



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Betonirakentamisen hiilijalanjälki talonrakennuksessa

Samuli Leppälä

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Kandidaatintyö

Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Betonirakentamisen hiilijalanjälki talonrakennuksessa

Samuli Leppälä

Oulun yliopisto, rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022, 23 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Ulla Haverinen-Shaughnessy

Ilmastoystävällisen ajattelun lisääntyessä on myös syytä kiinnittää huomiota rakentamisen kasvihuonekaasupäästöihin. Rakentaminen ja rakennukset tuottavat suuren osan Suomen hiilidioksidipäästöistä, josta rakennusmateriaaleista suuripäästöisin on betoni. Tutkimus käsittelee kirjallisuuskatsauksena betonirakentamisen hiilijalanjälkeä talonrakentamisessa. Tavoitteena on selvittää, mistä betonirakentamisen hiilijalanjälki koostuu, miten se vertautuu muihin materiaaleihin ja aloihin, miten sitä ohjataan tällä hetkellä sekä tulevaisuudessa ja millaiset ovat betonirakentamisen hiilijalanjäljen tulevaisuuden näkymät. Painopisteinä ovat myös suunnittelu- ja hankevaiheen merkitys rakennuksen hiilijalanjälkeen, elinkaariajattelun malli, hiilijalanjäljen laskenta sekä mahdolliset muutokset betonin hiilijalanjäljen pienentämiseksi.

Asiasanat: hiilijalanjälki, betoni, rakentaminen

ABSTRACT

Carbon footprint of concrete in house building

Samuli Leppälä

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Bachelor's thesis 2022, 23 pp.

Supervisor(s) at the university: Ulla Haverinen-Shaughnessy

As the environmental thinking spread, it is important to look at building's greenhouse gas emissions. Construction and buildings are responsible for a big portion of Finland's carbon emissions of which concrete has the largest impact. This thesis focuses on the carbon footprint of concrete in building construction. Goals are to find out where the carbon footprint of concrete building comes from, how does it compare to other materials, how is it regulated and how does the future look like. Other focus points are the importance of design and planning phase, life cycle thinking, measurement of the carbon footprint and possible ways to reduce the emissions.

Keywords: carbon footprint, concrete, building

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1 JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen aihe ja tutkimuskysymykset	1
2 HIILIJALANJÄLJEN KOOSTUMUS	2
2.1 Hiilijalanjälki	2
2.2 Hiilikädenjälki	3
2.3 Betonin hiilijalanjälki vertailussa	3
3 RAKENNUKSEN HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA	6
3.1 Elinkaari	6
3.2 Tuotevaihe	9
3.3 Rakentamisvaihe	10
3.4 Käyttövaihe	11
3.5 Purkuvaihe	11
3.6 Rakennuksen elinkaaren ulkopuoliset hyödyt ja haitat	12
4 HIILIJALANJÄLJEN OHJAUS	13
4.1 Suunnittelun merkitys	13
4.2 Lainsäädännöllinen ohjaus	14
4.3 Ympäristöluokitukset	15
5 BETONIN HIILIJALANJÄLKI TULEVAISUUDESSA	17
5.1 Tiekartan skenaariot	17
5.2 Seossementin laajamittaisempi käyttö	18
5.3 Vaihtoehtoiset sideaineet	19
5.4 Vähäpäästöisempi sementti	20
6 YHTEENVETO	22
LÄHTEET	25

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen aihe ja tutkimuskysymykset

Kandidaatintyön aiheena on betonirakentamisen hiilijalanjälki talonrakennuksessa. Aihe on ajankohtainen ja tulevaisuutta ajatellen erittäin tärkeä. Rakennusala tuottaa suuren osan koko Suomen kasvihuonekaasupäästöistä ja betoni on rakennusmateriaaleista suurimpien päästöjen tuottajien joukossa. (Mölsä 2021) Rakennusalaan ja erityisesti betonirakentamiseen tarvitaan siis parannusta ja siihen onkin kiinnitetty huomiota jo pidempään. Aiemmin rakennuksen käytön aikaisten päästöjen merkitys on ollut suurin, mutta parhaillaan ollaan siirtämässä huomiota myös muihin betonirakentamisen elinkaaren vaiheisiin. (Ympäristöministeriö 2019) Ilmastonmuutoksen edetessä aiheet ympäristöystävällisestä toiminnasta ovat yhä tärkeämpiä. Tutkimus käsittelee betonirakentamisesta johtuvan hiilijalanjäljen vaikutuksia ja siihen vaikuttamista. Sen on tarkoitus selvittää, mistä hiilijalanjälki koostuu, miten sitä pyritään rajoittamaan ja minkälaisia toimia sen pienentämiseksi tulisi tehdä. Myös tulevaisuuden näkymiä ja tavoitteita tarkastellaan. Aiheita tutkitaan koko uudisrakennuksen elinkaaren ajalta niin maanlaajuisesti kuin yksittäisen suunnittelijan näkökulmasta.

Aiheen tutkimiseksi on asetettu seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mistä betonirakentamisen hiilijalanjälki koostuu?
- Kuinka suuri ympäristöhaitta betonirakentaminen on?
- Miten betonirakentamisen hiilijalanjälkeä pyritään ohjaamaan?
- Millaisia tavoitteita ja ratkaisuja tulevaisuudessa on betonirakentamisen hiilijalanjäljen pienentämiseksi?

2 HIILIJALANJÄLJEN KOOSTUMUS

2.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen tai palvelun ilmastovaikutuksia. Rakennushankkeissa hiilijalanjälkeä mitataan yleensä rakennuksen koko elinkaaren ajalta. Hiilijalanjälkeä kuvataan hiilidioksidiekvivalenteilla. Hiilidioksidiekvivalentti on hiilijalanjäljen yksikkö, jossa kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus on muunnettu hiilidioksidia vastaavaksi vaikutukseksi ilmakehässä. (Green Building Council Finland 2020)

Kasvihuonekaasuilla tarkoitetaan yhdisteitä ilmakehässä, jotka absorboivat lämpöä ja palauttavat siitä osan takaisin maapallolle. Kasvihuonekaasuja ovat esimerkiksi hiilidioksidi, metaani ja CFC-yhdisteet. (Green Building Council Finland 2020)

Salmisen mukaan (2021) betonirakentamisessa hiilijalanjälki muodostuu pääosin sideaineen eli yleisesti sementin osuudesta. Valmisbetonilla sideaineen osuus on jopa 70 prosenttia. Raaka-aineiden ja tuotteiden kuljetusten määrä on myös merkittävä ympäristövaikutusten kannalta. Arvioiden perusteella valmistuksen aikaisten päästöjen merkitys ei ole kovinkaan suuri suomalaisen betonin valmistuksessa. Salminen ei ole huomioinut laskuissaan rakennuksen käytön aikaisia päästöjä.

