

Anne Myllylä

BETONIRAKENTEIDEN VALMISTUKSEN HIILIJALANJÄLKI

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Toni Pakkala
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Anne Myllylä: Betonirakenteiden valmistuksen hiilijalanjälki
Carbon footprint in concrete structure manufacturing
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Toukokuu 2021

Betoni on tärkeä rakennusmateriaali ja sitä käytetään maailmanlaajuisesti paljon. Tässä työssä tutkitaan betonin valmistuksen hiilijalanjälkeä. Työn tavoitteena on selvittää betonin valmistuksessa syntyvien päästöjen määrää ja mahdollisia keinoja niiden vähentämiseksi. Lisäksi työssä tutustutaan tulevan hiilijalanjäljen laskentamenetelmän periaatteisiin.

Työn alku toteutettiin kirjallisuusselvityksenä. Kirjallisuusselvityksessä esitellään hiilijalanjäljen laskentamenetelmää ja betonin valmistuksen eri vaiheissa syntyviä päästöjä. Työn lopussa hyödynnettiin kirjallisuusselvityksen lisäksi haastattelututkimusta. Haastateltavina olivat kaksi suomalaisen sementinvalmistajan, Finnsementti Oy:n, edustajaa. Haastattelututkimuksessa selvitettiin keinoja, joilla sementin valmistuksesta syntyviä päästöjä olisi mahdollista vähentää.

Tutkimus osoittaa, että energian käytön jälkeen suurin kokonaisuus rakennuksien hiilijalanjäljestä muodostuu rakennusmateriaalien valmistuksesta. Rakennuksen hiilijalanjälkeä voidaan pienentää valitsemalla vähähiilisiä materiaaleja tai optimoimalla materiaalien käyttöä. Betonin valmistuksessa syntyvistä päästöistä suurin osa syntyy sementin valmistuksesta. Tutkimuksen mukaan betonin valmistuksessa syntyvien suurien päästömäärien lisäksi betoni sitoo hiiltä itseensä elinkaarensa aikana.

Työssä havaitaan, että vähähiilisen betonin valmistamisessa tulee vähentää päästöjä sementin valmistusvaiheen lisäksi betonimassan valmistusvaiheessa ja rakentamisen aikana. Näistä sementin valmistuksella on kuitenkin keskeisin vaikutus päästöihin. Tutkimuksen perusteella havaitaan, että sementin valmistuksessa syntyvien päästöjen vähentämiseksi on olemassa monia tehokkaita keinoja, kuten hiilidioksidin talteenotto. Suurien päästövähennyksien saavuttaminen edellyttää kuitenkin uusien teknologioiden käyttöönottoa. Suurimmiksi haasteiksi päästöjen vähentämisessä osoittautuvat suuret kustannukset, vihreiden tuotteiden kysyntä sekä määräysten ja lainsäädännön asettamat rajoitukset. Työssä havaitaan, että betonin valmistuksen päästöjen vähentäminen edellyttää yhteistyötä monien eri osapuolten välillä, jotta vähähiilisen betonin valmistaminen on mahdollista.

Avainsanat: hiilijalanjälki, betoni, sementti, kasvihuonekaasupäästöt

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RAKENNUSTEN ELINKAARIARVOINTI.....	3
2.1 Elinkaaren vaiheet	3
2.2 Hiilijalanjälki	5
2.3 Hiilijalanjäljen laskentamenetelmä.....	5
2.4 Hiilikädenjälki	6
3. BETONIN VALMISTUKSEN PÄÄSTÖT	8
3.1 Betonin raaka-aineet.....	8
3.2 Betonin raaka-aineista syntyvät päästöt.....	9
3.2.1 Sementin valmistus.....	10
3.2.2 Sementin valmistusprosessissa syntyvät päästöt.....	11
3.3 Muissa betonin valmistusprosessin vaiheissa syntyvät päästöt.....	13
4. VÄHÄHIILINEN BETONI.....	15
4.1 Sementin valmistuksen energiatehokkuus	15
4.1.1 Kierrätyspolttoaineet	16
4.1.2 Kierrätyspolttoaineiden käytön rajoitteet.....	18
4.2 Sementin seostaminen.....	19
4.2.1 Vaihtoehtoiset seosaineet.....	20
4.2.2 Seosaineiden käytön rajoitteet	21
4.3 Hiilidioksidin talteenotto sementin valmistuksessa	22
4.4 Betonin päästöjen vähentäminen	23
4.5 Hiilidioksidikovettuva betoni	25
5. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET	30
LIITE A: HAASTATTELURAPORTTI.....	34

1. JOHDANTO

Rakennetun ympäristön tuottamien päästöjen vaikutus ilmastoon ja sen lämpenemiseen on merkittävä, sillä Euroopan kasvihuonekaasupäästöistä noin kolmasosa syntyy rakentamisesta ja rakennuksista (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 18). Tämän takia rakentamisen päästöjen rajoittamisella on merkittävä rooli asetettujen ilmastotavoitteiden, kuten hiilineutraalin Suomen 2035, saavuttamisessa.

Ympäristöministeriön (Bionova 2017) julkaiseman vähähiilisen rakentamisen tiekartan mukaan hiilijalanjäljen määrittäminen ja vähähiilisyyteen pyrkiminen on tulossa osaksi lainsäädäntöä vuoteen 2025 mennessä. Tämän myötä rakentamisessa tulee kiinnittää huomiota rakennusten käytön aikaisen energiatehokkuuden lisäksi elinkaaren muihin osa-alueisiin, kuten rakennustuotteiden, rakentamisen ja käytön jälkeisten vaiheiden päästöihin.

Tässä työssä tarkastellaan rakennusmateriaaleista betonirakenteiden valmistuksen hiilijalanjälkeä. Työn tarkoituksena on selvittää betonin valmistuksesta aiheutuvia päästöjä sekä sitä, miten näitä päästöjä voitaisiin vähentää. Lisäksi tavoitteena on tutustua rakennusten hiilijalanjäljen laskentaan. Työ suoritetaan kirjallisuusselvityksenä, jonka lisäksi hyödynnetään sementinvalmistaja Finnsementti Oy:n edustajien haastattelua. Suomessa Finnsementti valmistaa valtaosan sementtitarjonnasta (Finnsementti). Sen vuoksi heidän toimillaan on suuri merkitys sementin valmistuksen ympäristövaikutuksia tarkasteltaessa.

Työn aihe on rajattu käsittelemään betonirakenteiden valmistusvaihetta talonrakennushankkeessa. Käytön aikaisen energiatehokkuuden parantamiseen on viime vuosien aikana panostettu paljon ja nykyään energiatehokkuuden vaatimusten mukaisuuden osoittaminen on pakollista. Rakentamisen hiilijalanjälkeä pienennettäessä on kuitenkin tärkeää vaikuttaa käyttövaiheen päästöjen lisäksi elinkaaren muiden vaiheiden aikana syntyviin päästöihin. Betonin valmistuksen suurin päästöosuus syntyy sen raaka-aineena käytettävän sementin valmistuksesta, joka tuottaa huomattavan suuret kasvihuonekaasupäästöt. Näiden päästöjen pienentäminen vaikuttaisi merkittävästi betonin hiilijalanjälkeen.

