsäädäntö ja sääntely vähähiilisessä rakentamisessa

Jotta rakennussektorin eri toimijat saavuttavat laaditut päästöjen vähennystavoitteet on selvää, että tavoitteiden ohelle on säädettävä säädöksiä sekä lakeja, jotka ohjaavat konkreettisia toimia. Suomessa rakennussektorilla merkittävin uudistus lainsäädännön saralla on vuoden 2025 alussa voimaan tullut uusi rakennuslaki (Uusi rakentamislaki (751/2023), jossa on säädetty useita vaatimuksia rakentamisen vähähiilisyden edistämiseksi. Suomen toimintaa ohjaavat useat muut sopimukset sekä kansainväliset tavoitteet. (Ympäristöministeriö, 2019)

Seuraavissa alaluvuissa on käyty läpi merkittävimpiä säädöksiä sekä lakeja, jotka ohjaavat vähähiilistä rakentamista. Monet säädökset tulevat suoraan EU:n tasolta ja ne nojautuvat säädettyihin tavoitteisiin, joiden tavoitteena on pyrkiä vähentämään rakennussektorin päästöjä merkittävästi.

### 6.1 EU:n säädökset ja ilmastopolitiikka

Euroopan unioni pyrkii olemaan hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, vastaavasti Suomen oma tavoite on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi on säädetty vihreän kehityksen ohjelma (EU Green Deal) ja vuonna 2022 hyväksytty uusi ilmastolaki, jonka myötä päästövähennystavoitetta vuoden 1990 tasosta kiristettiin 40 prosentista 55 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Tämän tavoitteen myötä säädettiin 55-valmiuspaketti, jonka nimi viittaa 55 % päästövähennystavoitteeseen. (Laine, ym., 2024, s. 9)

Euroopan unionin säätämä ilmastopolitiikka sekä tavoitteet ohjaavat jäsenmaiden ilmastotoimia. EU:n ilmasto- ja energiapolitiikka on sopeutettu toisiinsa, mikä tarkoittaa, että energiapolitiikan säädökset ohjaavat myös jäsenmaiden päästökehitystä. EU:n ilmasto- ja energialainsäädäntö sisältää muun muassa päästökaupan, taakanjakoasetuksen, uusiutuvan energian direktiivin (RED), energiatehokkuusdirektiivin sekä hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin. Näiden säännöksiä rinnalla toimii muitakin säädöskokonaisuuksia, jotka ohjaavat kohti päästövähennystoimia. EU on esimerkiksi

säätänyt kiertotalousohjelma sekä vähähiiliseen rakentamiseen tähtäävän säädöskokoelman. (Laine, ym., 2024, s. 9)

EU:n energiankulutuksesta noin 40 % aiheutuu rakennetun ympäristön käyttämästä energiasta ja energiankäytön aiheuttamista kasvihuonepäästöistä rakennukset aiheuttavat 36 %. Mikäli 55 % päästövähennystavoite saavutettaisiin, on rakennussektorin pystyttävä vähentämään päästöjään 60 % verrattuna vuoden 2015 tasoon. Rakennussektorin aiheuttamat päästöt jakautuvat päästökauppa- ja taakanjakosektoriin. Päästökaupan alaisuuteen kuuluu rakennusten käyttämän energia sekä energiantensiivisten materiaalien valmistus ja käyttö. Näihin materiaaleihin sisältyy esimerkiksi sementti ja teräs. Taakanjakosektori sisällyttää rakentamisen aiheuttamat päästöt (työmaatoiminnot ja työkoneet) sekä rakennusten erillislämmityksen. (Laine, ym., 2024, ss. 8-9)

## 6.2 55-valmiuspaketti

EU:n päästöjä vähennystavoitetta ohjaavat useat säädökset ja suunnitelmat. Rakennussektorin päästöjä vähennystavoitetta ohjaa eniten 55-valmiuspaketti, joka koostuu useista säädöksistä. Paketti on merkittävä säädöskokonaisuus, jonka avulla pyritään saavuttamaan 55 % päästöjä vähennys vuoteen 2030 mennessä. Pakettiin kuuluvat mm. rakennussektorin vähähiilisyteen tähtäävät osat. (Laine, ym., 2024, s. 9)

Valmiuspaketti sisältää yhteensä 12 lainsäädäntöehdotusta, jotka kaikki liittyvät toisiinsa. Seuraavissa alaotsikoissa käydään läpi merkittävimmät rakennussektoria ohjaavat säädökset.

### 6.2.1 Päästökauppa

Päästökauppa on taloudellinen ohjauskeino, jolla pyritään vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. Päästökauppa tarkoittaa päästöoikeuksien kauppaa, jossa kaupan piiriin kuuluvat yritykset tarvitsevat päästöjään vastaavan määrän päästöoikeuksia. Päästöoikeudet jaetaan yrityksille historiallisten päästöjen mukaisesti. Päästöoikeuksia on mahdollista ostaa kulloisenkin markkinatilanteen mukaiseen hintaan. (Motiva, 2024)

55-valmiuspaketissa päivitettiin EU:n päästökauppatavoitetta 43 prosentista 62 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä, mikä tarkoittaa sitä, että kaikista EU:n kasvihuonepäästöistä 62

% kuuluu päästökaupan piiriin vuoteen 2030 mennessä. Päästökaupan tavoitteena on vähentää vuosittain myönnettyjä päästöoikeuksia 4,3 % vuosien 2024–2027 ja 4,4 % vuosien 2028–2030 aikana. Päästökaupan piirissä on ollut sellaisia sektoreita, joille on myönnetty ilmaisia päästöoikeuksia, kiristyksien takia ilmaisista päästöoikeuksista tullaan luopumaan ja kyseiset sektorit saatetaan hiilirajausmekanismin (CBAM) piiriin. (Laine, ym., 2024, s. 10) Päästökaupan kiristyessä ja päästöoikeuksien vähentyessä on rakennussektorin vähennettävä etenkin korkean energiasiteetin omaavien tuotteiden käyttämistä tai korvaamalla näitä vähähiilisillä tuotteilla.

### 6.2.2 Hiilirajamekanismi (CBAM)

Hiilirajamekanismilla pyritään vähentämään hiilivuotoa. Hiilivuoto aiheutuu EU:n ulkopuolelta tuotavista korkean energiasiteetin omaavista tuotteista, jotka eivät kuulu EU:n päästökaupan piiriin. Hiilirajamekanismi on eräänlainen tullimaksu, jolla pyritään ehkäisemään yritysten tuotannon siirtämistä kolmansiiin maihin ja pyrkiä kannustamaan kolmansia maita kehittämään tuotteidensa valmistuksen energiatehokkuutta. (Laine, ym., 2024, s. 10)

Hiilirajamekanismi vaikuttaa vain niiden rakennusyhtiöiden toimintaa, jotka hankkivat materiaaleja EU:n ulkopuolelta. EU:n ulkopuolelta materiaaleja hankkivilta yrityksiltä vaaditaan tuotteiden suorien ja epäsuorien päästöjen ilmoittaminen sekä näiden yritysten on hankittava päästöjä vastaava määrä hiilitullisertifikaatteja. (Laine, ym., 2024, s. 10)

### 6.2.3 Rakennustuoteasetuksen päivitys

Keväällä 2022 EU:n komission ehdottaman uuden rakennustuoteasetuksen tavoitteena on edistää vähähiilistä rakentamista sujuvoittamalla rakennustuotteiden standardointiprosesseja. Nykyinen rakennustuoteasetus ei kata kierrätettyjä rakennustuotteita, joka vaikeuttaa kiertotalouden kehittymistä rakennussektorilla.

Päivitetty versio helpottaisi kierrätettyjen rakennustuotteiden uusiokäyttöä ja painoittasi uusien rakennustuotteiden suunnittelussa tuotteiden pitkäikäisyyttä sekä kierrätettävyyttä tuotteen elinkaaren päätyttyä. (Laine, ym., 2024, s. 14) Kierrätettyjen rakennustuotteiden standardointi voi olla vaikeaa, sillä kierrätetyn rakennustuotteen käyttäjän tulisi määrittää tuotteelle laadulliset vaatimukset sekä käyttöikä.

#### 6.2.4 Taakanjakosektorin päivitys

EU:n taakanjakosektorin päästövähennystavoitteet päivitettiin aikaisemmasta 29 % vähennyksestä 40 % vähennykseen vuoden 2005 tasoon verrattuna. Suomen kannalta päivitys nostaa päästövähennystavoitteen kyseisellä sektorilla 50 %:iin. Vuoden 2021 taakanjakosektorin päästöt olivat EU:n alueella 27,2 Mt CO<sub>2</sub>-ekv. Suomessa taakanjakosektorin päästöistä 7 % aiheutuu rakennusten erillislämmityksestä. Erillislämmityksestä aiheutuvia päästöjä pyritään hillitsemään vähentämällä öljylämmityksen käyttöä ja lisäämällä uusiutuvien energiamuotojen käyttöä lämmitystarkoituksissa. (Laine, ym., 2024, s. 14)

Työmaiden aiheuttamiin taakanjakosektorin päästöihin pyritään vaikuttamaan lisäämällä vähäpäästöisten polttoaineiden käyttöä työkoneissa sekä logistiikassa, jotka liittyvät työmaatoimintoihin. (Laine, ym., 2024, s. 14) Vähäpäästöisempiin työkoneisiin siirtyminen vaatii rakennusalan toimioilta investointeja työkoneiden päivittämiseen, sekä työmaatoimintojen muuttamista niin, että esimerkiksi täyssähköisten työkoneiden latausmahdollisuus olisi työmailla riittävä eikä aiheuttaisi koneiden työtehokkuuden laskemista. Rakennusalan yritysten investointihalukkuutta vähäpäästöisempiin työkoneisiin tulisi lisätä lisäämällä investointien houkuttelevuutta.