Sideaineen suuri hiilijalanjälki on seurausta sementin valmistuksesta. Sementtiä valmistetaan kuumentamalla kalkkikivipitoista kiviainesta sementtiuunissa. Sen sisältämät mineraalit sulavat ja reagoivat keskenään. Samanaikaisesti ilmaan vapautuu kiviainekseen sitoutunut fossiilinen hiilidioksidi. (CO2ncrete Solution 2019)

2.2 Hiilikädenjälki

Hiilikädenjälki tarkoittaa tuotteesta tai palvelusta syntyvien ilmastohyötyjen summaa. Myös hiilikädenjälkeä mitataan hiilidioksidiekvivalenteissa. Ympäristöministeriön mukaan hiilikädenjälki tarkoittaa koko elinkaaren aikana syntyvää absoluuttista päästöhyötyä, jota ei olisi syntynyt ilman rakennushanketta. Muissa määritelmissä hiilikädenjälki voi tarkoittaa myös esimerkiksi positiivista ilmastohyötyä verrattuna tuotteen tai palvelun tavalliseen tasoon. (Green Building Council Finland 2020)

Iso määrä hiilikädenjälkeä syntyy betonin sideaineen sementin karbonatisoitumisesta, jossa ilmassa oleva pH-arvoltaan hapan hiilidioksidi pyrkii reagoimaan emäksisen sementtikiven kanssa. Betoni rakennusmateriaalina on hyvin emäksinen ja siihen muodostuvan kalsiumhydroksidin eli niin sanotun sammutetun kalkin ansiosta se pyrkii sitomaan hiilidioksidia ilmasta. Myös betonin kierrätys toimii merkittävänä hiilidioksidin sitojana. Kun rakennus puretaan ja betoni hajoaa palasiksi, kasvaa betonin karbonatisoitumiselle altis pinta-ala ja se sitoo itseensä entistä enemmän hiilidioksidia ilmasta. (CO2ncrete Solution 2019)

Karbonatisoituminen voi myös olla betonirakenteille haitallinen ilmiö, mikäli se pääsee betonissa sen sisältämiin betoniteräksiin asti. Karbonisoituminen altistaa teräkset ruostumiselle. Tämän takia terästen ja betonipinnan väliin onkin jätettävä suojabetonikerros, joka estää karbonatisoitumisen etenemisen teräksiin asti. Vaihtoehtoisesti betonissa voidaan käyttää ruostumatonta terästä. (CO2ncrete Solution 2019)

2.3 Betonin hiilijalanjälki vertailussa

Rakentaminen ja rakennukset tuottavat kolmanneksen Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali ja sen suuret käyttömäärät aiheuttavat sen suuret päästömäärät. Seuraavaksi suurimpana

päästöissä tulee teräs, ja viimeiseksi jää puu. Päästömäärällisesti betoni ja teräs ovat kuitenkin pienemmän päin ja uusia innovaatioita on nähtävissä jo lähitulevaisuudessa. Puun käytöstä aiheutuu huomattavasti vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä, kuin betonin tai teräksen, ja sillä pyritäänkin korvaamaan edellä mainitut materiaalit mahdollisuuksien mukaan. Puun tekniset ominaisuudet eivät kuitenkaan aina ole riittävän hyvät korvaamaan betonia tai terästä. (Mölsä 2021)

Koivisto (2021) on vertaillut kandidaatin työssään kahden Tampereelle valmistuvan kerrostalon hiilidioksidipäästöjä. Olennaista vertailussa oli eri materiaalien merkitys hiilijalanjäljelle. Toisen kerrostalon julkisivu oli puuta, kun toinen taas oli betonia. Vertailussa oli epätarkkuuksia, joten tulokset julkisivujen eri rakennetyyppien päästöistä ovat hyvin suuntaa antavia. Koivisto vertaili ulkoseinän (US), yläpohjan (YP), alapohjan (AP) ja välipohjan (VP) rakenteita. Ulkoseinät ovat rakennuksen seinä, jotka toimivat rakennusta suojaavina seininä ja yleensä myös kantavina rakenteina. Ne sijaitsevat rakennuksen ulkoreunoissa. Yläpohjan rakenteet ovat rakennuksen ylimmän kerroksen katon ja vesikaton muodostamia rakenteita. Alapohja on rakennuksen vaipan alin vaakaosa. Välipohja on useampikerroksisten rakennusten kerrosten välinen rakenne. Vertailun tulokset on esitetty Taulukossa 1.

Taulukko 1. Koiviston (2021) laskemat arvot eri rakennetyyppien ja eri materiaalien päästöille hiilidioksidiekvivalentteina. (Mukaiillen Koivisto 2021)

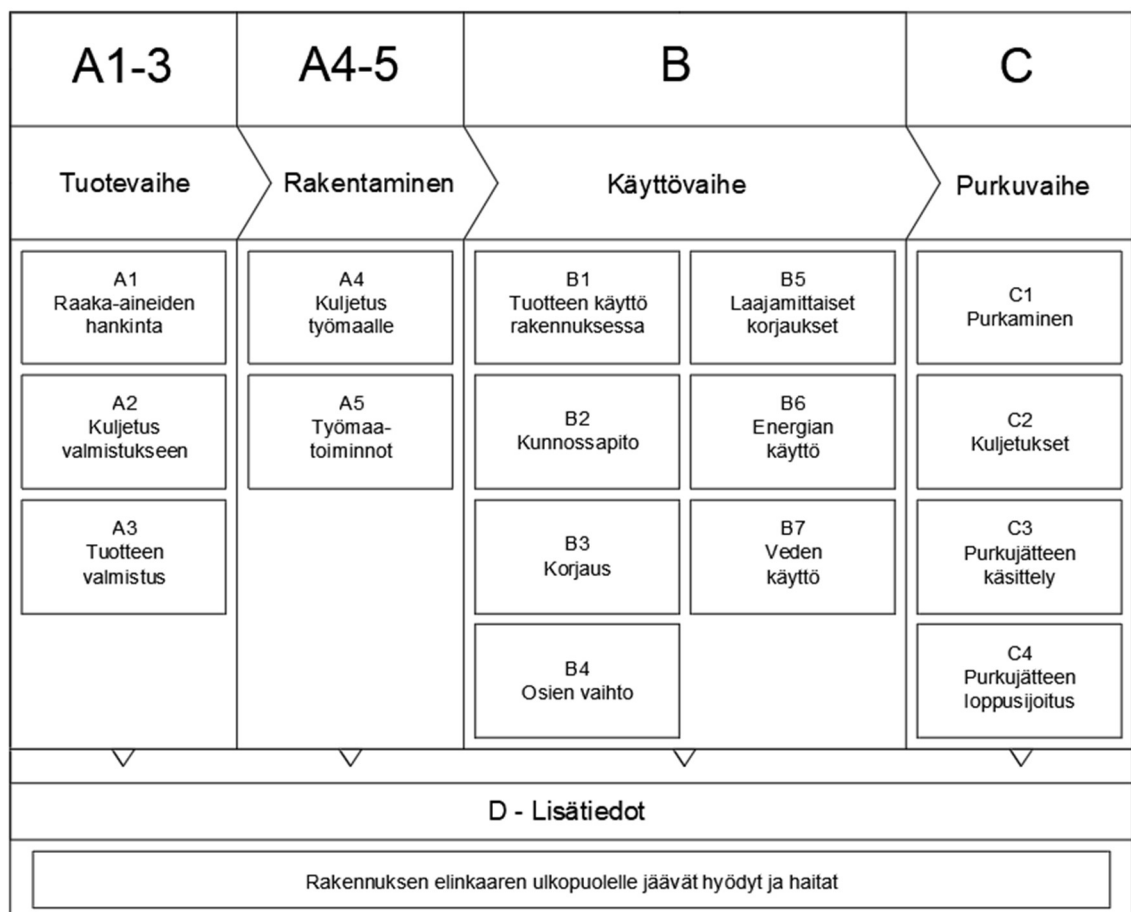
	Betoni	Puu
US	137,5	26,9
YP	188,5	89,4
VP	148,0	45,1
AP	115,6	51,1

Kuten taulukosta 1 huomataan betonirakenteiden päästöt ovat huomattavasti suuremmat kuin vastaavien puisten. Ulkoseinän tapauksessa betonin päästöt olivat jopa yli viisinkertaiset puuhun verrattuna. On kuitenkin huomioitavaa, että arvot ovat laskettu tietyillä rakenteilla, jotka suunnittelija on valinnut. Rakenteiden vaihtelu aiheuttaa eroja niiden päästöihin. On myös huomioitava, että betonin käytönaikaiset päästöt ovat pienemmät kuin puulla, joten päästöt tasaantuvat elinkaaren aikana. Betoni on lähes korvaamaton materiaali tietyissä rakenteissa kuten perustuksissa, mistä johtuen perustusten vertailu eri materiaaleilla ei ole mahdollista näin suuressa kohteessa. (Koivisto 2021)