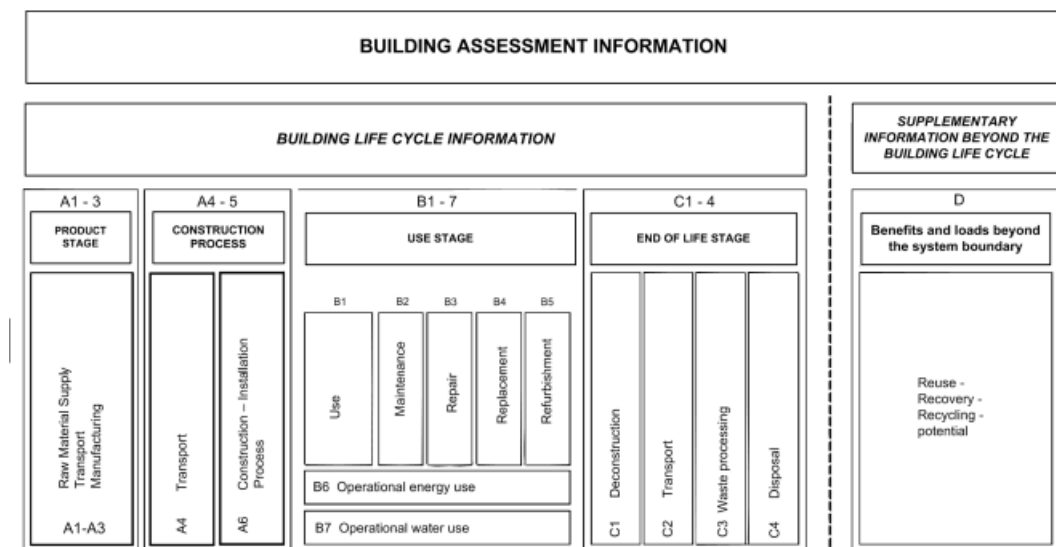
Työn toisessa luvussa käsitellään rakennuksen elinkaaren eri vaiheita ja niiden osuutta rakennuksen hiilijalanjäljen laskennassa. Kolmannessa luvussa käydään läpi, mistä betonin valmistuksesta aiheutuvat päästöt syntyvät ja neljännessä luvussa sitä, miten näitä päästöjä on mahdollista pienentää. Viides luku kokoaa yhteen työssä tehdyt johtopäätökset.

2. RAKENNUSTEN ELINKAARIARVOINTI

Rakennusten elinkaariarvioinnissa huomioidaan koko rakennuksen elinkaari rakennustuotteiden raaka-aineiden hankinnasta rakennuksen purkuun ja materiaalien loppusijoitukseen asti. Arvioinnin avulla saadaan selville rakennuksen koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset, joten sen avulla voidaan ohjata suunnittelua ympäristöystävällisempään suuntaan. (Birgisdottir & Nygaard Rasmussen 2016, s. 3)

2.1 Elinkaaren vaiheet

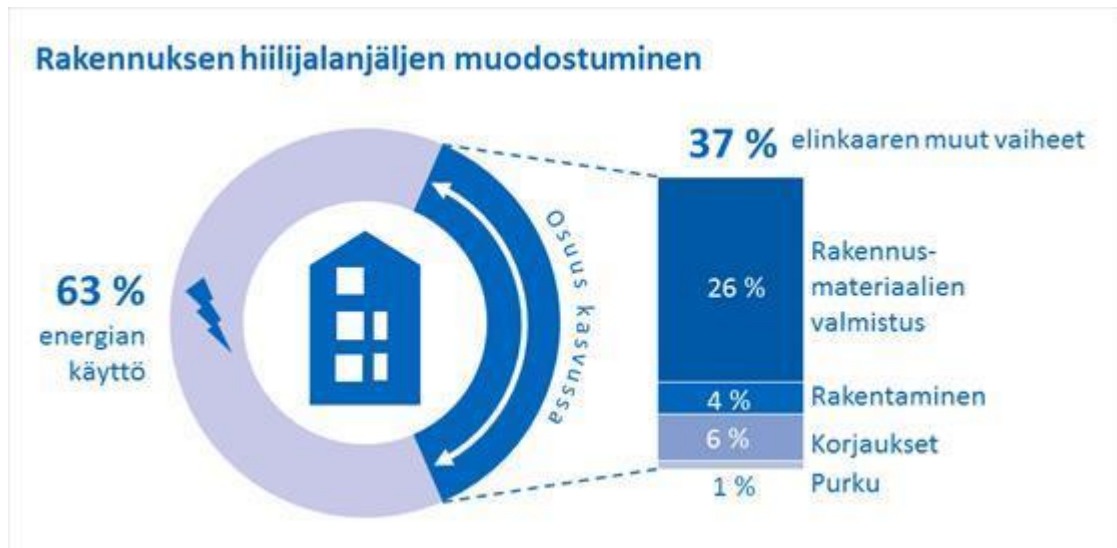
Kestävän rakentamisen standardeihin kuuluvassa SFS-EN 15643-2 -standardissa (2012, s. 21) määritellään, että rakennuksen elinkaari koostuu neljästä päävaiheesta. Nämä päävaiheet ovat tuotevaihe (engl. product stage), rakentamisvaihe (engl. construction process), käyttövaihe (engl. use stage) sekä elinkaaren loppu (engl. end of life stage) (SFS-EN 15643-2 2012, s. 21). Kyseiset vaiheet on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (SFS-EN 15643-2 2012, s. 21).

Moduuli A muodostuu tuote- ja rakentamisvaiheista eli käyttöä edeltävistä vaiheista. Moduuli B sisältää käytön aikaiset vaiheet ja moduuli C elinkaaren lopun vaiheet. Päävaiheet on jaoteltu vielä kuvan 1 mukaan alamuoduihin, joilla on omat kirjaintunnuksensa. Näiden lisäksi voidaan esittää viidentenä vaiheena elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset. Tämä viimeinen vaihe muodostuu mahdollisista kierrätettävistä materiaaleista tai rakennustuotteiden uudelleenkäytöstä, mikä voi vaikuttaa edullisesti seuraavan rakennuksen ympäristövaikutuksiin. Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset eivät sisälly varsinaiseen arviointiin, vaan ne esitetään erillisenä osana. (SFS-EN 15643-2 2012, s. 20–22)

Tuotevaihe sisältää moduulit A1–3, jotka ovat raaka-aineiden hankinta, kuljetus valmistukseen sekä tuotteiden valmistus (SFS-EN 15978 2012, s. 20). Häkkinen ja Kuittinen (2020, s. 70–71) esittävät, että näiden moduulien aiheuttamat ympäristövaikutukset on mahdollista arvioida suhteellisen tarkasti, sillä niiden tarkastelu liittyy lähitulevaisuuteen. Kuvassa 2 on esitetty keskimääräisen asuinkerrostalon hiilijalanjäljen muodostuminen eri elinkaaren vaiheissa. Kuvasta 2 nähdään, että tuotevaihe muodostaa käyttövaiheen jälkeen suurimman osuuden rakennuksen hiilijalanjäljestä.



Kuva 2. Rakennuksen hiilijalanjäljen muodostuminen (Rakennustarkastusyhdistys RTY 2016).

Rakennusvaiheen moduulit A4–5 ovat materiaalien kuljetus työmaalle sekä työmaalla tapahtuvat toiminnot (SFS-EN 15978 2012, s. 20–21). Rakentamistapojen osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä suhteessa tuote- tai käyttövaiheeseen on melko pieni, mikä ilmenee kuvasta 2.