### 6.3 Uusi rakentamislaki

Vanha maankäyttö- ja rakennuslaki (Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999, MRL) muuttui uuden rakentamislain tullessa voimaan, kun uusi rakentamislaki (Uusi rakentamislaki (751/2023) korvasi maankäyttö- ja rakennuslain rakentamisen osuuden. Uuden rakentamislain tavoitteena on edistää rakentamissektorin päästöjen vähennystoimia, edistää kiertotaloutta sekä parantaa rakentamisen laatua ja lisätä rakentamisen digitalisaatiota. Merkittävämmät rakentamislain muutokset, jotka ovat päästövähennys tavoitteiden piirissä, liittyvät rakennusten vähähiilisyiden ja elinkaariominaisuuksien säädöksiin. (Rakennustieto, 2024)

Uuden rakentamislain tuomat säädösohjailut eivät kuulu infrarakentamisen piiriin, mutta tämä ei tarkoita, etteikö infrarakennushankkeiden päästöjen vähennystoimia tulisi kehittää, sekä lisätä hankekohtaisen hiilijalanjäljen arvioimista. Etenkin hankkeet, jotka ovat osittain tai kokonaan EU rahoitteisia, voi eurooppalainen ohjaus vaikuttaa hankkeen

arviointiperusteisiin. Väylävirasto sekä ELY-keskus laativat suunnitteluhankinoissaan hankkeiden hiilijalanjälkiarvioinnin, joka tehdään väyläviraston laatiman infrarakentamisen vähähiilisyden arviointimenetelmän pohjalta. (Väylävirasto, 2023, ss. 7-8)

## 7 Hiilidioksidipäästöjen laskenta

Opinnäytetyön toiminnallisessa osuudessa lasketaan vesirakennushankkeen aiheuttama hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskeminen voidaan toteuttaa useilla eri laskentaperiaatteilla riippuen yrityksestä tai sen toimintatyypistä. Hiilijalanjälkilaskelmassa käytetty laskentaperiaate on valittu käytettäväksi koska, Terramare Oy:n emoyhtiö Boskalis käyttää samaa laskentatapaa, jolloin yrityksen sisäinen vertailu olisi yhdenmukaisempaa.

Valittu laskentapa ei välttämättä ole vertailukelpoinen esimerkiksi Väyläviraston laatiman infrarakentamisen vähähiilisyden arviointimenetelmän kanssa. Laskentatapojen välillä rakennusosien sekä päästökokonaisuuksien jakautuminen eroaa toisistaan merkittävästi.

### 7.1 GHG-protokolla

Opinnäytetyön tuloksena syntyvässä työmaakohtaisessa hiilijalanjälkilaskelmassa käytetään laskentaperiaatteena GHG-protokollaa. GHG-protokolla (Greenhouse Gas Protocol) on maailmanlaajuinen standardi, jota organisaatiot voivat käyttää hiilijalanjäljen laskennan toteuttamiseen. GHG-protokolla on saanut alkunsa 1990-luvun loppupuolella ja se on vakiintunut laskentastandardi, joka mahdollistaa yhdenmukaisen raportoinnin eri yritysten välillä. GHG-protokolla on tärkeässä roolissa yrityksen päästörakennetta laskettaessa, sillä vuonna 2024 voimaan tullut CSRD-direktiivi ja siihen sisältyvät ESRS-standardit pohjautuvat kyseiseen protokollaan. (EcoOnline, 2024)

CSRD-direktiivi (Corporate Sustainability Reporting Directive) pyrkii yhtenäistämään eri organisaatioiden ja yritysten kestävyysraportteja. Yhtenäisten kestävyysraporttien pohjalta organisaatioiden vastuullisuutta sekä kestävyyttä on helpompi arvioida. Tämä mahdollistaa myös tasavertaisen raportoinnin, sillä organisaatioiden kestävyysraportit tulee tarkastuttaa kolmannen osapuolen toimesta. Direktiivin alaisuuteen kuuluu tällä hetkellä noin 49 000 yritystä ja kestävyysraportointia tullaan vaatimaan pienemmiltäkin yrityksiltä tulevien vuosien aikana. (EcoOnline, 2023)

### 7.1.1 Scope 1-luokka

Yrityksen aiheuttamat suorat päästöt kuuluvat GHG-protokollan Scope 1-päästöluokkaan. Yrityksen aiheuttamiin suoriin päästöihin kuuluvat esimerkiksi yrityksen käyttämien työkoneiden, ajoneuvojen sekä prosessien aiheuttamat kasvihuonepäästöt. (Corporate Standard, 2015, s. 27) Vesirakennushankkeessa koko työmaan ruoppaus-, louhinta ja maanrakennuskaluston aiheuttamat kasvihuonepäästöt, jotka aiheutuvat fossiilisten polttoaineiden käyttämisestä kuuluvat Scope 1-luokkaan.

Scope 1-päästöt muodostuvat pääosin kaluston käyttämän polttoaineen palamisreaktiossa syntyvistä päästöistä. Kaluston aiheuttama hiilijalanjälki arvioidaan eri tavalla riippuen, minkälaisesta kalustosta on kyse.

### 7.1.2 Scope 2 -luokka

Yrityksen kuluttaman ostetun sähköenergian tuotannosta aiheutuvat kasvihuonepäästöt kuuluvat Scope 2 -luokituksen alaisuuteen. Monen yrityksen päästörakenteessa merkittävin osuus koostuu ostetun sähköenergian tuotannosta aiheutuvista päästöistä. Monelle yritykselle Scope 2 -luokan päästöjen vähentäminen on avainasemassa yrityksen aiheuttamien päästöjen vähentämisissä. (Corporate Standard, 2015, s. 27)

Scope 2 -luokan päästöjä määrittäessä on kaksi eri laskentatapaa, joita molempia on käytettävä. Päästöt lasketaan aluekohtaisella (location based) sekä markkinalähtöisellä (market-based) arvolla. Aluekohtainen laskentatapa perustuu tietyllä alueella syntyvään keskimääräiseen kasvihuonepäästömäärään, joka aiheutuu 1 kWh:n tuottamisesta. Markkinalähtöisessä laskentatavassa otetaan huomioon yrityksen käyttämän sähköenergian alkuperä. Markkinalähtöistä tapaa käyttäessä on sähkön alkuperä todistettava alkuperäistodistuksella. (Scope 2 Guidance, 2011, ss. 25-27) Yksittäisen hankkeen päästörakennetta tarkasteltaessa Scope 2 -luokkaan kuuluvat päästöt eivät ole merkittävässä roolissa, sillä työmaatoimintojen käyttämä sähköenergian määrä ei ole merkittävä verrattaessa Scope 1 -luokan päästöihin. Tämän työn esimerkkihankkeen päästölaskennassa ei huomioida Scope 2 -luokan päästöjä.

### 7.1.3 Scope 3 -luokka

Scope 3 -luokan päästöt ovat yrityksen epäsuoria päästöjä, jotka aiheutuvat yrityksen toiminnoista mutta päästöt syntyvät lähteistä, joita yritys ei itse omista vaan ovat toisen yrityksen aiheuttamia. Scope 3 -luokka jakaantuu kahteen eri luokkaan: ylävirran- sekä alavirranpäästöihin. (Gaib, 2022) Taulukossa 1 on esitetty Scope 3 -luokan ylävirran- ja alavirran päästöt tarkemmin eriteltynä.

Ylävirran päästöihin luokitellaan yrityksen toiminnan edellyttämien tuotteiden tai palvelujen aiheuttamat päästöt. Tällaisia päästöjä ovat esimerkiksi yrityksen käyttämien materiaalien valmistuksesta ja kuljetuksesta, vuokratun omaisuuden tai töihin matkustamisen aiheuttamat päästöt. Alavirran päästöt koostuvat päästöistä, jotka aiheutuvat, kun yritys on myynyt tuotteensa tai palvelun asiakkaalle ja näiden käyttäminen aiheuttaa päästöjä. (Scope 3 Standard, 2011, s. 31) Alavirran päästöjen seuraaminen vaatii yritykseltä vahvaa tahtotilaa sekä resursseja, jotta myydyin tuotteen tai palvelun aiheuttamat päästöt saadaan dokumentoitua.

Taulukko 1. Scope 3 -luokan päästöt jaoteltuna ylävirran sekä alavirran päästöihin

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <p>Ylävirran Scope 3 päästöt</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ostetut tuotteet ja palvelut</li> <li>2. Tuotantohyödykkeet</li> <li>3. Ostetun energian sekä polttoaineen epäsuorat päästöt</li> <li>4. Saapuvat kuljetukset</li> <li>5. Toiminnasta syntyvät jätteet</li> <li>6. Liikematkat</li> <li>7. Työmatkat</li> <li>8. Vuokrattu omaisuus</li> </ol> |
| <p>Alavirran Scope 3 päästöt</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>9. Lähtevät kuljetukset</li> <li>10. Myytyjen tuotteiden käsittely</li> <li>11. Myytyjen tuotteiden käyttö</li> <li>12. Myytyjen tuotteiden elinkaaren loppu</li> <li>13. Franchising</li> <li>14. Sijoitukset</li> </ol>   |

Hankekohtaisessa hiilijalanjälkilaskelmassa Scope 3 -luokan ylävirran päästöt ovat merkittävässä roolissa, sillä hankkeen vaatimien materiaalien määrä on suuri. Hankkeen toteutusvaiheessa materiaalien aiheuttamia ylävirran päästöjä on suhteellisen hankala vähentää, muutoin kuin suosimalla paikallisia toimittajia, jolloin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt minimoitaisiin.

## 8 Boskalis

Terramaren emoyhtiö Boskalis on maailman johtava ruoppaus- ja merirakentamisen toimija. Boskaliksen laajaan osaamisalueeseen kuuluu mm. ruoppaukset, raskaat merikuljetukset ja meriasennukset, hinaukset ja pelastukset sekä sisämaan infrarakennustyöt. Yhtiön vuoden 2023 liikevaihto oli 4.3 miljardia euroa ja henkilöstä noin 11 000. Boskalis toimii 90 eri maassa ja yrityksen laivueeseen kuuluu noin 600 alusta. (Boskalis, 2023b). Boskalis noudattaa vuoden 2015 Pariisin ilmastopöytäkirjassa määritettyjä tavoitteita ja yrityksen tavoitteena on olla ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. (Boskalis, 2023a, s. 18)

Yritys on sitoutunut myös YK:n SDG tavoitteeseen (Sustainable Development Goals), joka pyrkii lisäämään kestävä kehitystä talouden, ihmisten hyvinvoinnin sekä ympäristön kannalta. SDG tavoitteet sisältävät 17 eri päätavoitetta sekä 169 alatavoitetta. Boskalis on määrittänyt viisi päätavoitetta, joihin yritys uskoo eniten pystyvänsä vaikuttamaan. Taulukossa 2 on listattu Boskaliksen toimintaan vaikuttavat tärkeimmät päätavoitteet. (Boskalis, 2023a, s. 22)