3 RAKENNUKSEN HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA

3.1 Elinkaari

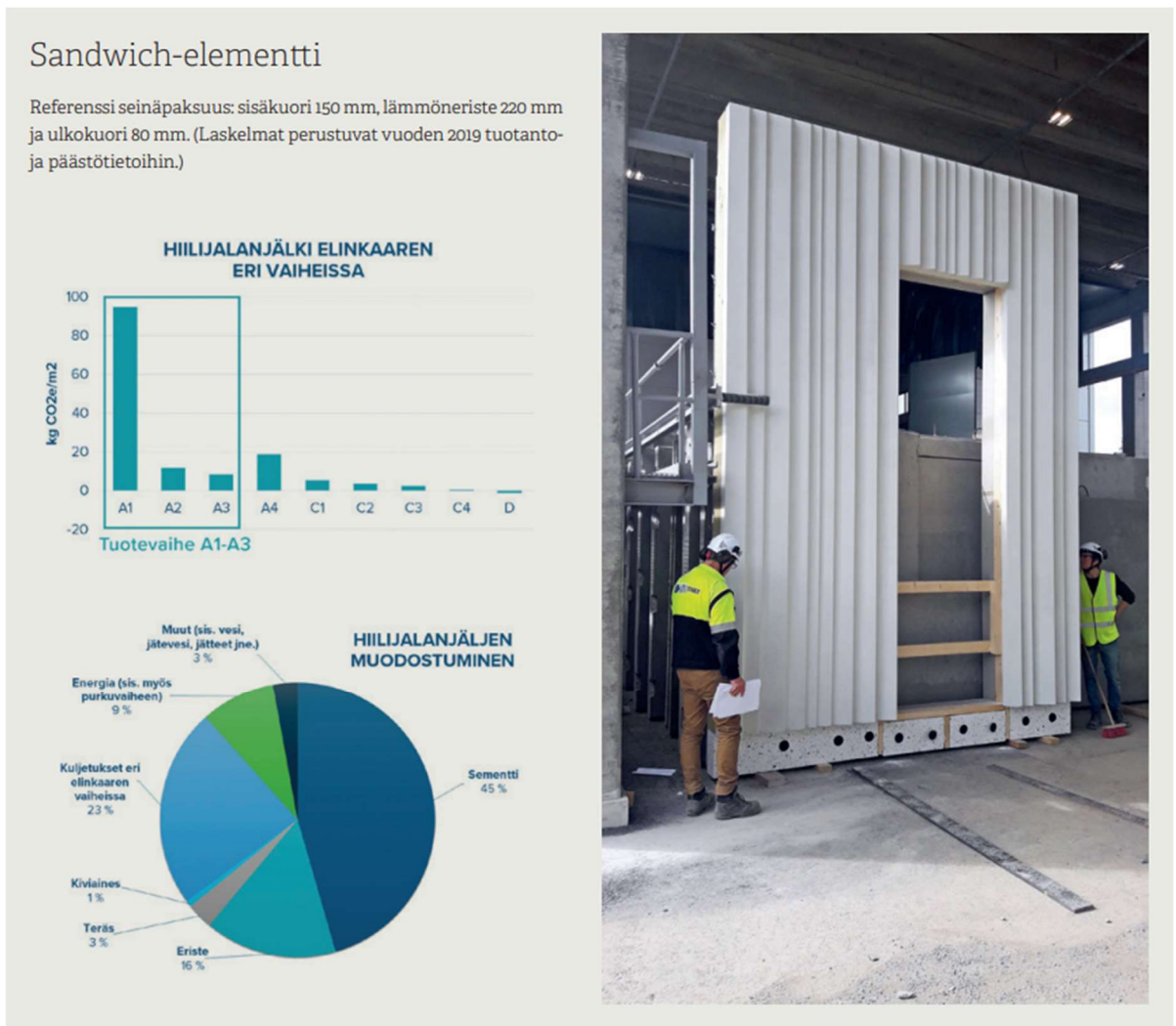
Aiemmin rakentamisen ympäristöohjaus on keskittynyt energiatehokkuuden parantamiseen ja päästöjen vähentämiseen rakennuksen käytössä. Vuonna 2018 julkaistujen tiukentuneiden energiamääräysten myötä on kuitenkin rakentamisessa siirrytty etsimään ratkaisuita myös muilla keinoin. Rakennuksen koko elinkaari on osoittautunut uudeksi suunnaksi. Erityisesti tarkasteluun on otettu rakennuksen elinkaaren alku- ja loppupää eli rakennusmateriaalien valmistus, rakentaminen, rakennusjätteen synnyn ehkäisy ja kierrätys. (Ympäristöministeriö 2019)



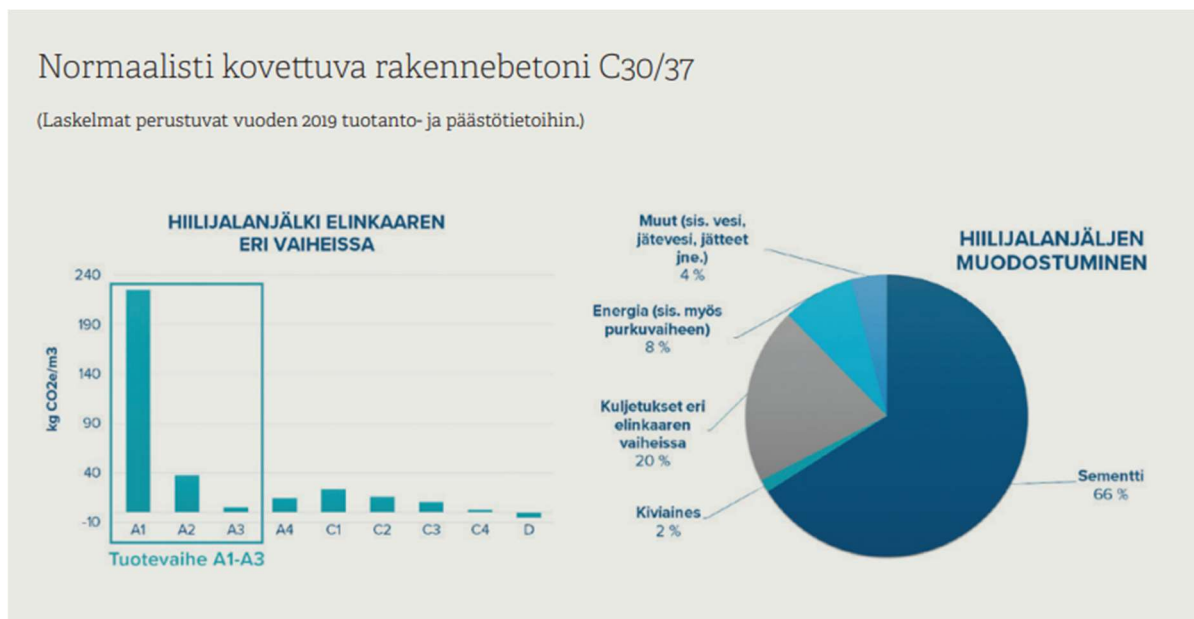
Kuva 1: Rakennushankkeen elinkaarimalli. (Mukaiillen Bionova Oy 2017)

Kuvan 1 rakennushankkeen elinkaaren vaiheet ovat standardin SFS-EN 15804 mukaiset ja ne ovat käytössä Euroopassa yleissääntöinä. Näihin vaiheisiin päästöt jaotellaan yleisesti rakennushankkeen hiilijalanjäljen laskennassa.

Kuten kappaleessa 2.1 mainittiin, betonirakentamisessa betonin sideaineen osuus hiilijalanjäljestä on suuri erityisesti valmisbetonilla. Salminen (2021) on vertaillut artikkelissaan eri valmisosien (kuva 3) sekä normaalisti kovettuvan rakennebetonin C30/37 (kuva 4) hiilijalanjäljen muodostumista sekä sen jakautumista elinkaaren eri vaiheille. Hiilijalanjäljen muodostumiseen suurin tekijä kaikissa esimerkeissä on sementti, jonka jälkeen seuraavaksi suurimpia ovat kuljetukset eri elinkaaren vaiheissa sekä energian kulutus. Elinkaaren eri vaiheissa hiilijalanjäljen muodostuminen painottuu vahvasti tuotevaiheeseen.