Rakennuksen elinkaaren käyttövaihe muodostuu tuotteen käytöstä rakennuksessa, kunnossapidosta, korjauksista, osien vaihdoista, energian käytöstä sekä veden käytöstä (SFS-EN 15978 2012, s. 22). Kuvasta 2 nähdään, että käyttövaiheen osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä on tällä hetkellä yli puolet mutta sen suhteellinen osuus on laskussa. Käyttövaiheen arvioinnissa hyödynnetään skenaarioita, jotka perustuvat oletuksiin rakennuksen käyttö- ja ylläpitotavoista (Birgisdottir & Nygaard Rasmussen 2016, s. 4). Rakennuksen elinkaaren viimeinen vaihe on elinkaaren loppu, jonka aikana syntyy päästöjä purkamisesta, materiaalien kuljetuksesta jatkokäsittelyyn, purkujätteen käsittelystä sekä sen loppusijoituksesta (SFS-EN 15978 2012, s. 28–29).

2.2 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki tarkoittaa elinkaaren aikana syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen summaa hiilidioksidiekvivalentteina (CO₂-ekvivalentti) (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 18). Hiilidioksidiekvivalentti on hiilijalanjäljen yksikkö, jossa kaikkien kasvihuonekaasujen ilmaston lämpenemisvaikutukset on muunnettu vastaamaan hiilidioksidia (GBC Finland 2020, s. 2). Hiilijalanjälki on yksi indikaattoreista, jota käytetään rakennusten elinkaariarvioinnissa. Sitä käytettäessä arvioidaan siis rakennuksen elinkaaren aikana syntyviä ympäristövaikutuksia ilmaston lämpenemispotentiaalin avulla. (Birgisdottir & Nygaard Rasmussen 2016, s. 6)

Häkkinen ja Kuittisen (2020, s. 20) mukaan rakennusten ympäristövaikutusten arvioinnissa kasvihuonekaasupäästöt ovat selvästi suurempia verrattuna muihin rakentamisen aiheuttamiin ympäristökuormituksiin, kuten rehevöittäviin päästöihin. Siitä syystä rakentamisen aiheuttamia päästöjä arvioidaan hiilijalanjäljen avulla (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 20). Kuittinen (2019, s. 9, 11) esittää, että rakennusten hiilijalanjäljen laskenta on tarpeellista päästöjen vähentämisen kannalta, sillä ilman yhtenäistä arviointimenetelmää on rakennusten aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä vaikea arvioida ja pyrkiä vähentämään.

2.3 Hiilijalanjäljen laskentamenetelmä

Suomessa ympäristöministeriö valmistelee rakennusten vähähiilisyyden arviointiin menetelmää, joka pohjautuu Euroopan komission tekemään Level(s)-menetelmään sekä kestäväää rakentamista ohjaaviin standardeihin. Arviointimenetelmä on tarkoitus ottaa käyttöön vuoteen 2025 mennessä. (Ympäristöministeriö) Valmisteilla oleva rakennusten hiilijalanjäljen laskenta sekä elinkaariarviointi pohjautuvat standardiin SFS-EN 15978 *Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method* (Bionova 2017, s. 23). Standardi esittää yhtenevät laskusäännöt rakennusten ympäristövaikutusten arviointiin.

Standardin EN 15978 (2012, s. 15) mukaan rakennusten elinkaariarviointi voidaan jakaa seitsemään vaiheeseen, joista ensimmäinen vaihe on arvioinnin tavoitteen määrittely. Ympäristöministeriön arviointimenetelmän tullessa käytäntöön tämä tarkoittaa rakennustyyppittäin asetettavaa lakisääteistä rajaa. Laskennalla tulee osoittaa, ettei tätä rajaa ylitetä. (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 74)

Seuraava vaihe hiilijalanjäljen laskennassa on arvioinnin kohteen tarkempi määrittely ja rajaus. Kyseisessä vaiheessa määritellään esimerkiksi tarkasteltavat rakennuksen elin-

kaaren vaiheet ja niiden reunaehdot sekä rakennusosat. Kolmas vaihe koostuu elinkaariarvioinnissa käytettävien skenaarioiden eli oletusten määrittelystä. (SFS-EN 15978 2012, s. 16–36) Skenaarioita käytetään tulevaisuudessa tapahtuvien elinkaaren vaiheiden ennustamiseen ja arviointiin (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 79). Standardissa EN 15978 (2012, s. 33) määritellään, että skenaarioiden tulee perustua lainsäädäntöön, asiakkaan vaatimuksiin tai vallitseviin käytäntöihin.

Neljännessä vaiheessa arvioidaan määrällisesti käytettävät materiaali- ja energiamäärät sekä prosessit, minkä jälkeen seuraava vaihe on päästötietojen valinta. Osalle rakennustuotteista ja palveluista on laadittu ympäristöseloste eli EDP (engl. Environmental Product Declaration), jossa määritellään ympäristövaikutukset. (SFS-EN 15978 2012, s. 36–40) Hiilijalanjäljen laskennan helpottamiseksi ympäristöministeriö on julkaissut päästötietokannan, johon on koottu rakennustuotteiden sekä yleisimpien prosessien ja palveluiden päästötiedot (Ympäristöministeriö 2021). Päästötietojen määrittelyn jälkeen voidaan suorittaa hiilijalanjäljen laskenta. Määritellyt materiaali- ja energiamäärät, kuljetukset sekä rakennustyöt kerrotaan kyseisten osien päästökertoimilla ja summataan. Tämän jälkeen tulos raportoidaan läpinäkyvästi ja avoimesti arviointimenetelmän edellyttämällä tavalla. (SFS-EN 15978 2012, s. 44–46)

2.4 Hiilikädenjälki

Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan ilmastohyötyjä, joita syntyy rakennuksen elinkaaren aikana. Tällaisia hyötyjä, jotka eivät syntyisi ilman rakennushanketta, ovat esimerkiksi

- rakennusosien uudelleenkäytön tai materiaalien kierrätyksen kautta vältetyt kasvihuonekaasupäästöt
- rakennuksessa tai tontilla tuotettu ylimääräinen uusiutuva energia
- rakennusmateriaaleihin varastoitunut eloperäinen hiili sekä niihin elinkaaren aikana mahdollisesti sitoutuva ilmakehän hiilidioksidi. (Kuittinen 2019, s. 30)

Hiilikädenjäljen laskennan periaatteet määritellään standardissa EN 15804. Saatua tulos esitetään erillisenä osana, eikä sitä vähennetä hiilijalanjäljestä (SFS-EN 15978 2012, s. 27, 36).

Hiilikädenjälki tuo esille rakennushankkeen suotuisia ympäristövaikutuksia, kun taas hiilijalanjälki korostaa negatiivisia vaikutuksia. Pajula *et al.* (2018, s. 12) esittää, että hiilikädenjälkeä voidaan hyödyntää markkinointitarkoituksessa sekä ohjaamaan päätöksen-

tekijöiden valintoja. Lisäksi hiilikädenjäljen laskenta voi paljastaa myös tuotteiden mahdollisia kehitystarpeita ja tuottaa näin tärkeää tietoa tuotekehittäjille. (Pajula *et al.* 2018, s. 12)

3. BETONIN VALMISTUKSEN PÄÄSTÖT

Betoni on maailmanlaajuisesti eniten käytetty rakennusmateriaali, jonka vuosittainen tuotanto on noin 13 miljardia kuutiometriä. Betonin valmistuksen suurimmat hiilidioksidipäästöt syntyvät sen raaka-aineena käytettävän sementin valmistuksesta. (BY201 2018, s. 13, 144) Betonin valmistuksen suuret päästöt aiheutuvat sen todella suurista vuosittaisista käyttömääristä (Betoni a). Betonia käytetään monissa sellaisissa kohteissa, joissa sen korvaaminen muilla materiaaleilla olisi hankalaa, tai jopa mahdotonta.