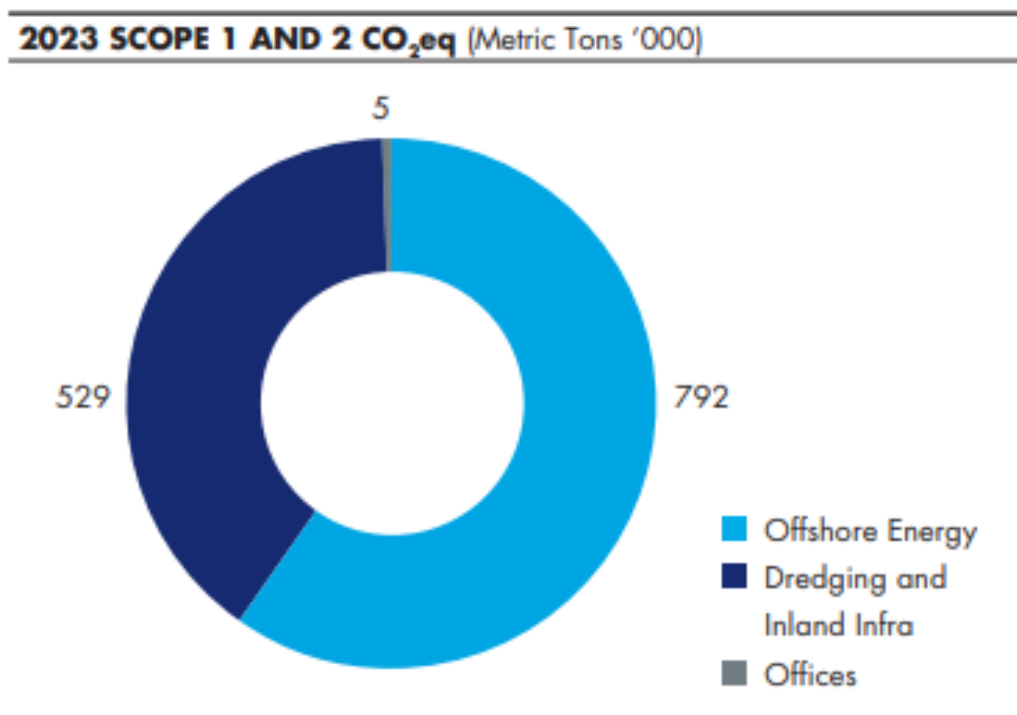
Taulukko 2. Boskaliksen valitut päätavoitteet

|              |  |
|--------------|--|
| <b>SDG 7</b> | Edullinen sekä puhdas energia              |
| <b>SDG 8</b> | Ihmisarvoinen työ sekä taloudellinen kasvu |
| <b>SDG 9</b> | Teollisuus, innovaatio ja infrastruktuuri  |

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| <b>SDG 13</b> | Ilmastotoimet      |
| <b>SDG 14</b> | Vedenalainen elämä |

Boskalis noudattaa oman hiilijalanjälkensä arvioinnissa GHG-standardia ja yrityksen alusten aiheuttamista päästöistä 99 % kuuluvat Scope 1 ja 2-luokkaan. Nämä päästöt olivat vuonna 2023 yhteensä 1,326 CO<sub>2</sub>eqMT. Kuviossa 10 on esitetty Boskaliksen Scope 1 ja 2-päästöt jaoteltuna ruoppaus-, infra ja merituulivoimalarakentamisen sekä toimistojen käyttämän energian aiheuttavista kasvihuonepäästöistä.

Kuva 10. Boskaliksen hiilidioksidipäästöt vuonna 2023 (Boskalis, 2023a, s. 60)



## 8.1 Road to net-zero

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO (International Maritime Organization) asetti vuonna 2023 tavoitteekseen, että alusten aiheuttamat kasvihuonepäästöt olisivat nettomääräisesti nolla vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteeseen kuuluu kaksi välitavoitetta, vuonna 2030 alusten kasvihuonepäästöt tulisi vähentyä 20 %, vuonna 2040 päästöt tulisi vähentyä 70 % vuoden 2008 tasoon verrattuna. Merkittävämmät päästöt aiheutuvat fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja yhtenä tavoitteena on, että vuoteen 2030 mennessä vähintään 5 % alusliikenteen käyttämästä energiasta tulisi tuottaa kokonaan tai lähes kasvihuonepäästöttömillä polttoaineilla tai energialähteillä. (Valtionneuvosto, 2023)

Boskalis tukee IMON: n tavoitetta ja yhtiö on asettanut välitavoitteekseen vähentää hiili-intensiteettiä 10 % vuoteen 2030 mennessä. Hiili-intensiteetti tarkoittaa kasvihuonepäästöjen suhdetta yrityksen liikevaihtoon (tCO<sub>2</sub>/€). Boskaliksella on oma hiili-intensiteettisuhde, joka on vertailukelpoinen IMON: n intensiteettisuhteen kanssa. Yhtiön omassa hiili-intensiteetissä mitataan alusten energiatehokkuutta vertaamalla alusten aiheuttamia kasvihuonepäästöjä verrattuna alusten tehoon. (Boskalis, 2023b)

Merkittävimmän osan yrityksen päästörakenteesta aiheutuu alusten ja koneiden käytöstä, joten yritys on kehittänyt aktiivisesti kalustoaan sekä uusia tekniikoita vähentääkseen päästöjään. Alapuolella taulukko 3, jossa on esitetty merkittävimmät päästövähennystoimet, joita Boskalis on kehittänyt toiminnassaan. (Boskalis, 2023a, ss. 34-37)

Taulukko 3. Päästöjä vähennystoimet

|   |   |
|---|---|
| <p><b>Akustot</b></p>                               | <p>Aluksiin asennettavat akustot voivat vähentää alusten aiheuttamia päästöjä DP-operaatioiden (Dynamic Positioning) aikana 20 %. Satamassa ollessaan alukset voivat käyttää varavirtalähdettään toimintojen ylläpitämiseksi.</p> |
| <p><b>Energiatehokkuutta mittaavat laitteet</b></p> | <p>Aluksiin kehitetyt operatiivisen tehokkuuden ja polttoaineiden kulutuksen mittaavia laitteiden avulla voidaan saavuttaa 5 %</p>  |

|   |   |
|---|---|
|   | <p>polttoainevähennykset optimoimalla koneiden käyttö.</p>  |
| <p><b>Alusten huolto-ohjelma</b></p>                | <p>Vuonna 2023 laadittu huolto-ohjelma, jolla määritetään optimaaliset huoltoaikataulut vaikuttaen alusten polttoainetehokkuuteen.</p>  |
| <p><b>SCR-järjestelmien käyttöönotto</b></p>        | <p>SCR- järjestelmien käyttöönotto, joilla voidaan vähentää 90 % polttoaineen palamisreaktiossa syntyvistä typen oksideista.</p>  |
| <p><b>Aluksien vedenvastuksen pienentäminen</b></p> | <p>Alusten paremman polttoainetehokkuuden kehittäminen vähentämällä rungon aiheuttaa vedenvastusta. Erilaisten pinnoitteiden käyttö, rungon säännöllinen puhdistus, pienemmät vesipainolastitankit, moottorien trimmin optimointi sekä potkurien kiillotus.</p> |
| <p><b>Vaihtoehtoiset energianlähteet</b></p>        | <p>Alusten fossiilisten polttoaineiden korvaaminen vaihtoehtoisilla energianlähteillä.</p>  |
| <p><b>Biopolttoaineen käyttö</b></p>                | <p>Mahdollisuus biopolttoaineiden käyttämiseen aluksissa.</p>   |
| <p><b>Uusiutuvat polttoaineet</b></p>               | <p>Vedyn käyttäminen polttoaineena ruoppausaluksissa. Boskalis kehittänyt pilottihankkeessaan täysin vedyllä operoivan kuokkakauharuoppaajan.</p>   |
| <p><b>Rannikkosähkön hyödyntäminen</b></p>          | <p>Rannikkosähkön hyödyntäminen satamissa olevissa aluksissa. Sähkö voidaan tuottaa uusiutuvasti esimerkiksi aurinkosähköllä.</p>   |

Boskalisen yhtenä välitavoitteena on, että kaikki Alankomaissa toteutettavat maa- ja vesirakennushankkeet toteutettaisiin hiilineutraalisti vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteen myötä yritys on laatinut investointisuunnitelma liittyen puhtaamman energian työkoneisiin. Vuonna 2023 yritys investoi sähköisiin kaivinkoneisiin ja maansiirtoautoihin. Sähköisten työkoneiden myötä Boskalis on hankkinut työmaalle tuotavia latausjärjestelmiä optimoidakseen koneiden tehokkaan käytön. Vuonna 2023 Boskalis toteutti onnistuneesti pilottihankkeen, jossa koekäytettiin täysin vedyllä toimivaa kuokkakauharuoppaajaa. (Boskalis, 2023a, s. 37) Kuvassa 11 esitetty täysin vedyllä toimiva Medusa 2 kuokkakauharuoppaaja.

Kuva 11. Edustalla vedyllä toimiva Medusa 2 kuokkakauharuoppaaja (Boskalis, 2023a, s. 36).



## 9 Tutkimushanke

Tämän opinnäytetyön työmaakohtaisen hiilijalanjälkilaskelman kohteena on HaminaKotkan Mussalon sataman D-osan laajennustyömaa. Hankkeen pääurakoitsijana toimi Boskalis Terramare, jolle kyseinen GHG-laskenta tehtiin. Terramaren päätoimialana on

vesistö- ja rakentaminen ja yritys on erikoistunut satama- ja laiturirakentamiseen, ruoppaus- ja väylärakentamiseen, vedenalaiseen louhintaan sekä ympäristörakentamiseen. Toiminta-alueena pohjoismaat sekä Balttia. Yritys on kokoluokaltaan keskisuuriyrittäjä, henkilöstöä noin 135 henkilöä ja liikevaihtoa edellisellä tilikaudella 35.7 miljoonaa euroa.