Kuva 2: Sandwich-elementin hiilijalanjäljen muodostuminen (Salminen 2021)



Kuva 3: Normaalisti kovettuvan rakennusbetonin C30/37 hiilijalanjäljen muodostuminen (Salminen 2021)

Salmisen (2021) artikkelissa esitetyissä kuvissa 2 ja 3 ei ole huomioitu rakentamisesta (A5) tai käytöstä (B1-B7) johtuvia päästöjä. Tämä on yleinen käytäntö tuotteiden elinkaaren arvioinnissa.

3.2 Tuotevaihe

Tuotevaiheen päästöt ovat selvästi suurimmat rakennustuotteen elinkaaren aikana, kun käyttövaihetta ei huomioida. Sideaineen eli sementin aiheuttamat päästöt tuottavat näistä päästöistä yli puolet ja valmisbetonille jopa 70 prosenttia. Myös kuljetuksien päästöt tuottavat merkittävän osuuden näistä elinkaaren päästöistä. Raaka-aineiden kuljetus valmistukseen luokitellaan tuotevaiheeseen ja siihen sisällytetään myös tyhjä paluukuormat. Betoniharkkotuotteiden valmistuksen päästöjä aiheuttavat kuormalavat, jotka ovat usein kertakäyttöisiä. Myös betonielementtien raudoitteet ja eristeet lisäävät päästöjä. (Salminen 2021)

Materiaalien päästöjä lasketaan aina hankekohtaisesti tuotevaiheessa muodostamalla lista tarvittavista materiaaleista. Materiaalien päästömäärät lasketaan niiden määrien perusteella. Jos kohteessa käytetään kierrätettyjä materiaaleja, ei niiden valmistamisesta tai kuljetuksesta syntyviä päästöjä huomioida laskennassa. Mikäli laskentaa tehdään aikaisessa hankevaiheessa, taloteknisten järjestelmien ollessa vielä epävarmoja voidaan niistä käyttää valmiita taulukkoarvoja. (Kuittinen 2019)

3.3 Rakentamisvaihe

Rakentamisvaiheen päästöihin laskeutuvat rakennustuotteiden, -materiaalien ja -tarvikkeiden kuljetus työmaalle sekä työmaatoiminnot. Työmaatoiminnot sisältävät kaikki työmaan päästöt, mutta se ei huomio koneiden ja laitteiden valmistuksen päästöjä. Betonin päästöt rakennusvaiheessa koostuvat materiaalien tai elementtien kuljetuksesta työmaalle sekä työmaalla tarvittavasta energiasta. (Green Building Council Finland 2020)

Kuljetuksille on mahdollista käyttää valmista taulukkoarvoa $10,20 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{m}^2$, joka on arvioitu Suomen keskimääräisten kuljetusetäisyyksien perusteella. Hankekohtaisessa kuljetusten päästöarviossa tulee laskea erikseen kaikki kuljetukset työmaalle ja pois käyttäen eri kuljetusmuotojen ja polttoaineiden päästökertoimia. Kuormien täyttöasteina käytetään tullessa 80 prosentista täyttöastetta ja paluumatkalla 0 prosenttia. Vertailuksi, maamassojen kuljetukset tontille ja tontilta pois käytetään 100 prosentin täyttöastetta. (Kuittinen 2019)

Työmaatoiminnoille on myös mahdollista käyttää taulukkoarvoa $27,30 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{m}^2$, joka kuvastaa työmaatoimintojen energian ja polttoaineen päästöjä. Työmaatoimintojen kohdekohtaisessa laskennassa huomioidaan työmaalla tapahtuvan valaistuksen, lämmityksen, kuivatuksen, taukotilojen tarve sekä rakennustöiden energiantarve niiden käyttämän energiamuodon tai polttoaineen päästökertoimilla. (Kuittinen 2019)

3.4 Käyttövaihe

Rakentamisvaiheessa tehdyt ratkaisut vaikuttavat käyttövaiheen päästöihin. Käyttövaiheen aikainen energiankulutus on merkittävää, mutta siihen voidaan vaikuttaa erilaisilla rakennusteknisillä ratkaisuilla. Suunnitteluvaiheessa tehdyt ratkaisut vaikuttavat merkittävästi käyttövaiheen pituuteen, energiatehokkuuteen ja päästöihin. (Green Building Council Finland 2020)

Käyttövaihe sisältää rakennuksen käytön aikaiset kasvihuonepäästöt, kunnossapidon aikaiset ympäristöhaitat, rakennukseen tarvittavat materiaalit tai laitteet ja niiden kuljetukset, rikkoutuneiden rakenteiden käsittelyn, merkittävät korjaustyöt ja niiden sisältämät työmaatoiminnot, energian käytön, veden käytön sekä jätteen käsittelyn. Betonin vaikutus käytönaikaisiin päästöihin tulee esiin sen eristävyytensä sekä ylläpidon tarpeessa. Hyvä eristys vähentää lämmityksen tarvetta, jolloin päästöt vähenevät. Laadukkaasti suunniteltu betonirakenne ei myöskään vaadi ylimääräistä ylläpitoa tai huoltoa, joka auttaa myös päästöjen vähentämisessä käytön aikana. (Green Building Council Finland 2020)

3.5 Purkuvaihe

Purkuvaihe sisältää rakennuksen purkamiseen käytettävien koneiden kuljetukset ja energiankulutuksen. Lisäksi siihen kuuluu purkujätteen kaikki ympäristöhaitat End-of-Waste tilaan saakka huomioiden kuljetukset, varastoinnit ja käsittelyt. End-of-Waste tilassa jäte ollaan ohjaamassa uuteen käyttötarkoitukseen tai sen elinkaari päättyy lopullisesti. (Green Building Council Finland 2020)

Purkutyömaan päästöt sekä kuljetusten päästöt purkuvaiheessa lasketaan rakentamisvaiheen tavoin. Valmista taulukkoarvoa 7,80 kgCO₂e /m² voi käyttää purkutöille ja kuljetuksille voi käyttää samaa 10,20 kgCO₂e /m². Jätteenkäsittelylle ja loppusijoitukselle voi käyttää arvoa 15,60 kgCO₂e /m². Jätteenkäsittelyn ja

loppusijoituksen hankekohtaisessa laskennassa arvioidaan syntyvän jätteen kokonaismäärä. Uudelleen käytettävät materiaalit poistetaan laskennasta ja niistä lisätään laskentaan vain kuljetuksesta syntyvien jätteiden päästöt. Eri jätemateriaalien päästöt lasketaan päästötietokannan materiaaliluokkakohtaisia skenaarioita käyttäen. (Kuittinen 2019)

Betoni sitoo itseensä ilmasta hiilidioksidia, kun se puretaan, joka aiheuttaa ilmastohyötyä. Päästöjä purkuvaiheessa betonista tulee sen loppukäsittelyssä, kun betoni puretaan ja siitä joudutaan erottelemaan betoniteräksset. Betoni on kuitenkin paljon uudelleen käytetty materiaali. (Betoni.com 2018)

3.6 Rakennuksen elinkaaren ulkopuoliset hyödyt ja haitat

Elinkaaren ulkopuolisiin päästöihin eli D moduuliin kuuluvat nettomääräiset ympäristöhyödyt, jotka syntyvät rakennuksen ylijäämistä. Rakennuksen energia- ja jätevirrat mahdollistavat muiden uusioraaka-aineiden käytön vähentämisen. D moduulin avulla selkiytetään elinkaaren rajauksia sekä välttyään kaksoislaskennalta elinkaaren hiilijalanjalan laskennassa. Moduuli sisältää materiaalin uudelleenkäytön, rakennusjätteestä tuotetun energian, rakennuksessa tuotetuin ja myydyin energia. (Green Building Council Finland 2020)