Betonilla on suurten päästöjen lisäksi myös iso hiilikädenjälki. Betonirakenteet ovat pitkäikäisiä, tiiviitä, vähän huoltoa vaativia sekä massiivisia, joka vaikuttaa positiivisesti rakennuksen lämpöoloihin (Mattila 2019, s. 14). Sen lisäksi yksi tärkeä näkökulma betonin valmistuksen päästöissä on valmiin betonirakenteen positiiviset ympäristövaikutukset. Betonia käytetään esimerkiksi monissa tuuli- ja vesivoimaloiden rakenteissa, jolloin betonin käytöllä mahdollistetaan päästöttömän energian tuottaminen. (Betoni a)

3.1 Betonin raaka-aineet

Betoni määritellään keinotekoiseksi kiveksi, jota valmistetaan sekoittamalla sen pääraaka-aineet vesi, sementti ja kiviaines keskenään. Betonin vahvuudet rakennusmateriaalina ovat esimerkiksi sen lujuus, jäykkyys sekä kosteuden sietokyky. (BY201 2018, s. 13, 16)

Sementti on hydraulinen hienojakoinen sideaine, joka reagoidessaan veden kanssa muodostaa lujan sementtikiven. Sementtikivi tunnetaan myös nimellä sementtipasta tai sementtiliima. (BY201 2018, s. 24) Betonin kiviaines, eli toiselta nimeltään runkoaine, on rakeisuusvaatimukset täyttävää luonnonkiviainesta tai murskattua kiviainesta. Betonimassan tilavuudesta runkoainetta on 65–80 %. Siitä syystä kiviaineksen fysikaalisten, kemiallisten ja mekaanisten ominaisuuksien on täytettävä betonin kiviainetta koskevat standardeissa esitetyt vaatimukset. (BY201 2018, s. 43–44)

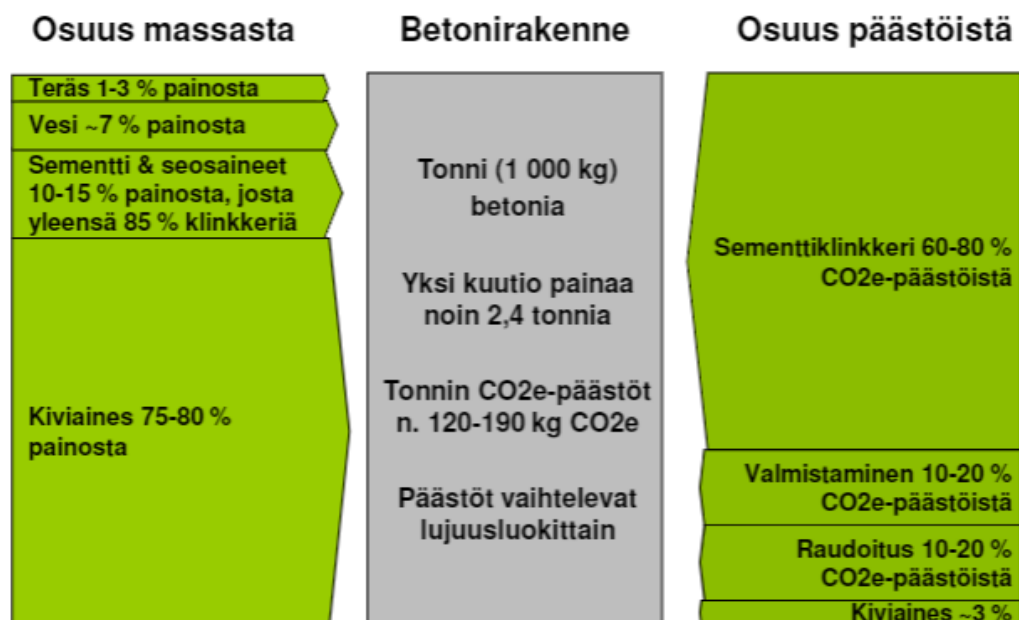
Pääraaka-aineiden lisäksi betonin valmistuksessa voidaan käyttää seos- tai lisäaineita. Seosaineita käytetään runkoaineena tai sementin valmistuksessa korvaamaan sementtiä, jolloin sideainekustannukset jäävät alhaisemmiksi. Lisäksi seosaineilla on mahdollista saavuttaa normaalista betonista poikkeavia ominaisuuksia, kuten alhaisempi hydrataatiolämpö, sulfaatinkestävyys sekä parempi tiiviys, vedenpitävyys ja työstettävyys (BY201 2018, s. 56–58). Suomessa käytössä olevia seosaineita ovat lentotuhka, silika sekä masuuni- ja ferrokromikuona (BY65 2016, s. 129).

Lisäaineita käytetään betonissa, kun halutaan vaikuttaa betonimassan ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin, erityisesti vaativissa olosuhteissa. Betonin lisäaineiden pääryhmät ovat notkistavat lisäaineet, huokostimet, hidastimet ja kiihdyttimet. Notkistavat lisäaineet mahdollistavat massan työstettävyyden korkealujuusbetoneilla, joissa vesi- ja sementtimäärät ovat pieniä. Pakkasestävän betonin valmistuksessa lisäaineena käytetään huokostimia. Hidastimilla voidaan pitkittää betonin sitoutumista ja kiihdyttimillä puolestaan nopeuttaa sitä. (BY201 2018, s. 60–64)

3.2 Betonin raaka-aineista syntyvät päästöt

Betonin aiheuttamat päästöt voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään, joista suurin on raaka-aineista syntyvät päästöt. Muut päästöjä aiheuttavat kokonaisuudet ovat valmiin betonuotteen, eli valmisbetonin tai betonielementin, valmistus sekä betonin kuljetuksesta aiheutuvat päästöt. (BY201 2018, s. 146)

Suurin osa betonin valmistukseen käytettävistä raaka-aineista on kiviainesta ja vettä. Näiden raaka-aineiden päästöjen osuus on kuitenkin pieni suhteessa sementin valmistuksessa syntyviin hiilidioksidipäästöihin (BY201 2018, s. 147). Kuvassa 3 on esitetty betonirakenteen päästöjen jakautuminen sekä raaka-aineiden osuus betonimassassa.