Hiilijalanjälkilaskelma toteutetaan GHG-laskentana ja tarvittavat päästökertoimet haetaan kansallisesta infrarakentamisen päästötietokannasta, joka on julkaistu vuonna 2022 Suomen ympäristökeskuksen toimesta. Infrarakentamisen päästötietokannan on tilannut Väylävirasto ja tietokanta tarjoaa Väyläviraston laatimaan vähähiilisen infrarakentamisen arvioinnin tekemiseen tarvittavat tiedot. Infrarakentamisen päästötietokanta on haettavissa CO2data -palvelusta. Tietokantaan on listattu yleisempien tuotteiden keskimääräiset tiedot sekä taustaselvitykset. Tiedot perustuvat julkisiin lähteisiin kuten ympäristöselosteisiin. (Hiilineutraalisuomi, 2024)

Tietokannan pääindikaattorina käytetään ilmastonlämpenemispotentiaalia (GWP), joka kertoo rakennustuotteiden, kuljetuspalveluiden ja työkoneiden aiheuttaman ilmastovaikutuksen verrattuna hiilidioksidiin. GWP-arvot ilmaisevat tuotteen tai toiminnan aiheuttaman hiilidioksidiekvivalentin määrän, joka voidaan esittää eri yksiköissä riippuen siitä, minkälaiseen tuotteeseen tai palveluun se liittyy. Arvoissa huomioidaan vain fossiiliset kasvihuonekaasupäästöt. (CO2data, 2023, s. 2)

Rakennustuotteille GWP-arvo ilmoitetaan usein kilogrammoina hiilidioksidiekvivalenteja (kg CO<sub>2</sub>e) tuotteen painoa kohden. Rakennusmateriaalin mukaan arvoa voidaan käyttää myös esimerkiksi kuutiometriä (m<sup>3</sup>) tai neliometriä (m<sup>2</sup>) kohden. Kuljetusten aiheuttamat GWP arvot ilmoitetaan kuormayksikköä (t) ja kuljetusetäisyyttä (km) kohden (kgCO<sub>2</sub>e/tkm). Työkoneiden aiheuttamat GWP arvot esitetään yleisemmin käyttötuntia (h) kohden (kgCO<sub>2</sub>/h). Tietokannassa on mahdollista ilmoittaa tuotteiden hukkakerroin, joka on tyypillisesti 1–1.15 riippuen käytettävästä materiaalista. (CO2data, 2023, s. 2)

## 9.1 Mussalo D-osan laajennustyömaa

Terramare vastasi Mussalon sataman D-alueen laajennustöistä, joissa rakennettiin uusi 120 metriä pitkä laiturijatke länsiosaan vuosina 2021–2022 sekä jatkettiin D-osan laituria 330 metrillä sataman eteläpäähän vuosina 2022–2023. Näiden rakennustöiden lisäksi Terramare toteutti laiturin rakentamiseen liittyvät vesirakennustyöt. Terramare oli mukana

myös laajennuksen ensimmäisessä vaiheessa, joka toteutettiin vuosina 2018–2019. Tässä vaiheessa rakennettiin 261 metriä pitkä laituri sekä 620 metriä pitkä aallonmurtaja. Lisäksi alueen satama-allasta syvennettiin ruoppauksen ja vedenalaisen louhintatyön avulla. (Boskalis Terramare, n.d.)

GHG-laskenta jaotellaan kahteen pääosioon, vesirakennustöihin sekä laiturirakentamiseen. Vesirakennustöihin sisältyy ruoppaukset, vedenalainen louhinta ja pohjantasaukset sisältäen mobilisaatiot sekä ruoppattujen maamassojen kuljetukset. Laiturirakennustyöt sisältävät maanrakennustyöt, betonityöt, asennustyöt ja työmaan muut toiminnot.

## 9.2 Vesirakennustyöt

Hankkeen vesirakennustyöt käsittivät rantapenkereiden, laiturin perustusalueiden ja laivaväylän ruoppaukset sekä vedenalaisen louhinnan laiturin perustusalueilla ja laivaväylän laajennusalueilla. Vesirakennustöihin sisällytetään myös laiturin perustusalueiden täyttö ja tasaustyöt.

Laiturialueiden merenalaiset perustusalueet ruopattiin tasoon -18,40 m N2000 korkeusjärjestelmässä ja muut satama-altaan sekä väyläalueiden pohjat ruopattiin harausvyöhyteen -17,50 m N2000 korkeusjärjestelmässä. Ruoppaus sekä vedenalaiset louhintatyöt tehtiin samanaikaisesti.

### 9.2.1 Ruoppaus

Urakan ruoppauksissa ruopattiin moreenimaita, louhittua kalliota sekä lieju- ja savimaita. Ruoppauskalustona käytettiin kuokkakauharuoppaajaa sekä kahmariruoppaajaa. Näiden lisäksi ruoppausmaiden kuljetuksessa käytettiin itsekulkevia palkoproomuja. Laiturin perustusalueen taseus suoritettiin uivalla nosturilautalla. Ruopatut, täyttöihin soveltumattomat ruoppausmassat läjitettiin Mussalon vesiläjäytysalueelle, suoraan proomuista. Ruopatut kitkamaat sekä louheet siirrettiin proomuilla rantaan, josta ne kuljetettiin välivarastoon uudelleen käytettäväksi.

Ruoppauksista aiheutuvat kasvihuonepäästöt kuuluvat kokonaisuudessaan Scope 1-luokan päästöihin. Näihin sisällytetään alusten mobilisaatio työmaalle, ruoppaustoiminta,

ruoppausmassojen läjitykset ja kuljetukset, demobilisaatio sekä muiden avustavien alusten käyttö.

### 9.2.2 Louhinta

Urakan louhintatöissä louhittiin satama-altaan pohjan kalliota laiturin perustusalueilla sekä väylän laajennusalueilla. Louhinta toteutettiin uivalla poralautalla, jonka varustukseen kuuluu kaksi poratornia. Vedenalainen louhinta toteutettiin poraamalla ennalta määritetty panoskenttä, jonka jälkeen panostusreiät panostettiin dynamiitilla sekä emulsioräjähteellä. Poralauttaa avusti hinaaja, jota käytettiin lautan siirroissa.

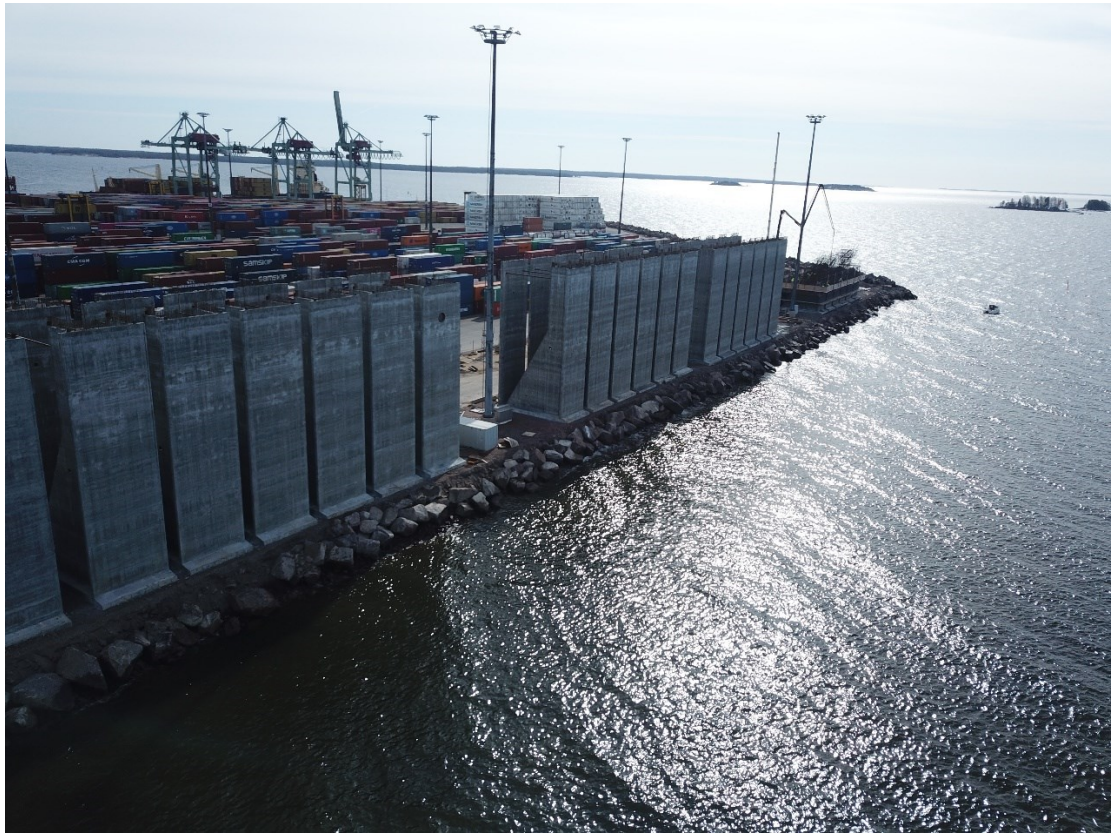
Louhinnan aiheuttamat päästöt kuuluvat suuriltaan Scope 1 -luokan päästöihin. Näiden päästöjen aiheuttajiin kuuluu poralautan mobilisaatio, poraukset, räjäytystyö, demobilisaatio sekä avustavien alusten käyttö. Louhintaräjähteiden valmistus sekä kuljetus työmaalle kuuluvat Scope 3 -luokan ylävirran päästöihin.

## 9.3 Laiturirakentaminen

Hankkeessa rakennettiin 120 metrin pituinen laajennus olemassa olevan laiturin päätysivuun sekä 330 metrin pituinen laiturinjatke olemassa olevan laiturin jatkoksi. Laiturit toteutettiin teräsbetonisina kulmatukimuurilaitureina, jotka perustettiin kalliopinnan päälle tasatun murskekerroksen varaan. Kulmatukimuurilaiturin ensimmäisissä työvaiheissa valmistetaan liukuvalamalla laiturielementit.

Laiturielementtien valmistuksen jälkeen elementit asennettiin merenpohjaan tasatun murskekerroksen päälle, jonka jälkeen elementtien tausta täytettiin sekalouheella. Taustatäyttövaiheen jälkeen kenttä syvätiivistettiin, jonka jälkeen aloitettiin reunapalkkirakenteen teko. Reunapalkkivaiheen aikana tehtiin loput kentän rakennekerrokset ja asennettiin laiturin varusteet sekä asfaltoitiin laiturikentät. Kuvassa 12 valmiita liukuvalettuja laiturielementtejä rantapenkereen päällä.

Kuva 12. Valmiit K- ja S-elementit rantapenkereen päällä (Donner, 2022)



### 9.3.1 Betonityöt ja muut työmaatoiminnot

Kulmatukimuurilaiturin perusrakenne koostuu teräsbetonisista kulmatukimuuri elementeistä (K-elementti) sekä teräsbetonisista saumaelementeistä (S-elementti), joiden päälle rakennetaan teräsbetoninen reunapalkkirakenne. K- ja S-elementit valmistettiin työmaalla liukuvalutekniikalla olemassa olevan rantapenkereen päällä. Laiturielementtejä valmistettiin yhteensä 96 kappaletta ja elementtien kokonaiskorkeus oli 18,8 metriä.