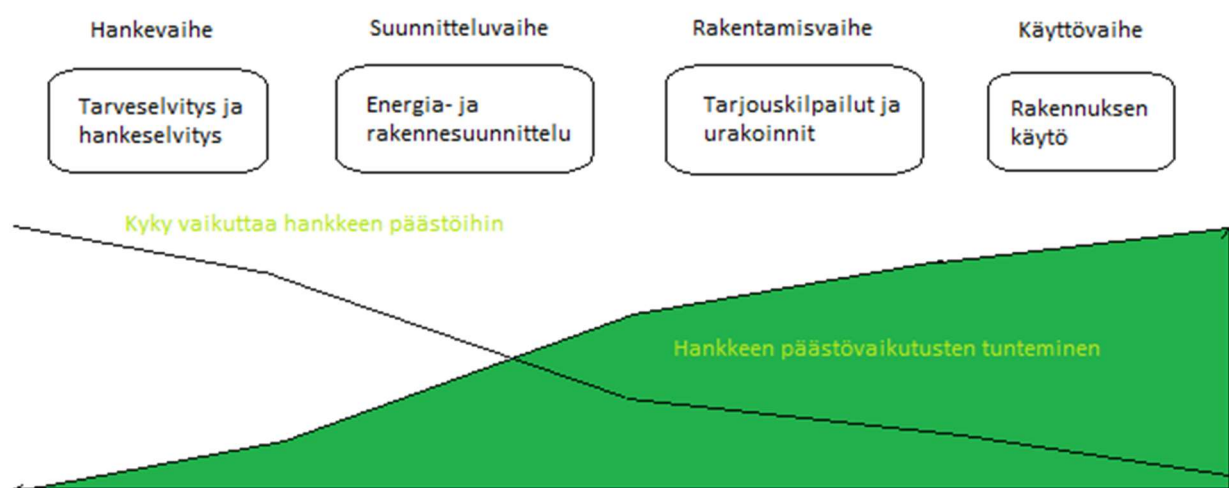
Betoni on hyvin kierrätetty materiaali, ja sen kierrätysaste on nykyään 80 prosenttia. Purettu betoni jalostetaan uuteen käyttöön ja hyödynnetään vaativissa maarakenteissa, kuten teiden jakavissa ja kantavissa kerroksissa. Tällöin betonimurskan käyttö säästää luonnon kiviainesta. Suuri elementtiset rakennukset ovat myös järkevää kierrättää sellaisenaan purkamisen sijaan, mikäli elementtien toimivuus on vielä riittävä. (Betoni.com 2018)

4 HIILIJALANJÄLJEN OHJAUS

Rakentamisen osuus Suomen kasvihuonekaasupäästöistä on merkittävä. Rakennusmateriaalien osuus rakennuksen elinkaaren päästöistä on suuri ja niiden suhteellinen merkitys kasvaa rakennuksen käytön energiatehokkuuden kehittyessä ja päästöjen vähentyessä. (Ympäristöministeriö 2021)

4.1 Suunnittelun merkitys

Kuten Green Building Council Finland (2020) esittää kuvassa 4, on suunnitteluvaiheella merkittävä vaikutus rakennuksen elinkaaren päästöihin. Päästöihin vaikuttaminen on tehokkaampaa ja edullisempaa projektin aiemmissa vaiheissa. Vähäpäästöinen rakennusprojekti lähtee rakennuttajasta, joka vaatii suunnittelijalta pitkäikäisiä ja ympäristöystävällisiä ratkaisuja. Erityisesti energiatehokkaasti suunnittelussa rakennuksessa korostuu suunnittelun merkitys päästöihin, kun rakennuksen käytön aikaiset päästöt pienenevät merkittävästi. Suunnitteluun onkin tärkeää asettaa tavoitteet ympäristöystävällisyyden lisäämiseksi.



Kuva 4: Hankkeen eteneminen, kyky vaikuttaa päästöihin ja päästövaikutuksia koskevan tiedon kasvu. (Mukaiillen Green Building Council Finland 2013)

Lainsäädäntö ei toistaiseksi määrää suunnittelijoita mittaamaan rakennusten hiilijalanjälkeä tai energiankulutusta. Useat toimijat kuitenkin pyrkivät olemaan lainsäädännön edellä luoden erilaisia mittareita ja työkaluja rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen mittaamiseksi. (Green Building Council Finland 2020)

4.2 Lainsäädännöllinen ohjaus

Ympäristöministeriön (2021) tavoitteena on saada lainsäädännöllinen ohjaus rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen pienentämiseen. Vuonna 2017 julkaistiin myös tiekartta, jolla pyritään vähentämään rakentamisen ja rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä sekä pääsemään ilmastotavoitteisiin. Tiekartan avulla muodostettiin 3 vaiheinen suunnitelma hiilidioksidipäästöjen pienentämiseksi vuoteen 2025 mennessä.

1. vaihe: Testaus ja menetelmät 2017–

- Ohjausjärjestelmän vaikutusarvioinnit
- Hiilijalanjäljen laskentamallin ja päästötietokannan kehittäminen
- Osaaminen ja työkalut
- Testaus julkisissa rakennushankkeissa ja yksityisellä sektorilla

2. vaihe: Ohjausjärjestelmän laatiminen 2019–

- Säädosohjauksen ja mahdollisten kannusteiden valmistelu
- Kytkeä kaavoitukseen ja energiaohjaukseen
- Pilottihankkeiden laajentaminen
- Rakennusten päästötietojen seurannan ja tilastoinnin valmistelu

3. vaihe: Ohjaus käyttöön 2025 mennessä

- Mahdollinen ilmoitusvelvollisuus ennen sitovia raja-arvoja
- Rakennuskanta voidaan kytkeä ohjaukseen vaiheittain
- Rakennuskannan päästötietojen seuranta

4.3 Ympäristöluokitukset

Tällä hetkellä rakennusmateriaalien päästöjä ohjataan pääosin vapaaehtoisilla arviointimenetelmillä ja luokituksilla. (Ympäristöministeriö 2021)

Ympäristöluokitusten avulla ihmiset voivat vertailla rakennusten toimintaympäristöön perustuvaa suorituskykyä. Niillä voidaan osoittaa läpinäkyvästi rakennuksen elinkaaren päästöt. Rakennuksia arvioidaan eri kategorioissa, jotka perustuvat kansallisiin tai kansainvälisiin sääntöihin. Kategorioiden pisteistä muodostetaan kokonaisarvosana rakennuksen ympäristöluokituksesta. (Rakennusteollisuus 2017)

Yleisimpiä käytössä olevia luokituksia ovat Rakennustiedon ympäristöluokitus, kansainvälinen LEED, brittiläinen BREEM ja EU:n komission testikäyttöinen Level(s)-ympäristöraportointijärjestelmä. (Ympäristöministeriö 2021)

Rakennustietosäätiön RTS-ympäristöluokitus ja RT-ympäristötyökalu ovat tarkoitettu erittelemään rakennushankkeiden ympäristövastuullisuutta tilaajille. Se on kehitetty erityisesti suomessa rakentamiseen. (Rakennusteollisuus 2017)

BREEM eli Building Research Establishment's Environmental Assessment Method on englantilainen ympäristöluokitus. Se on ekotehokkaiden kiinteistöjen luokitusjärjestelmä, joka ohjaa rakennuksen suunnittelua, rakentamista ja käyttöä. BREEM tarkastelee useita eri osa-alueita rakennuksen elinkaareissa, jotka se pisteyttää. Pisteytyksen perusteella

rakennukselle voidaan myöntää arvosanaksi läpäisty, hyvä, erittäin hyvä tai erinomainen. (Rakennusteollisuus 2017)