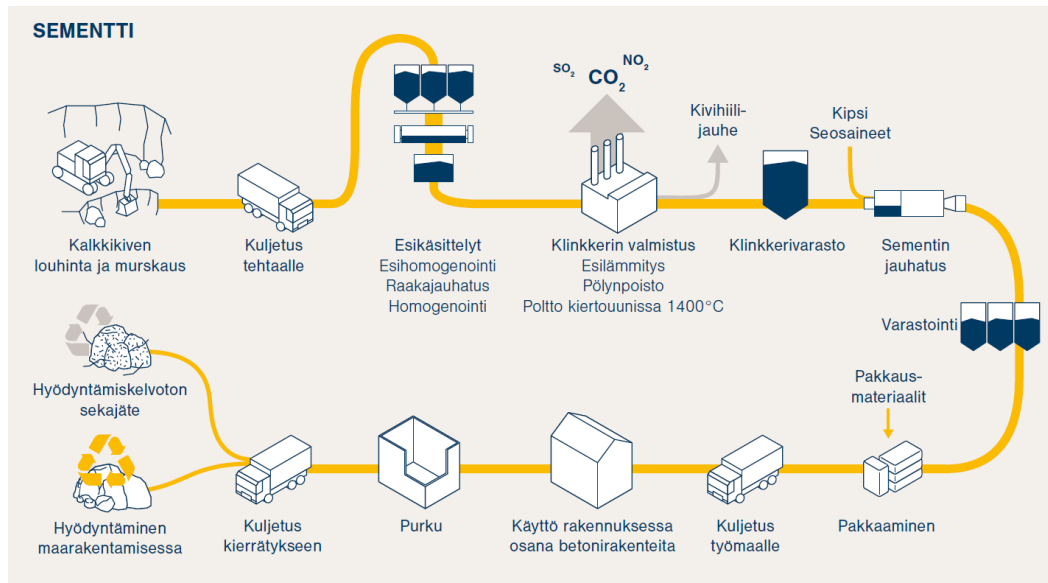


Kuva 3. Betonirakenteen raaka-aineiden osuus betonimassasta sekä aiheutuvista päästöistä (Pasanen *et al.* 2012, s. 10).

Kuvasta 3 nähdään, että vaikka betonimassasta reilusti yli puolet on kiviainesta, sen osuus betonirakenteen päästöistä on hyvin pieni verrattuna sementin osuuteen päästöistä. Kuitenkin myös kiviaineksen osuutta betonirakenteiden hiilidioksidipäästöistä on mahdollista vähentää. Rudus on tuonut markkinoille vihreän betonin, jossa betonin kiviaineksesta syntyvät päästöt pyritään minimoimaan esimerkiksi lyhyillä kuljetusmatkoilla sekä hyödyntämällä rakennusalueilla syntyvää murskattavaa kiviainesta (Lumme 2012, s. 38). BY201 (2018, s. 147) mukaan kiviaineksen lisäksi myös lisäaineet aiheuttavat hiilidioksidipäästöjä mutta kuvasta 3 havaitaan, että raaka-aineista aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä sementin osuus on selkeästi suurin. Mattila (2015, s. 119) esittää, että tavanomaisten betonielementtien raudoituksesta aiheutuvat päästöt ovat vähäiset sementin valmistuksesta aiheutuviin päästöihin verrattuna. Sama voidaan todeta myös kuvasta 3. Sen vuoksi tässä työssä keskitytään tarkastelemaan tarkemmin betonin raaka-aineista vain sementtiä.

3.2.1 Sementin valmistus

Sementin valmistuksessa pääraaka-aineena käytetään kalkkikiveä. Valmistusprosessi alkaa sen louhinnasta, murskauksesta sekä jauhatuksesta. Kalkkikiven sisältämän kalsiumkarbonaatin CaCO_3 lisäksi raaka-aineiksi tarvitaan piidioksidia SiO_2 , rautaoksidia Fe_2O_3 sekä alumiinioksidia Al_2O_3 . Näistä ainesosista muodostuva raakajauhe syötetään seuraavassa vaiheessa esilämmitysjärjestelmään, jossa polttoaineen polttamisesta syntyvät kuumat savukaasut kuumentavat jauheen. Esilämmitysjärjestelmässä tapahtuvaa reaktiota kutsutaan kalsinointireaktioksi. Siinä kalkkikiven kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi. Seuraava vaihe sementin valmistuksessa on kiertoilmuunissa tapahtuva poltto. Jauhetta kuumennettaessa siitä muodostuu sementtiklinkkeriä, joka vastaa raekooltaan karkeaa soraa. (Finnsementti 2020, s. 8, 9) Kuvassa 4 on esitetty sementin elinkaaren eri vaiheet, alkaen edellä kuvatuista vaiheista.



Kuva 4. Sementin elinkaaren vaiheet (Häkkinen & Kuittinen 2020, s. 56).

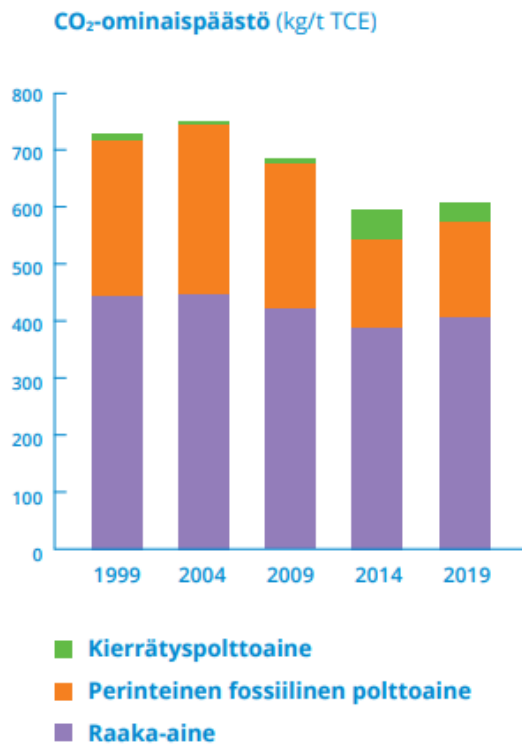
Kuvasta 4 havaitaan, että sementin valmistuksessa päästöjä syntyy klinkkerin valmistusvaiheessa, jossa vapautuu hiilidioksidia, rikkidioksidia sekä typpioksidia. Viimeinen vaihe ennen sementin varastointia on kuvassa 4 esitetty sementin jauhatus, jossa sementtiklinkkerit, seosaineet ja kipsi jauhetaan lopulliseksi tuotteeksi. Kuvasta 4 nähdään myös sementin valmistuksen jälkeiset elinkaaren loppuvaiheet, eli sementin käyttö betonirakenteissa, purku sekä kierrätys.

3.2.2 Sementin valmistusprosessissa syntyvät päästöt

Sementin valmistus on useasta vaiheesta koostuva prosessi, jonka aikana syntyy merkittävä määrä hiilidioksidipäästöjä. Finnsementin ympäristöraportista (2020, s. 13) selviää, että Suomen hiilidioksidipäästöistä 1,6 % aiheutuu sementin valmistamisesta. Maailmanlaajuisesti sementin valmistus aiheuttaa 5 % hiilidioksidipäästöistä (Finnsementti 2020, s. 13).