Elementtien valmistuksen jälkeen elementit asennettiin merenpohjaan tasatun murskekerroksen päälle uivalla nosturilautalla, joka saapui Puolasta. Elementtien asennuskalustoon kuului nosturilautta, poralautta, asennuslautta ja avustava moottorivene ja hinaaja. Kuvassa 13 elementtien asennustyöstä kuva. Taustatäyttövaiheen jälkeen taustakenttä syvästiivistettiin.

Kuva 13. Elementtien asennus uivalla nosturilautalla (Donner, 2022)



Syväiivistyksen aikana suoritettiin elementtien edustalla olevien eroosiolaattojen betonoinnit. Eroosiolaatat betonointiin sukellustyönä contractor valumenetelmällä ja yhteensä eroosiolaattaa betonointiin 2250 neliometriä. Syväiivistyksen valmistuttua aloitettiin reunapalkki rakenteen rakentaminen. Reunapalkin rakenne koostuu betonisesta pohjalaatasta, kahdesta seinästä sekä seinien päälle valetusta kannesta. Reunapalkki oli jaoteltu 30 metrin pituisiin jaksoihin, jolloin työt toteutettiin jaksoittain. Kuvassa 14 dronekuva reunapalkkivaiheesta.

Kuva 14. Dronekuva reunapalkkivaiheesta.



Laiturirakennusvaiheen betonirakentamisessa käytetty työkalusto koostui pääosin nostureista, kuljetuskalustosta, pyöräkuormaajista, betonipumpuista, betoniautoista, generaattoreista. Työkoneiden aiheuttamat päästöt kuuluvat Scope 1 -luokkaan poissulkien materiaalien kuljetukset työmaalle, jotka kuuluvat Scope 3 -luokan ylävirran päästöihin. Betonirakenteiden suuren määrän vuoksi näiden päästöjen kokonaismäärä edustaa isoa osaa hankkeen aiheuttamien päästöjen päästöjakaumasta.

Työmaan kuluttama sähköenergia sisältyy Scope 2 -luokan päästöihin mutta hankkeen sähköenergian kulutus oli suhteellisen pieni verrattuna muihin päästöihin. Suuri osa työvaiheiden tarvitsemasta sähköstä tuotettiin dieselkäyttöisillä generaattoreilla, jotka voidaan luokitella Scope 1 -luokan päästöihin.

### 9.3.2 Maanrakennustyöt

Hankkeen maanrakennustöihin sisältyivät, laiturikenttien taustatäytöt, luiskaverhoukset, vesi- ja viemärintyöt. Hankkeen taustatäyttömateriaali oli louhittu sataman läheisyydessä olevalta louheenottoaikalta, josta esimurskattu sekalouhe kuljetettiin työmaalle. Taustatäytöt täytettiin #0...500 sekalouheella sekä 0...300 sekalouheella. Taustatäytön materiaaleina käytettiin myös ruopattuja kitkamaita. Taustatäyttövaiheen jälkeen taustakentät syvästiivistettiin ja seuraavaksi tehtiin vesi- ja viemärintyöt sekä päällysterakennekerrokset. Näiden töiden ohella tehtiin vaaka-ankkureiden ja ankkurilaattojen kaivuutöitä sekä eroosioverhouksia. Kuva 15 dronekuva taustatäyttövaiheesta.

Kuva 15. Taustatäyttövaihe käynnissä (Donner, 2022).



Maanrakennustöiden toteuttamiseen vaadittava kalusto koostui pääosin kaivinkoneista, pyöräkuormaajista, kuorma-autoista, dumppereista, tärjyristä sekä syvästiivistyskoneesta. Näiden työkoneiden aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt kuuluvat Scope 1 -luokkaan ja kiviainesten louhinta, murskaus sekä kuljetukset työmaalle kuuluvat Scope 3 -luokan ylävirran päästöihin. Muut maanrakennustöihin sisältyvät tarvikkeet sekä niiden kuljetukset kuuluvat Scope 3 -luokkaan. Kiviaineksen louhinnasta ja murskauksesta aiheutuvien

päästöjen arvioiminen on hankalaa, sillä kalliokiviaineksen louhinta oli tapahtunut ennen hankkeen alkamista toisen urakoitsijan toimesta.

## 10 Laskenta

Opinnäytetyön tuloksena syntyvä laskenta-alusta sekä itse hiilijalanjälkilaskenta toteutettiin GHG-protokollan mukaisella päästöjen jakautumis- periaatteella. Laskenta-alusta on jaettu kuuteen eri osioon: Laskennan yleistiedot, materiaaliluettelo, materiaalien päästökertoimet, työkoneiden päästöt, työkoneiden päästökertoimet, sekä yhteenveto. Laskenta-alusta pyrittiin toteuttamaan mahdollisimman yksinkertaiseksi ja autonomisoiduksi, jolloin käyttäjän tulisi huolehtia vain määrien syöttämisestä.

Laskennan yleistiedot osiossa on ohjeet laskenta-alustan käyttöön sekä halutessaan osioon voidaan kirjata hankkeen yleistiedot tietyllä rajauksella. Materiaalien päästökertoimet osiossa on listattu eri materiaalityyppien päästökertoimet eri työvaiheiden mukaisesti. Materiaalityypit on jaoteltu seuraavasti, betonointi, muotit, raudoitus, varusteet, kiviaines, viemärointi, louhinta, ankkurointi, paalutus ja ruoppaus. Tarkemmat materiaalit on listattu näiden työvaiheiden alle. Materiaalien jaottelun myötä mahdollistetaan laskenta-alustan mahdollisimman helppo käyttö.

Materiaaliluettelo-osio on jaettu kahteen päälitteraan, laiturirakentamiseen ja vesirakentamiseen. Laiturirakennus osiossa litteroidaan hankkeen litteralistan mukaiset työvaiheet, jonka jälkeen valitaan työvaihe ja tämän jälkeen materiaalin tyyppi sekä itse materiaali, kun työvaihe on valittu, laskenta-alusta antaa vaihtoehdoksi valita kyseiseen työvaiheeseen kuuluvan materiaalityypin. Materiaalityypin valittua laskuri antaa valita kyseiseen materiaalityypin kuuluvan materiaalin. Materiaalin valinnan jälkeen määritetään materiaalin menekki, jonka jälkeen laskuri hakee materiaalien päästökerroin sivulta valitun materiaalin mukaan päästökertoimen ja laskee automaattisesti materiaalin aiheuttaman hiilijalanjäljen.

Työkoneiden päästökerroin sivulla on listattu eri työkoneiden päästökertoimet. Työkoneiden päästökertoimet on annettu koneen käyttötuntia kohden. Työkoneet on jaoteltu neljään eri luokkaan, maanrakennuskoneet, muut työkoneet, kuljetuskalusto sekä vesikalusto. Työkoneiden päästöt osiossa lasketaan työkoneiden, vesi- ja kuljetuskaluston aiheuttamat

päästöt. Laskentaosio on jaettu kolmeen osioon, laiturirakentaminen, vesikalusto sekä kuljetukset.

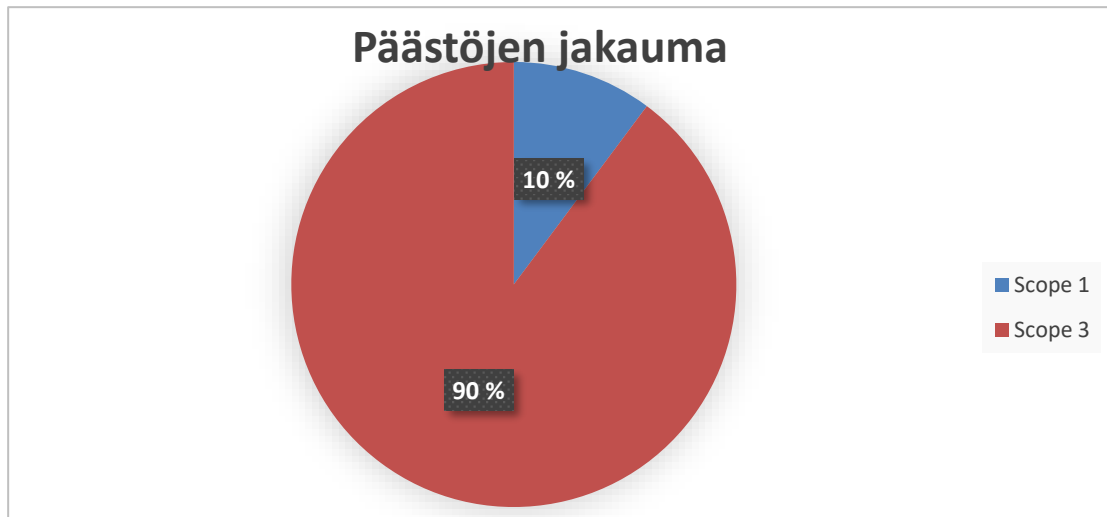
Laiturirakennusosioon litteroidaan eri työvaiheet, valitaan työkone tyyppi sekä työkone. Tämän jälkeen kirjataan työkoneen käyttötunnit, jonka jälkeen laskuri hakee automaattisesti valitun työkoneen päästökertoimen ja laskee käyttötuntien perusteella aiheutuneen hiilidioksidipäästöjen määrän. Vesikaluston hiilidioksidipäästöjä laskettaessa käytetään aluskohtaisten polttoaineraporttien mukaista kulutettua polttoaineen määrää, jolloin kulutettu polttoainemäärä merkitään litroissa ja laskuri laskee polttoaineen päästökertoimen ja kulutetun polttoaineen määrän perusteella aiheutuneen hiilidioksidipäästöjen määrän. Vesikalustoon kuuluvat ruoppaajat, proomut, hinaajat sekä uiva nostokalusto. Vesikaluston aiheuttamiin päästöihin sisällytetään vesikaluston mobilisaatiot.

Kuljetuskaluston aiheuttamiin päästöihin sisältyy materiaalien kuljetukset työmaalle, näihin sisältyvät esimerkiksi betonikuljetukset, harjateräskuormat sekä maakoneiden mobilisaatiot. Kuljetuksien aiheuttamia päästöjä laskettaessa on huomioitava kuljetuskaluston kuormitusaste, kuorman paino sekä kuljetusmatka. Kuljetuskaluston päästökertoimet ovat yksikössä kg Co<sub>2</sub>/tkm, jolloin kuljetuksien päästöjä laskettaessa huomioidaan kilometrien sekä kuorman paino tonneissa, näin yksiköksi saadaan tonnikilometri (tkm).