LEED eli Leadership in Energy and Environmental Design on yhdysvaltalainen ympäristöluokitus, joka on kansainvälinen ympäristötehokkaiden kiinteistöjen sertifiointijärjestelmä. Sertifiointi perustuu riippumattoman osapuolen tekemään arviointiin rakennuksen ja rakennushankkeen ympäristövaikutuksista. Sertifikaatin saa, kun täyttää tietyt vähimmäisvaatimukset ympäristöominaisuuksiltaan. (Rakennusteollisuus 2017)

Level(s) on Euroopan komission kehittämä menetelmä rakentamisen resurssitehokkuuden mittaamiseen. Sen kehittämisessä on ollut vahvasti mukana EU:n jäsenmaat sekä useat rakennusalan yritykset ja järjestöt. Level(s)-menetelmän ensimmäinen päätavoite onkin elinkaaren hiilijalanjälki. Muita päätavoitteita ovat resurssitehokas materiaalien käyttö, veden kulutus, terveelliset tilat ja sisäilman laatu, sopeutuminen ilmastonmuutokseen sekä elinkaarikustannukset. Level(s) pyrkii luomaan perustan ja yhdentämään eri maiden rakentamisen ekologisuuden mittareita. (Ympäristöministeriö 2018)

5 BETONIN HIILIJALANJÄLKI TULEVAISUUDESSA

5.1 Tiekartan skenaariot

Myös Rakennusteollisuus (2020) on tehnyt tiekarttaa Ympäristöministeriön ja muiden erisidosryhmien kanssa. Painotuksena on jokaisen oma osuus hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Yritysten on ajettava omaa kehitystään, valtion on ohjattava rakennustoimintaa oikeaan suuntaan ja loppukädessä kuluttaja päättää, mistä ratkaisuista on valmis maksamaan. Rakennusteollisuuden artikkelin mukaan suurimmat vaikuttajat hiilidioksidipäästöjen pienentämiseen ovat vanhan rakennuskannan korjaaminen energiatehokkaammaksi, rakentamisen tuotevalmistus ja työmaatoiminnot. Näistä olennaisimpana betonirakentamisessa ovat sementin valmistuksen päästöjen pienentäminen, vähäpäästöisiin energialähteisiin siirtyminen ja kierrätysbetonin uudelleenkäyttö.

Artikkelissa on esitetty kaksi erilaista skenaariota kuvaamaan tulevaisuuden tilannetta. Skenaariot ovat perusskenaario ja innovatiiviset ratkaisut –skenaario. Raivion mukaan kuitenkin todellinen hiilijalanjäljen pienentyminen on näiden skenaarioiden välimaastossa. Vertailuvuotena skenaarioiden arvoihin käytetään vuotta 2017. (Rakennusteollisuus 2020)

Peruskenaariossa on kuvattu, mihin nykyinen sääntely ja tekninen kehitys on viemässä. Skenaarion mukaan vuonna 2035 hiilijalanjälki olisi pienentynyt 66 prosenttia ja vuonna 2050 jopa 80 prosenttia. Suurin päästösäästö syntyisi tässä skenaariossa vähäpäästöisempiin energialähteisiin siirtymisestä. Myös tuotevalmistuksen ja työmaatoimintojen päästöt pienenisivät neljänneksellä vuoteen 2035 mennessä ja puolittuisivat vuoteen 2050 mennessä. Rakennusmateriaalien, kuten sementin käytön pieneminen on isoin päästösäästö rakennusmateriaaleista, sillä betoni on eniten käytetty ja suuripäästöisin rakennusmateriaali. Työmaatoimintoihin oleellisin päästövähennys olisi työmaatoiminnoissa, kun uusio- ja kierrätysmateriaalien käytön

lisääntyminen vähentäisi kuljetustarvetta. Lisäksi kierrätysbetonin käyttö korvaisi jonkun muun materiaalin, jolloin materiaalien valmistuksesta johtuvat päästöt pienenevät. (Rakennusteollisuus 2020)

Innovatiiviset ratkaisut –skenaariossa luotetaan teknologian harppauksiin, jotka mahdollistaisivat nykyään hyvin kalliiksi todetun teknologian käytön tavanomaisessa rakentamisessa tulevaisuudessa. Tässä skenaariossa hiilijalanjäljen pienentyminen vuoteen 2035 mennessä olisi noin 80 prosenttia ja vuoteen 2050 jopa 95 prosenttia. Suurin säästö syntyisi korjausrakentamisesta ja ostoenergian päästökertoimen pienenemisestä. Rakentamisessa suurin säästö nähtäisiin sementinvalmistuksen hiilidioksidipäästöjen talteenoton ratkaisusta sekä teräsvalmistuksesta vetypelkistyksen avulla. Näiden ratkaisujen kustannukset ovat vielä vertailuvuonna hyvin korkeat. Lisäksi merkittävänä toimina ovat teräksen ja betonin käytön optimointi suunnittelussa ja kierrätyksessä. Kuljetusten päästöjä vähennettäisiin merkittävästi uusiutuviin polttoaineisiin ja sähköön siirtymällä. Tässä haasteena on vielä uusiutuvan energian saatavuus. (Rakennusteollisuus 2020)

5.2 Seossementin laajamittaisempi käyttö

Punkki (2021) kertoo artikkelissaan sideaineiden tulevista muutoksista ja tämänhetkisistä tutkimuksista. Hän arvioi myös tämänhetkisiä ongelmia eri vaihtoehdoissa sideaineiden osalta ja esittää arvionsa sideainevaihtoehtojen yleisyydestä tulevaisuudessa. Punkki jakaa sementin hiilijalanjäljen pienentämisen vaihtoehdot kolmeen eri ratkaisuun. Ratkaisut eivät ole toisiaan poissulkevia ja tulevaisuudessa ne todennäköisesti ovatkin yhtäaikaaisesti käytössä eri määrin riippuen ajankohdasta.

Ensimmäiseksi vaihtoehdoksi Punkki (2021) esittelee seossementin laajamittaisemman käytön. Kuonasementit ovat eniten käytettyjä seossementtejä, joiden ominaisuudet ovat yleisesti tunnettuja. Masuunikuonan lisäksi seossementeissä voidaan käyttää myös muita

aineita, mutta standardit sallivat niiden käytön vain pienissä määrin verrattuna masuunikuonaan.

Seossementtien käyttö voi toimia lyhyemmän tähtäimen ratkaisuna. Niiden käytön lisäämisellä voitaisiin saada puolitettyä betonin päästöt, mutta pidemmällä tähtäimellä päästövähennykset eivät ole riittävät. Seossementtien käytössä on myös huonot puolensa. Niiden lujittuminen on huomattavasti hitaampaa kuin tyyppillisten sementtien, joka hidastaa niiden rakennuskäyttöä ja vaatii erilaisia ylimääräisiä toimenpiteitä. Myös säilyvyysominaisuudet ja ikääntyminen ovat huonommat kuin tyyppillisillä sementeillä. Suomessa pakkas-suolarasitus voi olla merkittävä, jolloin seossementtien käyttö ei ole niin optimaalista verrattuna lämpimämpiin ilmastoihin. (Punkki 2021)

Masuunikuonaa syntyy teräksen valmistuksen yhteydessä sivutuotteena. Seossementtien käyttö on myös tästä syystä lyhyen tähtäimen ratkaisu, sillä masuunikuonan saatavuus tulevaisuudessa tulee heikkenemään. Terästeollisuuden siirtyessä vetypelkistykseen parantaakseen omia päästöjään, masuunikuonan syntyminen vähenee ja syntyvän aineen laatu huononee. Myös masuunikuonan päästöjen laskennan perusteluja mietitään uudelleen EU-tasolla ja todennäköisesti sen hiilidioksidipäästöjä tullaan lisäämään. Myös muiden seosaineiden saatavuus voi osoittautua liian pieneksi, jos masuunikuonan käyttö vähenee merkittävästi. (Punkki 2021)

5.3 Vaihtoehtoiset sideaineet

Toisena vaihtoehtona Punkki (2021) esittelee vaihtoehtoisia sideaineita. Vaihtoehtoiset sideaineet ovat sideaineita, jotka eivät sisällä perinteistä portlandsementtiä. Vaihtoehtoisista sidosaineista yleisimpiä ovat alkaliaktivoituneet kuonat sekä geopolymeerit. Sementin pääasiallisena raaka-aineena toimii kalkkikivi, jonka kalsinoinnista aiheutuu valtaosa sementin hiilidioksidipäästöistä. Vaihtoehtoiset sideaineet perustuvatkin sen sijaan pii- ja alumiinipohjaisiin raaka-aineisiin, joilla voitaisiin pienentää päästöjä sementtiin verrattuna.