Sementin valmistusprosessissa päästöjä syntyy kahdessa eri vaiheessa. Finnsementin ympäristöraportissa (2020, s. 11) esitetään, että esilämmitysjärjestelmässä tapahtuvan kalsinoitumisreaktion aikana syntyy noin 60 % hiilidioksidipäästöistä. Yhden sementtiklinkkeritonin valmistus edellyttää 1,5 tonnia kalkkikiveä, josta vapautuu kalsinointireaktiossa 500 kg hiilidioksidia (Mattila 2019, s. 14). Toinen vaihe, jossa päästöjä syntyy, on kalkkikiven poltto. Kiertouunissa tapahtuva polttoaineiden palaminen aiheuttaa sementin valmistuksen päästöistä noin 40 %. Polttoprosessissa kiertouunin lämpötila nostetaan jopa 1450 asteeseen. Korkean lämpötilan saavuttaminen on energiaintensiivistä ja edellyttää suuria määriä polttoainetta. (Finnsementti 2020, s. 8, 11) Suomessa semen-

tin valmistuksesta syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat viimeisen 20 vuoden aikana pienentyneet noin 100 kg per sementtitonni, mikä selviää kuvasta 5. Kuvasta 5 havaitaan myös, että viimeisen kymmenen vuoden aikana hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet yli 10 %.



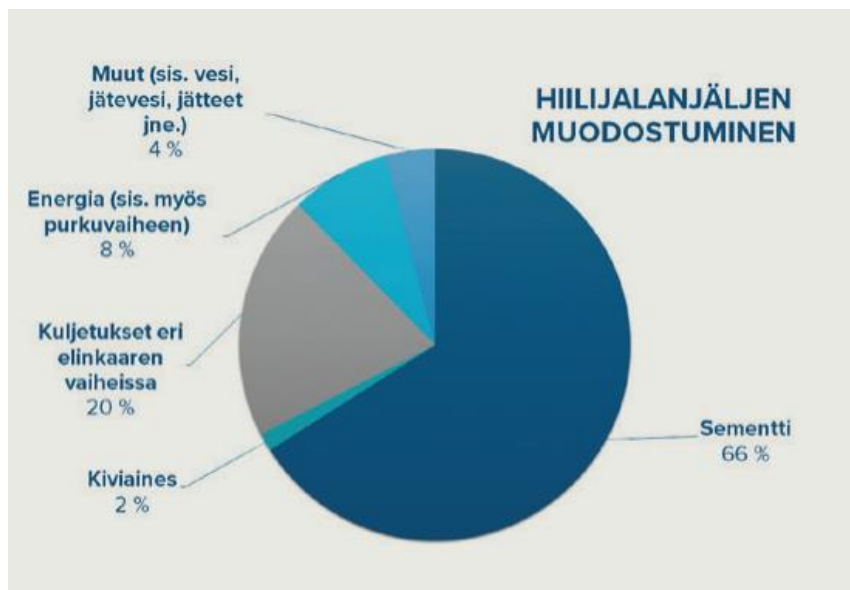
Kuva 5. Sementin valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt vuosina 1999-2019 (Finnsementti 2020, s. 10).

Kuvasta 5 selviää, että päästöjen vähentyminen on tapahtunut pääosin fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämällä sekä korvaamalla niitä kierrätyspolttoaineilla. Finnsementin ympäristöraportin (2020, s. 10) mukaan kokonaisuudessaan polttoaineiden käyttö valmistusprosessissa on vähentynyt, mikä on seurausta polttoprosessin energiatehokkuuden parantumisesta. Kuvasta 5 nähdään, että kalkkikiven aiheuttamat päästöt kalsinointireaktiossa ovat kuitenkin pysyneet viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana lähes yhtä suurina.

Sementin valmistusprosessissa syntyy hiilidioksidipäästöjen lisäksi myös muita ympäristölle haitallisia päästöjä, kuten savukaasujen sisältämiä pölypäästöjä ja typen oksideja. Näiden päästöjen määrän vähentäminen on mahdollista nykyteknologialla. Esimerkiksi poltosta vapautuvia typen oksideja on mahdollista vähentää SNCR-menetelmällä (engl. Selective Non-Catalytic Reduction), jossa ammoniakkia sisältävää liuosta ruiskutetaan savukaasuihin. Typen oksidit reagoivat tällöin ammoniakin kanssa muodostaen vaaratonta typpikaasua sekä vettä. (Finnsementti 2020, s. 9, 14)

3.3 Muissa betonin valmistusprosessin vaiheissa syntyvät päästöt

Toinen osakokonaisuus betonin valmistuksen hiilidioksidipäästöistä syntyy varsinaisten tuotteiden valmistuksesta. Betonituotteella voidaan tarkoittaa tässä tapauksessa joko betoniasemalla valmistettavaa valmisbetonia tai elementtitehtailla valmistettavia betonielementtejä. Kuvassa 6 on esitetty normaalisti kovettuvan, lujuusluokaltaan C30/37, rakennebetonin hiilijalanjäljen muodostuminen. Kuvan 6 mukaan valmistusvaiheen, eli pääasiassa energian, osuus betonin hiilijalanjäljestä on suhteellisen pieni verrattuna raaka-aineiden tai kuljetusten osuuteen.



Kuva 6. Rakennebetonin C30/37 hiilijalanjäljen muodostuminen (Salminen 2021, s. 90).

Kuvasta 6 nähdään, että betonin raaka-aineiden osuus betonin hiilijalanjäljestä on lähes 70 %. Betonin valmistusvaiheessa syntyvät päästöt aiheutuvat pääosin tehtaan energian kulutuksesta (Salminen 2021, s. 89). Kuvassa 6 energian osuus sisältää valmistusvaiheen lisäksi myös purkuvaiheessa käytettävän energian, jota kuluu purkamiseen ja betonin murskaamiseen. Kuvassa 6 esitettävissä laskennan tuloksissa ei ole otettu huomioon rakentamisvaihetta eikä käyttövaihetta, jotka otetaan rakennuksen hiilijalanjäljen laskentaan mukaan vasta kun tunnetaan hankekohtaiset tiedot (Salminen 2021, s. 89). Valmisbetonin osalta energiaa kuluu rakentamisvaiheessa työmaalla esimerkiksi valaistukseen ja talvisin muottien lämmitykseen (BY201 2018, s. 146).

Betonin valmistuksessa syntyy päästöjä raaka-aineiden sekä betonituotteen valmistuksen lisäksi kuljetuksista. Kuvassa 6 esitetyssä valmisbetonin hiilijalanjäljen muodostumi-

sessä kuljetusten osuudessa on mukana valmiin tuotteen kuljetuksen lisäksi raaka-aineiden kuljetukset. BY201 (2018, s. 147) esittää, että kun tarkastelusta jätetään pois raaka-aineiden osuus, kuljetukset muodostavat n. 5–10 % tuotteen valmistuksen kokonaispäästöistä. Betoni ja betonituotteet ovat painavia, joten niiden kuljetusmatkojen minimointi on tärkeää sekä päästöjen että taloudellisuuden kannalta. (BY201 2018, s. 147)

4. VÄHÄHIILINEN BETONI

Betonin vähähiilisyyteen pyrkiminen on tärkeää päästövähennystavoitteiden kannalta, sillä sen valmistuksen arvioidaan tuottavan noin 2,5 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Betoni a). Betonin menekki on suurta ja se sopii monien hyvien ominaisuuksiensa vuoksi myös vaativiin kohteisiin (BY201 2018, s.13). Betonin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi tehdään parhaillaan paljon tutkimustyötä liittyen muun muassa hiilidioksidikovettuvaan betoniin, sementtiä korvaavien vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöön sekä hiilidioksidin talteenottoon (Hirvonen *et al.* 2019; Oulun Yliopisto 2019; Finnsementti 2020, s. 14). Euroopan sementtiteollisuuden (CEMBUREAU – The European Cement Association) julkaiseman hiilineutraalin tiekartan tavoitteena on tehdä sementin valmistuksen arvoketjusta hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Arvoketju koostuu viidestä C:stä, jotka ovat klinkkeri (engl. clinker), sementti (engl. cement), betoni (engl. concrete), rakentaminen (engl. construction) ja uudelleen karbonatisoituminen (engl. re-carbonation). (CEMBUREAU 2020, s. 4, 11) Tämä tarkoittaa, että vähähiilisen betonin valmistamista voidaan tarkastella sen sideaineen, eli sementin tasolla sekä laajemmin betonimassan tasolla.