## 11 Laskennan tulokset

Esimerkkihankkeen hiilijalanjälkilaskelman tulokset on laskettu hiilidioksidiekvivalenttitonneina (Tn CO<sub>2</sub>e). Laskennan tulokset on jaoteltu GHG-protokollan mukaisesti Scope 1- ja Scope 3 -päästöluokituksiin. Scope 1 -luokka sisälsi työmaan suorat päästöt, eli louhinnan sekä kaluston aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Scope 3 -luokka sisälsi materiaalien valmistuksesta sekä kuljetuksesta aiheutuneet päästöt. Esimerkkihankkeen hiilijalanjälkilaskennan tuloksien perusteella voidaan todeta, että merkittävä osa hankkeen hiilidioksidipäästöistä kuuluvat Scope 3 -luokan ylävirran päästöihin. Hankkeen kokonaispäästöistä ne edustavat 90 % osuutta. Loput 10 % hiilidioksidipäästöistä kuuluivat Scope 1 -luokkaan. Kuvassa 16 kuvaaja päästöjen jakaumasta, kuva laskenta-alustan yhteenveto osiosta.

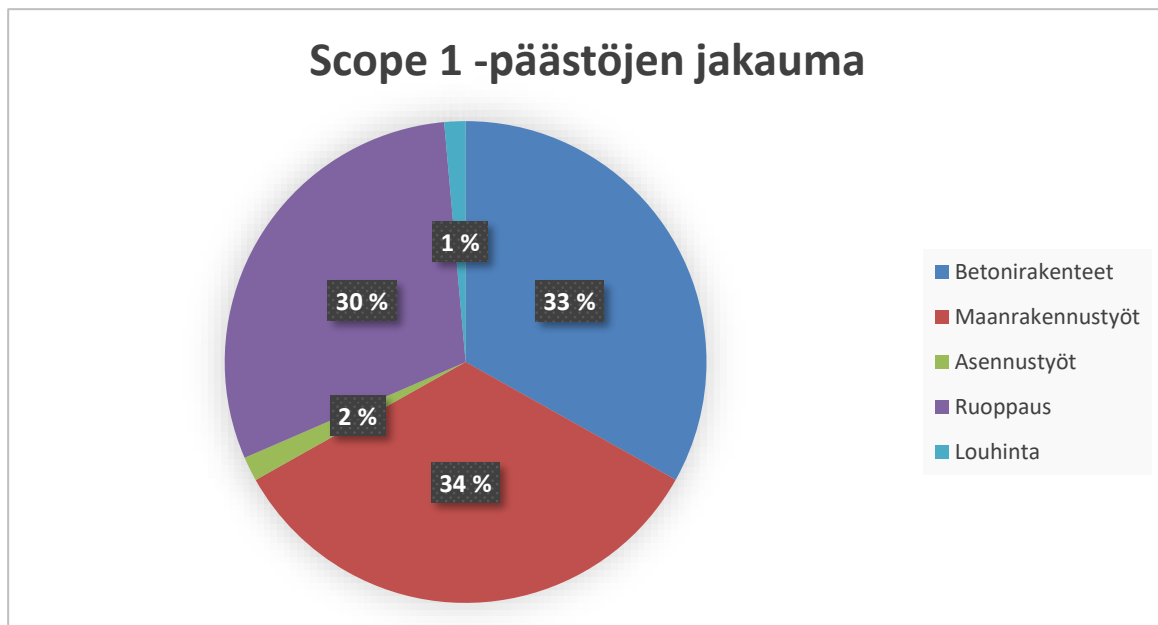
Kuva 16. Kuvaaja hankkeen päästöjen jakaumasta.



### 11.1 Scope 1

Scope 1 -luokan päästöihin kuuluivat työmaalla käytettyjen työkoneiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Näihin koneisiin sisältyy maanrakennuskoneet, vesikalusto, betonipumppauskalusto sekä muu polttomoottorikäyttöinen pienkalusto. Scope 1 -luokan päästöt edustavat koko hankkeen päästörakenteesta 10 %. Kuvasta 17 voidaan todeta Scope 1 -luokan päästöjen jakauma seuraavasti: maanrakennustyöt 34 %, betonirakenteet 33 %, ruoppaus 30 %, asennustyöt 2 % ja louhinta 1 %. Kuva laskenta-alustan yhteenveto osiosta.

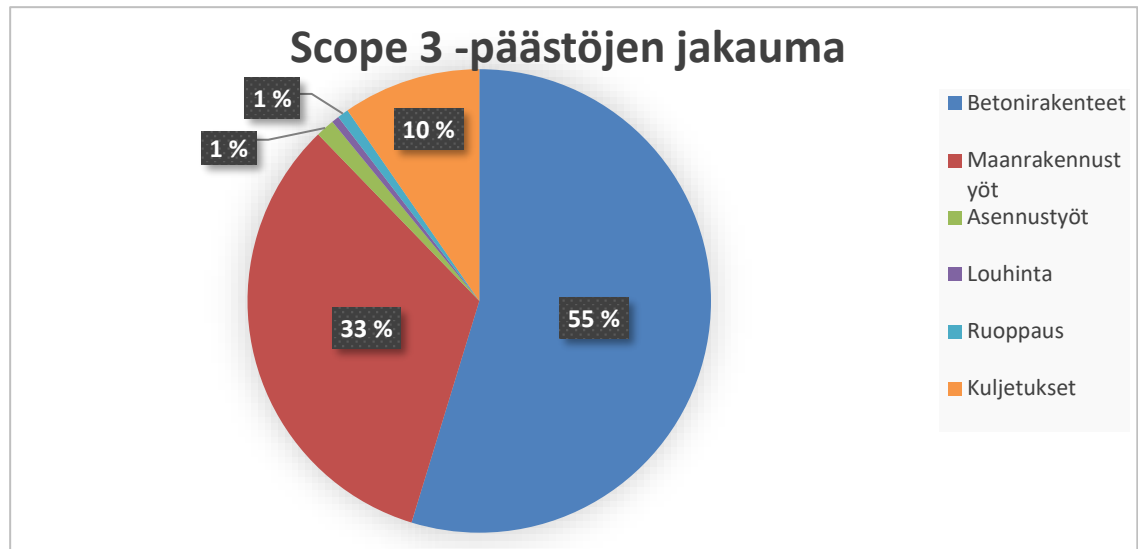
Kuva 17. Scope 1 -päästöjen jakauma.



## 11.2 Scope 3

Hankkeen hiilidioksidipäästöjen merkittävin osuus muodostui Scope 3 -luokan päästöistä. Nämä päästöt jakaantuivat betonirakentamisen, maanrakennustöiden, asennustöiden, louhinnan, ruoppauksen ja kuljetuksien kesken. Kuvassa 18 Scope 3 -luokan päästöt eriteltynä. Kuvasta voidaan todeta päästöjen jakauma seuraavanlaisesti: betonirakenteet 55 %, maanrakennustyöt 33 %, kuljetukset 10 %, ruoppaus 1 % ja asennustyöt 1 %. Kuva laskenta-alustan yhteenveto osiosta.

Kuva 18. Scope 3 -päästöjen jakauma.



Betonirakenteiden aiheuttamista päästöistä merkittävin osuus (76 %) muodostui valmisbetonien valmistuksesta. Maanrakennustöiden päästöistä suurin osuus (92 %) muodostui kiviaineksen tuottamisesta. Työmaan kuljetuksista merkittävin osuus koostui valmisbetonien, kiviainesten ja harjaterästen kuljetuksista työmaalle. Betonikuljetusten keskimääräisenä kuormakokona käytettiin 8 kuutiometrin kuormaa ja kuljetuskaluston kuormitusasteena 50 %. Harjaterästen kuljetuksissa keskimääräinen kuormakoko oli 25 tonnia sekä kuljetuskaluston kuormitusasteena 50 %. Kiviainesten kuljetuksissa keskimääräinen kuormakoko oli 40 tonnia ja kuormitusaste 50 %

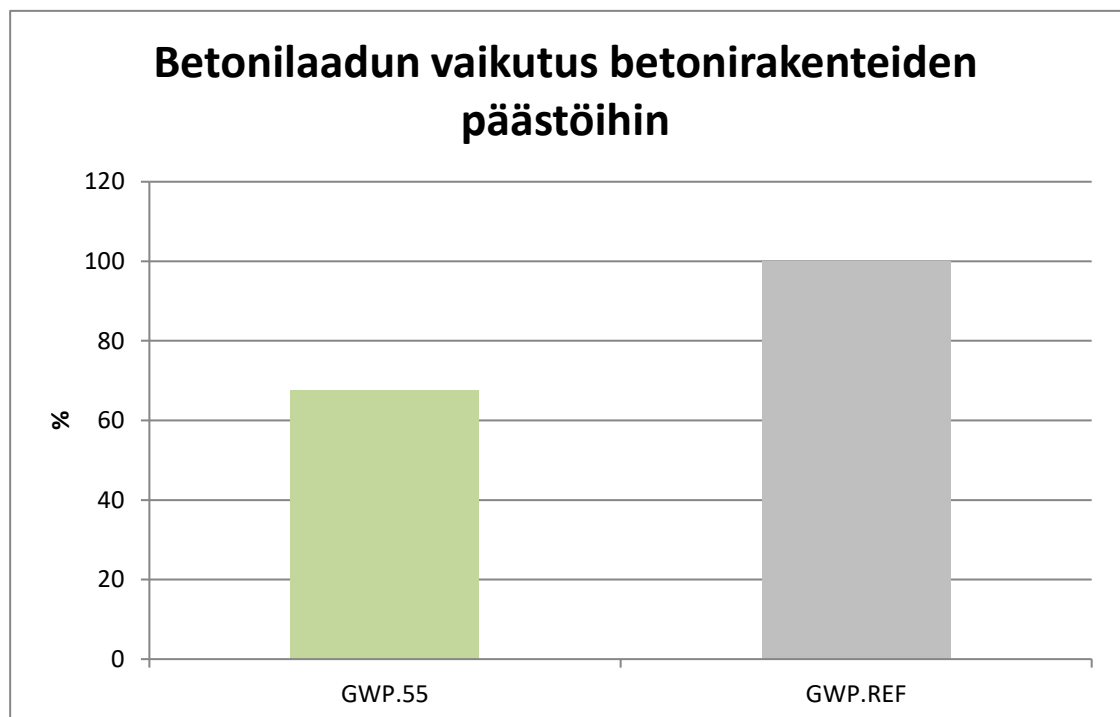
### 11.3 Vertailu

Hankkeen päästöistä suuri osa aiheutui valmisbetonien hiilijalanjäljestä, jolloin on selvää, että pyrkiessä päästöjen vähentämiseen on pohdittava, voidaanko tällaisessa hankkeessa käyttää vähäpäästöisempiä betonilaatuja. Kuten luvussa 5.2.2, Vähäpäästöisemmän betonin käyttö, todettiin, että kuonabetonien käyttö pakkasuolarasituksen alaisille rakenteille ei ole hyvä ratkaisu, sillä rakenteen käyttöikä vähenisi merkittävästi.