Vaihtoehtoisten sideaineiden joukossa on tuotteita, jotka vähentävät hiilidioksidipäästöjä, mutta osa niistä pyrkii kuitenkin vain muuttamaan sementin ja betonin ominaisuuksia pitäen päästöt tavanomaisen sementin tasolla. Esimerkiksi tulenkeston parantaminen on joissain tapauksissa tavoitteena. (Punkki 2021)

Toisaalta myöskään vaihtoehtoiset sideaineet eivät ole nollapäästöisiä. Niiden valmistuksessa syntyy päästöjä ja ne myös tuottavat jätemateriaalia. Jätteen kuljetus ja prosessointi aiheuttavat päästöjä, joiden takia parhaassa tapauksessa vaihtoehtoiset sideaineet yltyvät runsaasti seostetun sementin tasolle. (Punkki 2021)

Raaka-aineiden saanti on myös vaihtoehtoisten sideaineiden haasteena. Niillä kuitenkin on kilpailuetuna se, että ne pystyvät käyttämään raaka-aineina erilaisia teollisuuden sivuvirtoja ja jopa jätteitä. Tämä parantaa hiilijalanjälkeä, jota jäte muuten aiheuttaisi. Toisena merkittävänä haasteena on vaihtoehtoisten sidosaaineiden varmuus katsottuna standardien kannalta. Standardeilla on tarkkaan määritelty mitä betoni saa sisältää ja millaisia ominaisuuksia sillä tulee olla. Rakennusalalla turvallisuuden ollessa tärkeää voi olla vaikea saada lupaa uuden ja standardeille tuntemattoman sideaineen käyttöön. Näiden haasteiden yhteisvaikutuksesta vaihtoehtoisten sideaineiden käyttö on kannattavin ei-kantavissa rakenteissa, joilla ei ole niin tarkkaa lujusvaatimusta ja raaka-aineiden ei tarvitse riittää koko rakennukselle. Näin saavutetaan merkittäviä päästövähennyksiä yksittäisissä tapauksissa, mutta rakennuksen kokonaispäästöjä ei kuitenkaan saada pienennettyä merkittävästi. (Punkki 2021)

5.4 Vähäpäästöisempi sementti

Teknisesti perinteistä portlandsementtiä on mahdollista valmistaa hyvin vähäpäästöisesti. Sementin valmistuksessa on tehtävä merkittäviä muutoksia tämän eteen. Valmistuksessa syntyvä hiilidioksidi tuottaa noin 60 prosenttia sementin hiilidioksidipäästöistä ja sen talteen ottaminen olisi merkittävä parannus päästöihin. Myös fossiilisista polttoaineista

luopuminen polttoprosessissa on toinen merkittävä muutos. Aiheita tutkitaan parhaimmillaan useilla eri tavoin. (Punkki 2021)

Norjassa Norcem rakentaa ensimmäistä hiilidioksidin talteenottolaitteistoa sementtitehtaaseen. Talteenotossa hiilidioksidi varastoidaan tyhjennettyyn öljynporauskenttään Pohjanmerelle. Hiilidioksidi ei pääse poistumaan kentästä, eikä se pääse ilmakehään. Investointi on kuitenkin yli miljardin arvoinen, joka kattaa rakennuksen ja operoinnin vain 10 vuoden ajaksi. (Punkki 2021)

Hiilidioksidia käytetään myös synteettisten polttoaineiden valmistamiseen ja näin ollen sementtituotannon sivutuotteena syntyvien hiilidioksidikaasujen myynti on myös yksi ratkaisu. Suomessa tutkitaan, olisiko mahdollista tuottaa Finnsementin tehtaalla syntyvästä hiilidioksidista ja Kemiran tehtaalla syntyvästä vedystä synteettistä metanolia. Synteettisestä metanolista voitaisiin tehdä hiilineutraalia liikennepolttoainetta, joka auttaisi niin kulkuneuvojen kuin rakentamisenkin päästöjen vähentämisessä. (Punkki 2021)

Fossiilisista polttoaineista luopuminen ei kuitenkaan ole täysin mahdollista toistaiseksi. Sementtiklinkkeri on pystyttävä pitämään 1450°C lämpötilassa, kun taas sähkötoimisella kiertouunilla se ei ole taloudellisesti kannattavaa. Nykyään käytettävä kalsinaattori, jossa kalkkikivi kalsinoituu ennen uunia, voitaisiin kuitenkin pitää käynnissä sähköllä. Pelkkä sähköinen kalsinaattori olisi merkittävä päästöalennus sementin valmistuksen päästöissä. (Punkki 2021)

Sementin vähäpäästöisyyteen pääsy vaatii kuitenkin suuria investointeja ja se tulee viemään aikaa. Kahteen edelliseen vaihtoehtoon verraten perinteisempi portlandsementti ei kärsi raaka-aineiden saatavuusongelmista. Tämän lisäksi portlandsementti on tuttu materiaali ominaisuuksiltaan ja huollettavuudeltaan sekä siitä on yli sadan vuoden ajalta tutkimustietoa. (Punkki 2021)

6 YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen uhatessa ihmiskunnan tulevaisuutta on ympäristöystävällisyys muodostunut tärkeäksi yhteiskunnalliseksi aiheeksi. Kasvihuonekaasujen merkitys ilmaston lämpenemiselle on merkittävä. Rakennusala on suuri ilmastohaitta tuottaessaan noin kolmannes Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Rakentamisen päästöissä merkittäväksi huomioitavaksi asiaksi nousee eri materiaalit. Betoni on suuripäästöisin rakennusmateriaali kantavissa rakenteissa ja sen ilmastohaitat ovat tärkeitä koko maanlaajuisesti. Tutkimus keskittyy selvittämään betonin hiilijalanjäljen koostumusta, syntymistä ja laskentaa. Lisäksi tutkitaan betonirakentamisen tulevaisuuden tavoitteita ja mahdollisuuksia sekä niihin johtavaa ohjausta.

Ensimmäinen tutkimuskysymys käsitteli betonin hiilijalanjäljen koostumusta. Betonin hiilijalanjälki on sen kasvihuonekaasujen päästöjen määrä, joka koostuu pääosin sementin valmistuksesta, kuljetuksista, kierrätyksestä ja käytön aikaisista päästöistä. Käytön aikaisia päästöjä huomioidaan harvoin laskennassa, vaikka ne ovatkin merkittävän suuret. Käytön aikaisiin päästöihin onkin aiemmin keskitytty enemmän kuin muihin rakennuksen elinkaaren vaiheisiin. Nykyään käytön aikaiset päästöt on optimoitu jo niin hyvin, että tarkastelua on ohjattu myös muihin elinkaaren vaiheisiin. Rakennuksen päästöt jakautuvat eri elinkaaren vaiheisiin, jotka ovat standardien mukaisesti määritetty. Laskenta suoritetaan jokaisesta vaiheesta erikseen ja jokaiselle vaiheelle on tarkasti määritetty siihen kuuluvat päästöjen lähteet. Itse betonin päästöt eroavat muiden rakennusmateriaalien päästöistä sen valmistuksessa ja kierrätyksessä. Betonin pääsideaineen sementin valmistuksessa syntyy merkittävä määrä betonin valmistuksen päästöistä. Betoni tuottaa myös kierrätyksen yhteydessä paljon päästöjä, kun betoni on murskattava ja eroteltava sen sisäisistä teräksistä. Betonilla on myös positiivisia ilmastovaikutuksia. Positiivisia ilmastovaikutuksia kuvataan hiilikädenjäljellä. Betoni tuottaa positiivisia ilmastovaikutuksia karbonisoitumalla eli sitomalla itseensä ilmaa hiilidioksidia. Myös betonin uudelleenkäyttö muussa rakentamisessa on yleistä, jolloin se tuottaa vain pienen osan hävitettävän betonin päästöistä.