Suomessa toimii kaksi Finnsementti Oy:n sementtitehdasta Paraisilla ja Lappeenrannassa, joissa valmistetaan valtaosa Suomen sementintarjonnasta (Finnsementti 2021). Siitä syystä tässä luvussa käsiteltävissä sementin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen liittyvissä aiheissa on hyödynnetty lähteenä Finnsementin ympäristöpäällikön Ulla Leveelahden sekä asiakastukipäällikön Sini Ruokosen haastattelua.

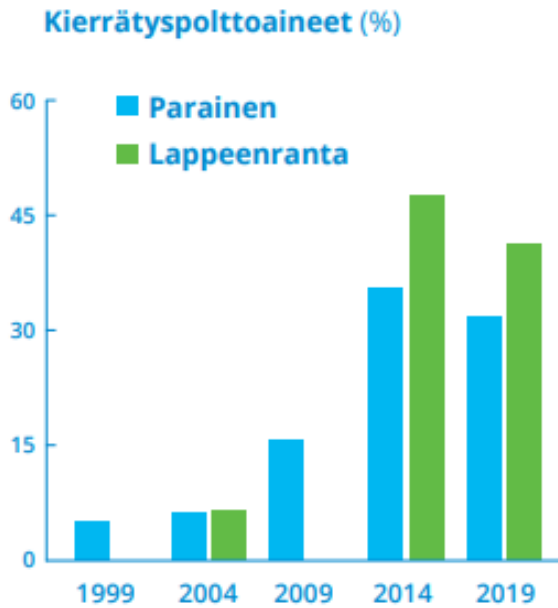
4.1 Sementin valmistuksen energiatehokkuus

Finnsementin ympäristöraportin (2020, s. 13) mukaan sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä yksi keinoista on sementtiuunien energiatehokkuuden parantaminen. Kalkkikiven polttoprosessi sementtiuunissa käyttää paljon energiaa, sillä lämpötila nousee hitaasti ja saavuttaa korkean lämpötilan. Zieri ja Ismail (2019, s. 1184) esittävät, että sementin valmistus kuluttaa energiaa 120 kWh/sementtitonni, joka vastaa 10–15 % maailmanlaajuisesti teollisuuden käyttämästä energiasta. Polttoprosessin vaatiman lämpötilan saavuttamiseksi uuneissa käytetään pääpolttoaineena fossiilisia polttoaineita, kuten kivihiiltä ja petrokoksia. Hukkalämpö, joka syntyy sementinvalmistuksen yhteydessä, otetaan talteen. Sitä hyödynnetään esimerkiksi hiili- ja raaka-ainemylyissä sekä kaukolämpöverkoissa. (Finnsementti 2020, s. 8, 10, 12)

Finnsementin ympäristöraportissa (2020, s. 12) esitetään, että Suomessa tehtaiden energiatehokkuuden taso on hyvä. Myös CEMBUREAU:n tiekartan (2020, s. 19) mukaan sementtiuunit ovat jo tehokkaita mutta parannuksia lämpötehokkuuteen voidaan vielä tehdä. Tämä on mahdollista esimerkiksi korvaamalla esilämmitysuuneja esikalsinaattoriuuneilla (CEMBUREAU 2020, s. 19). Finnsementin ympäristöpäällikkö Ulla Leveelahti kertoo haastattelussa, että Suomen sementtitehtaat sijoittuvat eurooppalaisessa klinkkerin ominaispäästöjen vertailussa hyvin, Lappeenrannan tehtaalla ollessa jopa parhaimman 10 %:n joukossa. Leveelahden mukaan sementtiuunien energiatehokkuuden parantamiseksi tehdään tutkimustyötä liittyen muun muassa matalalämpötilaklinkkeriin, missä tutkitaan klinkkerin valmistusmahdollisuutta matalammassa lämpötilassa, jolloin energiaa kuluu vähemmän. Lisäksi Suomessa Finnsementti tutkii Paraisten tehtaalle energiatehokkuutta parantavaa muutosmahdollisuutta, joka mahdollistaisi fossiilisten polttoaineiden päästöjen vähenemisen ja hukkalämmön tehokkaamman talteenottamisen, Leveelahti kertoo. CEMBUREAU (2020, s. 19) esittää, että sen tavoitteena on parantaa lämpötehokkuutta 14 % vuoteen 2050 mennessä.

4.1.1 Kierrätyspolttoaineet

Fossiilisten polttoaineiden lisäksi sementtiuunissa poltetaan myös kierrätyspolttoaineita, kuten asfalteenia, kierrätysöljyä, rengasmursketta sekä pakkausmateriaaleista valmistettavaa SRF-kierrätyspolttoainetta. Kierrätyspolttoaineiden käytöllä on monia positiivisia ympäristövaikutuksia, sillä niiden käyttö vähentää louhinnan tarvetta, säästää luonnonvaroja sekä pienentää hiilidioksidipäästöjä. (Finnsementti 2020, s. 10, 18) Kuvassa 7 on esitetty kierrätyspolttoaineiden osuus sementin valmistuksen energiantarpeesta Finnsementin molemmissa sementtitehtaissa.



Kuva 7. Kierrätyspolttoaineiden osuus sementtiuunien energiantarpeesta (Finnsementti 2020, s. 12)

Kuvasta 7 nähdään, että kierrätyspolttoaineiden käyttö on lisääntynyt merkittävästi viimeisen 10 vuoden aikana. Tällä hetkellä Finnsementin valmistusprosessissa kierrätyspolttoaineilla tuotetaan noin 40 % energiantarpeesta (Finnsementti 2020, s. 12).

Sementin valmistusprosessissa polttolämpötila uunissa nousee korkeaksi, jopa 1450 asteeseen. Siitä syystä kierrätyspolttoaineet sopivat hyvin sementtiuuniin, sillä korkeassa lämpötilassa polttoaineet palavat puhtaasti, eikä prosessista jää jäljelle läjitettäviä pohjatuuhkia. Sementtiuunissa tapahtuvasta jätteenpoltosta käytetään nimitystä rinnakkaisprosessointi (engl. co-processing), sillä kierrätyspolttoaineista tuotetun energian lisäksi hyödynnetään raaka-aineena polttoaineiden palamaton osuus, joka sulaa mukaan klinkkeriin. (Finnsementti 2020, s. 8, 18, 20) CEMBUREAU:n tiekartan (2020, s. 16) mukaan jätepolttoaineiden käyttö säästää päästöt, jotka syntyisivät jätteenpolttolaitoksesta tai loppusijoituksesta. Esimerkiksi Finnsementin sementtitehtaalla Paraisilla hyödynnetään viidesosa kaikista vuosittain kerätyistä autonrenkaista. Renkaiden sisältämä palamaton materiaali, kuten metallikudos ja reunavaijerit sulavat mukaan lopputuotteeseen. (Finnsementti 2020, s. 18, 20) Toisaalta Nhuchhen *et al.* (2021, s. 12) esittävät tutkimuksessaan, että maakaasulla toimivassa sementtitehtaassa kierrätyspolttoaineiden käyttö todennäköisesti kasvattaisi lämpöenergiaintensiiteettiä, sähkön tarvetta sekä lopullisia hiilidioksidipäästöjä. Tutkimuksessa kasvihuonekaasupäästöjä oli kuitenkin mahdollista pienentää käyttämällä biopolttoaineita (Nhuchhen *et al.* 2021, s. 12).