Rakenteissa, jotka eivät altistu suolapakkasrasitukselle voitaisiin mahdollisesti käyttää kuonabetonia, kuten jäätymistason alapuolisissa rakenteissa. Kuvassa 19 on vertailtu

hankkeen betonirakenteiden aiheuttamaa hiilijalanjälkeä sekä vaihtoehtoa, jossa jäätymistason alapuolisissa betonirakenteissa käytettäisiin vähäpäästöisempää betonilaatua. Vertailussa käytetyn betonilaadun vähähiilisyysluokitus olisi GWP.55 eli kyseisen betonilaadun ominaispäästö olisi 55 % referenssitasosta. Kuvasta voidaan todeta, että mikäli jäätymistason alapuolisissa rakenteissa käytettäisiin GWP.55 päästöarvon omaavaa betonilaatua, vähenisi betonirakenteiden aiheuttama hiilijalanjälki 33 %.

Kuva 19. Betonilaadun vaikutus betonirakenteiden päästöihin.



## 12 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia vesirakennushankkeen aiheuttaman hiilidioksidipäästöjen määrä sekä selvittää kuinka päästöt jakautuvat hankkeen eri osaluokkien kesken sekä luoda tilaajayritykselle laskenta-alusta hiilidioksidipäästöjen laskentaa varten. Opinnäytetyö jaoteltiin teoria- sekä laskentaosioon. Teoriaosuudessa käsiteltiin yleisellä tasolla kasvihuonekaasujen syntymekanismeja, rakentamisen ympäristövaikutuksia sekä vähähiilisen rakentamisen ohjaavaa lainsäädäntöä.

Laskentaosiossa selvitettiin esimerkkihankkeen päästöjen määrä sekä niiden jakaumaa GHG-protokollan mukaisesti.

Esimerkkihankkeesta tehdyn hiilijalanjälkilaskelman perusteella voidaan todeta, että laiturihankkeen suurimmat päästöt kuuluvat Scope 3 -luokkaan, johon kuuluvat materiaalien valmistuksesta sekä kuljetuksista aiheutuneet päästöt. Materiaalien valmistuksesta aiheutuneita hiilidioksidipäästöjä on urakoitsijan vaikea vähentää, jolloin vastuu määritetyistä rakenteista sekä materiaaleista on hankkeen tilaajalla.

Kulmatukimuurilaituri hankkeessa, jonka betonirakenteet ovat tyypillisesti massiivisia, suurimpana potentiaalisena päästöjen vähentämiskeinona, olisi selvittää vihreämpien valmisbetonien käytön mahdollisuuksista.

Vesirakennushankkeen betonirakenteissa käytettyjen betonilaatujen vaihtaminen vähempipäästöisempiin betonilaatuihin, joissa käytettäisiin esimerkiksi masuunikuonaa ei ole aivan yksinkertaista. Masuunikuonan huonontaessa betonin suolapakkaskestävyyttä vähenisi betonirakenteiden käyttöikä varsinkin jäätymistasosta ylöspäin, jolloin rakenteiden pakkassuolarasitus on suurimmillaan. Pohtisin kuitenkin, voitaisiinko masuunikuonaa käyttää jäätymistason alapuolissa rakenteissa, joissa ei käytetä säänkestäviä betonilaatuja. Vertailuissa betonilaadun vaihtaminen vähäpäästöisempään betonilaatuun vähentäisi betonirakenteiden päästöjä merkittävästi.

Kuonabetonin käyttö laiturielementeissä aiheuttaisi käytännön kannalta mahdollisia haasteita, sillä betonin lujuudenkehitys on hitaampaa kuin betonilla, joka ei sisällä masuunikuonaa. Tämä on merkittävä ongelma elementtien liukuvaluissa, jossa nopea kovettuminen ja lujuudenkehitys on avainasemassa. Hidasta lujuudenkehitystä voitaisiin kuitenkin pyrkiä parantamaan erilaisilla kiihdyttimillä.

Yrityksen aiheuttamien Scope 1 -luokan päästöjen vähentäminen on myös avainasemassa hankkeen pienemmän hiilijalanjäljen kannalta. Scope 1 -luokan päästöt käsittävät hankkeen työkoneiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Työkoneiden aiheuttamien päästöjen vähentämisen keinoina voisi olla vanhentuneen kaluston uusiminen, biopolttoaineiden ja vaihtoehtoisten energianlähteiden käyttäminen sekä kaluston optimaalinen ja tehokas käyttö. Tällaiset toimet kuitenkin vaativat urakoitsijalta mittavia investointeja, mikäli kalustoa joudutaan uusimaan radikaalisti. Tilaajat, jotka ovat sitoutuneet Green-Deal -sopimukseen, asettavat hankkeiden kalustolle merkittäviä vaatimuksia niiden vähäpäästöisyyteen liittyen. Tällöin hankkeiden tilaajien on

valmistuttava korkeampaan hintatasoon verrattuna tavanomaisempaan hankkeeseen, jossa kaluston päästöille ei ole asetettu vaatimuksia.

## 13 Pohdinta

Opinnäytetyön teoriaosuuteen löytyi kattavasti materiaalia aiheen ajankohtaisuuden vuoksi. Materiaalin paljouden vuoksi teoriaosuuden rajaaminen sekä tiiviinä pitäminen oli suhteellisen vaikeaa, jolloin materiaalien käyttöä täytyi priorisoida. Teoriaosuus pyrittiin kohdistamaan rakennussektorin kannalta tärkeisiin aihealueisiin. Vaikkakin materiaalia aihealueesta löytyi paljon, saattoivat useat eri lähteet olla ristiriidassa keskenään, jolloin oikean tiedon etsiminen saattoi olla välillä haastavaa.

Opinnäytetyön tuloksena syntynyt laskenta-alusta toteutettiin vastaamaan tilaajayrityksen tarpeita, jolloin laskenta-alustaa voidaan hyödyntää tehokkaasti hankkeiden tarjousvaiheessa riippumatta hanketyypistä. Laskenta-alustaa voidaan hyödyntää laiturisekä ruoppaushankkeissa. Laskennan alkuhaasteena oli kehittää laskurille toimiva ulkomuoto sekä tehdä laskurista mahdollisimman yksinkertainen ja tehokas käyttää. Laskenta-alustalla käytettävän litteroinnin toteuttaminen osoittautui hankalaksi, sillä hankkeiden litteralistat vaihtelevat eri hankkeiden mukaan, jolloin yhtenevä litterointi ei onnistu, mikäli eri hankkeita pyrittäisiin vertailemaan.

Laskentaa varten tarvittavien materiaalien sekä työkoneiden päästöarvot haettiin Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä infrarakentamisen CO2data -palvelusta. Tietokannasta oli haettavissa useiden rakennusmateriaalien sekä työkoneiden päästöarvoja. Tietokannan tietoja voidaan pitää luotettava, sillä jokaisen materiaalin tai työkoneen päästöarvosta oli haettavissa taustaraportit. Taustaraporteissa oli eritelty, kuinka päästöarvot on määritetty. Kaikkien materiaalien päästöarvoja tietokannasta ei löytynyt vaan joidenkin materiaalien päästöarvot täytyi etsiä valmistajan tuotetiedoista tai selvittää suoraan valmistajalta.

Työkoneiden päästökertoimet löytyvät tietokannasta suhteellisen kattavasti, poissulkien vesikalusto. Vesikaluston aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen määrät täytyi selvittää aluskohtaisten polttoaineraporttien perusteella. Työkoneiden aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen määrän arvioiminen ilman todellisia käyttötunteja oli suhteellisen vaikeaa, jonka myötä käytettiin laskennasta saatuja arvioituja käyttötuntimääriä.

Työn tuloksena syntynyt laskenta-alusta otetaan tilaajayrityksen käyttöön ja se on täysin muokattavissa sekä alustalle on mahdollista lisätä eri työkoneiden ja materiaalien päästöarvoja. Laskenta-alustaa tullaan käyttämään tulevien hankkeiden laskentavaiheessa, mikäli hankkeen tilaajalla on vaatimuksia hankkeen hiilijalanjälkilaskentaan liittyen. Laskuria voidaan käyttää käynnissä olevan hankkeen päästöjen arviointiin, jolloin voitaisiin tarkasti määrittää työkoneiden käyttötunnit sekä materiaalien menekit toteutuneiden määrien mukaisesti.

Valitun GHG-laskentamenetelmän hyvänä puolena on päästöjen selkeä jakaminen sekä yhdenmukaisuus konsernin sisäisissä vertailuissa. Kyseinen menetelmä ei välttämättä ole vertailukelpoinen esimerkiksi Väyläviraston laatimassa vähähiilisen infrarakentamisen arviointimenetelmään, jota käytetään Väyläviraston omissa hankkeissa. Vesirakennushankkeiden hiilijalanjälkeä arvioitaessa on hyvä varmistua valitun laskentatavan sopivuudesta tilaajan vaatimuksiin. Työn tuloksena syntynyt laskenta-alusta antaa kuitenkin Terramare Oy:lle hyvät valmiudet tulevien hankkeiden päästöjen arvioinnissa.