Toisena kysymyksenä oli, kuinka suuri ympäristöhaitta betonirakentaminen on. Rakennusalan ollessa yksi pahimmista kasvihuonekaasujen aiheuttajista on betonirakentaminen suuri osa siitä. Rakennukset ja rakentaminen tuottavat noin kolmanneksen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä, joten sen pienentämisen merkitys olisi suuri päästöjen vähentämisessä. Betoni verrattuna muihin laajalti käytettyihin rakennusmateriaaleihin, kuten puuhun ja teräkseen, on suurin päästöjen tuottaja. Tutkimukset osoittavat, että puuhun verrattuna betonirakentamisen päästöt voivat olla jopa viisinkertaiset. Vertailu materiaalien kesken ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteistä, vaan vertailussa on otettava huomioon useita eri tekijöitä. Betonin käyttöaikaiset päästöt ovat kuitenkin pienemmät kuin puulla, joka tasaa elinkaaren aikaisia päästöjä. Betoni on myös terästä jäljessä päästöjen pienentämisessä, mutta niin teräksen kuin betoninkin päästöt ovat pienenemään päin.

Kolmas kysymys käsitteli betonirakentamisen hiilijalanjäljen ohjausta. Tällä hetkellä hiilijalanjälkeä ei ohjata Suomessa lailla, vaan vapaaehtoisilla kannustimilla. Rakennusten hiilijalanjälki nojaa vielä yritysten ja tilaajien tahtoon paremmasta tulevaisuudesta. Rakennuksen vaiheista erityisesti hanke- ja suunnitteluvaihe korostuvat ohjauksessa. Hankevaiheessa tilaajan ja rakennuttajan tahtotila hiilijalanjäljen seurannasta sekä suunnittelijan valinnat ympäristöystävällisistä ratkaisuista ovat tällä hetkellä ratkaisevia tekijöitä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljelle. Projekteissa voidaan myös käyttää ympäristöluokituksia, joilla voidaan näyttää läpinäkyvästi rakennuksen ympäristöystävällisyys joko sertifikaattina tai arvosanana. Ympäristöluokituksia on useita erilaisia ja niiden arvioinnissa on eroavaisuuksia. Luokitusten käytöstä päättää yleensä tilaaja.

Viimeisenä kysymyksenä oli, millaisia tavoitteita ja ratkaisuja tulevaisuudessa on betonirakentamisen hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Hiilijalanjäljen ohjaamiseen ollaan pyrkimässä saamaan muutosta, sillä ympäristöministeriö on suunnitellut tiekarttaa tulevaisuuden tavoitteista. Ympäristöministeriön tavoitteena on saada lainmukainen ohjaus rakennusten hiilijalanjäljelle, parantaa ja seurata päästötietokantoja sekä parantaa

laskentaa. Tavoitteena on saada tiekartan tavoitteet täytettyä vuoteen 2025 mennessä. Ympäristöministeriön tiekartan pohjalta on luotu arvioita tulevaisuuden päästöistä. Arvioiden mukaan päästöjen pieneneminen on merkittävää myös tämänhetkisillä suunnitelmilla, mutta mahdolliset innovaatiot luovat lupaavaa tulevaisuutta. Jo lähitulevaisuudessa on nähtävissä merkittäviä muutoksia yhteen betonirakentamisen suurimmista epäkohdista eli betonin valmistukseen. Seossementtien käytön lisääntyminen, vaihtoehtoisten sementin sidosaineiden käyttö sekä sementin valmistuksen päästöjen väheneminen näyttävät lupaavalta, ja niiden odotetaan yleistyvän lähivuosina. Jokaisella edellä mainituista on omat haasteensa ja etunsa, mutta niiden yhtäaikainen toiminta voisi mahdollistaa suuren pienenemisen betonin kasvihuonekaasupäästöihin.

LÄHTEET

Betoni.com (2018) Kiertotalous toimii. Saatavissa (4.4.2022): <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ekologisuus/kierratys/>

Bionova Oy (2017) Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. Saatavissa (1.3.2022): https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf/1f3642e1-5d58-8265-40c1-337deeab782d/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf?t=1603260760602

CO2ncrete Solution (2019) Karbonatisoituminen. Saatavissa (6.3.2022): <https://concretesolution.fi/karbonatisoituminen/>

EN 15804 (2012) Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt. Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry.

Green Building Council Finland (2013) Rakennusten elinkaarimittarit. Saatavissa (1.4.2022): https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2019/03/Rakennusten_elinkaarimittarit_2013.pdf

Green Building Council Finland (2020) Vähähiilisyyden sanakirja. Saatavissa (6.3.2022): <https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/GBC-V%C3%A4h%C3%A4hiilisyysdeen-sanakirja-27.5.2020.pdf>

Kuittinen, M (2019) Rakennuksen vähähiilisyyden arviointi. (Saatavissa 10.4.2022): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Koivisto, K (2021) Hiilijalanjälki betoni- ja puukohteissa. (Saatavissa 11.4.2022): <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/132931/KoivistoKii.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Mölsä, S (2021) Sementin ja teräksen ilmastopäästöt tulevat jo valmistusprosessista – teräs puhdistuu joskus 2030-luvulla vetypelkistyksellä. (Saatavissa 11.4.2022): <https://www.rakennuslehti.fi/2021/04/sementin-ja-teraksen-ilmastopaastot-tulevat-jo-valmistusprosessista-teras-puhdistuu-pian-vetypelkistyksella/>

Punkki, J (2003) Rakentamisen ekologisuus. Rakennustieto. Saatavissa (14.3.2022): <https://tiedostot.rakennustieto.fi/rakentajain-kalenteri/RK030305.pdf>

Punkki, J (2021) Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni.com. Saatavissa (3.4.2021): https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/12/BET2104_74-83.pdf

Rakennusteollisuus RT ry (2017). Ympäristöluokitukset tekevät kiinteistöistä vertailukelpoisia. Saatavissa (19.3.2022): <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Rakentaminen-ja-vaaralliset-aineet/Ymparistoluokitukset/>

Rakennusteollisuus RT ry (2020). Rakennetun ympäristön hiilijalanjälkeä voidaan huomattavasti kutistaa nopeilla toimilla. Saatavissa (16.3.2022): <https://www.rakennusteollisuus.fi/Ajankohtaista/Tiedotteet1/2020/rakennetun-ympariston-hiilijalanjalkea-voidaan-huomattavasti-kutistaa-nopeilla-toimilla2/>

Salminen, E. (2021) Suomalaisen betonin hiilijalanjälki. Betoni.com. Saatavissa (6.3.2022): https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/03/BET2101_86-91.pdf

Ympäristöministeriö (2018). Level(s) - rakennusten resurssitehokkuuden yhteiset EU-mittarit. Saatavissa (19.3.2022): <https://ym.fi/levels-rakennusten-resurssitehokkuuden-mittarit>

Ympäristöministeriö (2019). Vähähiilinen rakentaminen. Saatavissa (1.3.2022): <https://ym.fi/vahahiilinen-rakentaminen>

Ympäristöministeriö (2021). Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Saatavissa (16.3.2022): <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>