## 14 Lähteet

- Ahlberg, T. (2020). *Kiertotalous keventää sementin hiilidioksidipäästöjä*. [https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/03/BET2001\\_74-81.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/03/BET2001_74-81.pdf)
- betoni. (n.d.-a). *Sementti ja sen valmistus*. <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>
- betoni. (n.d.-b). *Sementti ja kasvihuonepäästöt*. <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>
- Betonitieto. (2018). *Kiviaines*. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/kiviaines.html>
- Boskalis. (2023a). *Boskalis-sustainability-report-2023*. <https://boskalis.com/media/qycbd03h/boskalis-sustainability-report-2023.pdf>
- Boskalis. (2023b). *Sustainability*. <https://boskalis.com/sustainability/environmental-and-social/emissions>
- Boskalis Terramare. (n.d.). *Mussalon sataman määrätietoinen kehittäminen jatkuu*. <https://terramare.boskalis.com/fi/projektit/mussalon-sataman-maaratiетoinen-kehittaminen-jatkuu/>
- CO2data. (2023). [file:///C:/Users/eeta/Downloads/CO2data infra menetelmakuvaus 12 2023.pdf](file:///C:/Users/eeta/Downloads/CO2data%20infra%20menetelmakuvaus%2012%202023.pdf)
- EcoOnline. (2023). *CSRD - EU:n uusi direktiivi kestävyysraportointiin*. <https://www.econline.com/fi/blogi/csr-direktiivi-ja-kestavyysraportointi>
- EcoOnline. (2024). *GHG-protokolla pähkinänkuoressa*. <https://www.econline.com/fi/blogi/ghg-protokolla>
- Euroopan parlamentti. (2023). *Ilmastonmuutos: ilmaston lämpenemistä aiheuttavat kasvihuonekaasut*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20230316STO77629/ilmastonmuutos-ilmaston-lampenemista-aiheuttavat-kasvihuonekaasut>
- Finnsementti. (2020). *Sementin Valinta*. <https://finnsementti.fi/sementti/tietoa-betonista/tietoa-betonista-tietoa-betonista-suunnittelijalle/sementin-valinta/>
- Finnsementti. (2022a). *Sementin valmistus*. <https://finnsementti.fi/sementti/valmistus/>
- Finnsementti. (2022b). *Kolmossementti*. [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/FS\\_Kolmos\\_FI\\_2022.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/FS_Kolmos_FI_2022.pdf)
- Finnsementti. (2024a). *Ympäristö*. <https://finnsementti.fi/ymparisto/>
- Gaib, A. (2022). *Openco2net*. [https://www.openco2.net/fi/artikkelit/mita-tarkoittaa-scope-3?qad\\_source=1&qclid=CjwKCAjwzMi\\_BhACEiwAX4YZUNfzIkHRdpWxx16dtDdqE41mkBMrGUy\\_sJIUQGvK3MMC\\_o4u1r0KUxRoCegsQAvD\\_BwE](https://www.openco2.net/fi/artikkelit/mita-tarkoittaa-scope-3?qad_source=1&qclid=CjwKCAjwzMi_BhACEiwAX4YZUNfzIkHRdpWxx16dtDdqE41mkBMrGUy_sJIUQGvK3MMC_o4u1r0KUxRoCegsQAvD_BwE)
- Geologian tutkimuskeskus GTK. (2019). *Kalliokiviaines*. <https://www.geologia.fi/2019/12/18/kalliokiviaines/>
- Corporate Standard. (2015). *A Corporate Accounting and Reporting Standard*. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

- Heatmap. (2023). *There Will Soon Be More Concrete Than Biomass on Earth*.  
<https://heatmap.news/economy/the-planet-s-jaw-dropping-astonishing-downright-shocking-amount-of-concrete>
- Helsingin kaupunki. (2024). *Kaivumaiden, kiviaineksen ja purkumateriaalien hyödyntämisen periaatteet maanrakentamisessa*. Helsingin kaupunki/Kaupunkiympäristön toimiala.  
<https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/aineistot/aineistoja-12-24.pdf>
- Hiilineutraalisuomi. (2024). *Kansallinen päästötietkanta CO2data*. <https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Tyokalut/CO2datapalvelu>
- Ilmasto-Opas. (2013). *Mitä ilmastonmuutos on*. <https://www.ilmasto-opas.fi/mita-ilmastonmuutos-on>
- Ilmasto-opas. (2019). *Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku*. <https://ilmasto-opas.fi/artikkelit/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku>
- Ilmasto-opas. (2020). *Vesihöyry on merkittävin kasvihuonekaasu*. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/vesihoyry>
- Ilmasto-opas. (2022). *Kasvihuonekaasut lämmittävät*. <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/kasvihuonekaasut-lammittavat>
- Kokkonen, J.-M. (2024). *Vähähiilinen kiviainestuotanto*.  
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/159007/KokkonenJuha-Matti.pdf?sequence=2>
- Laine, A.;Pohjalainen, S.;Mäntylä, I.;Eloranta, A.;Lehtomäki, J.;& Raivio, T. (2024). *Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 - tiekartan päivitys*. Rakennusteollisuus. [https://rt.fi/wp-content/uploads/2024/06/Loppuraportti-RT-vahahiilisyyys-7.6.2024\\_FINAL.pdf](https://rt.fi/wp-content/uploads/2024/06/Loppuraportti-RT-vahahiilisyyys-7.6.2024_FINAL.pdf)
- Mattila, J. (2015). *Betoni ja ympäristö*. *Rakentajan-kalenteri*, 119. [https://kivifaktaa.fi/wp-content/uploads/2017/02/Betoni-ja-ymparisto\\_2015.pdf](https://kivifaktaa.fi/wp-content/uploads/2017/02/Betoni-ja-ymparisto_2015.pdf)
- Motiva. (2024). *Päästökauppa*. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/paastokauppa>
- Nature . (2024). *Global trend of methane abatement inventions and widening mismatch with methane emissions*. <https://www.nature.com/articles/s41558-024-01947-x>
- Pinomäki, T.;& Vuento, A. (2023). *Räjäytys- ja louhintatyön turvallisuusohje*. Työturvallisuuskeskus.  
<https://ttk.fi/wp-content/uploads/2023/03/Ra%CC%88ja%CC%88ytys-ja-louhintatyo%CC%88n-turvallisuusohje.pdf>
- Punkki, J. (2021). *Betonin sideaineet tulevaisuudessa*. *betoni*. [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104\\_74-83.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104_74-83.pdf)
- Rakennusteollisuus. (2023). *Hiilijalanjäljen arviointi*. <https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/vahahiilinen-rakentaminen/hiilijalanjaljen-arviointi/>
- Rakennusteollisuus. (2024). *Vähähiilisyden tiekartta*. <https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/vahahiilinen-rakentaminen/vahahiilisyden-tiekartta/>
- Rakennustieto. (2024). *Rakennustieto seuraa rakentamislain uudistusta*.  
<https://www.rakennustieto.fi/rakentamislaki>

- Rudus. (2024). *Vihreä Betoni ja betonin hiilijalanjälki*. <https://www.rudus.fi/vastuullisuus/hiilijalanjalki>
- Scope 2 Guidance. (2011). *GHG Protocol Scope 2 Guidance*.  
<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%20%20Guidance.pdf>
- Scope 3 Standard. (2011). *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*.  
[https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard-EReader\\_041613\\_0.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard-EReader_041613_0.pdf)
- Suomen Betoniyhdistys ry. (n.d.). *BY-Vähähiilisyysluokitus*. <https://vahahiilinenbetoni.fi/#table1>
- Tiehallinto. (2007). *Taitorakenteet*. Betonirakenteet:  
[https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/silko/kansio1/s1201\\_2007.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Taitorakenteet/silko/kansio1/s1201_2007.pdf)
- Jensen, A. (2023). *Metaani - hiilidioksidia vaarallisempi kasvihuonekaasu*.  
<https://tieku.fi/ilmasto/ilmastonmuutos/metaani-mita-metaani-on>
- Tulimaa, M. (2024). *Rudus Betoniakatemia*. (M. Tulimaa, Esiintyjä) Helsinki.  
<https://aineistopankki.rudus.fi/f/wTtH>
- Tykkä, E. (2023). *Hiilidioksidi- hiljainen tuhoaja vai välttämätön elinehto?* (Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu) <https://www.xamk.fi/hiilidioksidi-hiljainen-tuhoaja-vai-valttamaton-elinehto/>
- Työturvallisuuskeskus. (n.d.). *Puutavaran kuljetus jäällä*.  
[https://ttk.fi/tyoturvallisuus\\_ja\\_tyosuojelu/toimialakohtaista\\_tietoa/maatalousalat\\_ja\\_metsaala/turvallinen\\_tyoskentely\\_metsatoissa/puutavaran\\_kuljetus\\_jaalla.6730.news](https://ttk.fi/tyoturvallisuus_ja_tyosuojelu/toimialakohtaista_tietoa/maatalousalat_ja_metsaala/turvallinen_tyoskentely_metsatoissa/puutavaran_kuljetus_jaalla.6730.news)
- Uudenmaan Kone- ja Kylmätekniikka. (n.d.). *Kylmaaine-vaihto*.  
<https://uudenmaankylmatekniikka.fi/kylmaaine-vaihto/>
- Valtioneuvosto. (2023). *IMO:ssa kiristettiin tavoitteita kansainvälisen meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi*. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410829/imo-ssa-kiristettiin-tavoitteita-kansainvalisen-meriliikenteen-kasvihuonekaasupaastojen-vahentamiseksi>
- Viitanen, J. (2023). *Infra-ala ei ole jähmeä jättiläinen*. Green Building Council Finland:  
<https://figbc.fi/infra-ala-ei-ole-jahmea-jattilainen>
- Väylävirasto. (2020). *Infrabetonien valmistus*. [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2020-41\\_infrabetonien\\_valmistus\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf)
- Väylävirasto. (2023). *Infrarakentamisen vähähiilisyden arviointimenetelmä*. Väylävirasto.  
[https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2023-43\\_vahahiilisyden\\_arviointimenetelma\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2023-43_vahahiilisyden_arviointimenetelma_web.pdf)
- Ympäristö. (2024). *F-kaasut ja niiden päästöt*. <https://www.ymparisto.fi/fi/ilmasto-muutoksessa/kasvihuonekaasupaastojen-raportointi/f-kaasut-ja-niiden-paastot#f-kaasujen-rakenne-ja-ominaisuudet>
- Ympäristöministeriö. (2014). *Vaiheittain eroon fluorikaasujen käytöstä*.  
[https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Faktaa\\_Fkaasut\\_Final-C6115320\\_C96E\\_49F4\\_9B24\\_74942B228FAC-99746.pdf/92837fc3-8d98-a93c-f2e8-](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Faktaa_Fkaasut_Final-C6115320_C96E_49F4_9B24_74942B228FAC-99746.pdf/92837fc3-8d98-a93c-f2e8-)

[28d9245cb9e7/Faktaa\\_Fkaasut\\_Final-C6115320\\_C96E\\_49F4\\_9B24\\_74942B228FAC-99746.pdf?t=1603261309452](https://28d9245cb9e7/Faktaa_Fkaasut_Final-C6115320_C96E_49F4_9B24_74942B228FAC-99746.pdf?t=1603261309452)

Ympäristöministeriö. (2019). *Vähähiilinen rakentaminen*. <https://ym.fi/vahahiilinen-rakentaminen>

Ympäristöministeriö. (2023). *Suomen kansallinen ilmastopolitiikka*. <https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka>

Ympäristöministeriö. (2024a). *Sitoumus2050*. <https://sitoumus2050.fi/tietoa-green-dealista#/>

Ympäristöministeriö. (2024b). *Sitoumus2050*. [paastotontyomaa: https://sitoumus2050.fi/paastotontyomaa#/](https://sitoumus2050.fi/paastotontyomaa#/)