Zieri ja Ismail (2019, s. 1199–1200) esittävät tutkimuksessaan, että kierrätyspolttoaineiden käytöllä on mahdollista pienentää myös polttoaineen vuosittaisia kustannuksia. Tutkimuksen kolmessa eri skenaariossa kierrätyspolttoaineiden suhde vaihteli. Yhdessä skenaariossa polttoaineena käytettiin 40 % kivihiiltä, 40 % kaatopaikkajätteistä peräisin olevaa lajiteltua polttoainetta sekä 20 % autonrenkaista peräisin olevaa polttoainetta. Kun tätä verrattiin skenaarioon, jossa kivihiilen osuus polttoaineesta oli 100 %, kierrätyspolttoaineita sisältävän vaihtoehdon polttoaineen vuosittaiset kustannukset olivat lähes puolet pienemmät. (Zieri & Ismail 2019, s. 1199–1200)

Finnsementin ympäristöpäällikön Ulla Leveelahden mukaan teknisesti kierrätyspolttoaineiden osuus polttoaineesta voitaisiin nostaa jopa 100 % etenkin Lappeenrannan tehtaalla, jossa on kierrätyspolttoaineiden polttamiseen hyvin soveltuva kalsinaattoriuni. Lisäksi Euroopan sementtiteollisuus tutkii mahdollisuuksia, joissa kalsinointireaktion aikaan saamiseksi käytettäisiin fossiilisten polttoaineiden sijaan sähköä, plasmaa tai aurinkoenergiaa. Käyttämällä uusiutuvaa sähköenergiaa tulevaisuudessa polttoaineen hiilidioksidipäästöjä olisi mahdollista vähentää 55 %. Jos tämän lisäksi hyödynnettäisiin vielä vetyä ja biopolttoaineita, polttoprosessi voisi saavuttaa lähes nollapäästöt. Euroopan sementtiteollisuus on asettanut vaihtoehtoisten polttoaineiden käytölle tavoitteen, jonka mukaan vuoteen 2030 mennessä ne muodostaisivat 60 % uuneissa käytettävästä polttoaineesta. Tavoitteena on, että tästä vaihtoehtoisten polttoaineiden määrästä puolet olisi biomassaa. (CEMBUREAU 2020, s. 16)

4.1.2 Kierrätyspolttoaineiden käytön rajoitteet

Kierrätyspolttoaineiden tulee täyttää tietyt sementtiunissa käytettävälle polttoaineelle asetetut kriteerit, jotka liittyvät polttoaineen lämpöarvoon, kemialliseen koostumukseen, kappalekokoon sekä materiaalin kulkuun ja käsittelyyn syöttölaitteistossa. (Finnsementti 2020, s. 18) Koska prosessissa polttoaineiden palamaton osuus sulaa mukaan sementtiklinkkeriin, kierrätyspolttoaineiden käytössä tulee tutkia niiden vaikutus klinkkerin ominaisuuksiin (Hashem *et al.* 2019, s. 276). Leveelahden mukaan yksi kierrätyspolttoaineiden käytön haasteista on sopivien polttoaineiden löytäminen, jotka täyttävät ehdot tasalaatuisuudesta sekä riittävän korkeasta lämpöarvosta. Lisäksi hän esittää, että kierrätyspolttoaineiden saatavuus tai pitkät kuljetusmatkat saattavat rajoittaa kierrätyspolttoaineiden käyttöä.

Leveelahden mukaan kierrätyspolttoaineiden ominaisuuksien lisäksi yksi niiden käyttöä rajoittava tekijä Suomessa on myös lainsäädäntö. Suomessa on muista Euroopan maista poiketen säädetty laissa, että vaaralliseksi luokiteltavia jätteitä ei saa polttaa sementtiunissa, Leveelahti kertoo. Hänen mukaansa Euroopasta on saatavilla paljon

käyttökokemuksia kyseisten polttoaineiden polttamisesta ja niiden on todettu palavan jopa puhtaammin sementtiuunissa.

4.2 Sementin seostaminen

Betonin valmistuksen hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä betonin sideaineella on suuri merkitys. Tarkasteltaessa keinoja, joilla sementin hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää, yksi tärkeimmistä keinoista on sementin klinkkerimäärän vähentäminen (CEM-BUREAU 2020, s. 23). Sementtiklinkkeri syntyy sementtiuunissa, jossa yksi prosessin vaiheista on raakajauheen sisältämän kalkkikiven kalsinointireaktio. Koska kalsinointireaktion seurauksena syntyy suuri osa sementin valmistuksen päästöistä, klinkkerimäärän vähentäminen on tärkeää. (Finnsementti 2020, s. 8, 22) Sementin klinkkerimäärän vähentämiseksi on mahdollista käyttää seosaineita, kuten masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Ne ovat muun teollisuuden yhteydessä syntyviä sivutuotteita, joita hyödynnetään betoniteollisuudessa noin 350 000 tonnia vuodessa. (betoni b)

Finnsementin ympäristöpäällikkö Ulla Leveelahti kertoo haastattelussa, että sivutuotteiden päästöt otetaan huomioon niitä tuottavassa alkuperäisessä prosessissa. Koska sementin valmistuksessa hiilidioksidipäästöt muodostuvat pääosin klinkkerin valmistuksesta, Leveelahden mukaan sementin seostamisella voidaan vaikuttaa suoraan hiilidioksidipäästöjen määrään. Myös tutkimustulosten mukaan seosaineiden käytöllä voidaan vaikuttaa merkittävästi betonin päästöihin. Esimerkiksi korvaamalla sideaineesta 50 % masuunikuonalla, hiilidioksidipäästöt vähenevät noin 40 %. (Betoni b) Seosaineita voidaan hyödyntää sekä raakajauheessa että sementtiklinkkerin jauhatusvaiheessa. Lisäksi niitä voidaan lisätä betonimassaan vielä betoniasemalla. (Mindess & Aitcin 2011, s. 6) Raakajauheeseen lisättävät seosaineet korvaavat kalkkikiveä, joten niiden käyttö vähentää sementtiuunista vapautuvia kalsinointireaktion tuottamia hiilidioksidipäästöjä. Jauhatusvaiheessa lisättävillä seosaineilla korvataan klinkkerin määrää valmiissa sementissä.

Tällä hetkellä potentiaalisin sementin seosaine on masuunikuona, joka vähentää sementistä aiheutuvaa ympäristökuormitusta enemmän kuin lentotuhka (Tulimaa *et al.* 2005, s. 54). Finnsementin (2019) tuote-esitteen mukaan sen käyttö sementin seosaineena antaa betonille myös monia hyviä ominaisuuksia. Masuunikuonaa sisältävä betoni on esimerkiksi tiiviimpää sekä sillä on korkea loppulujuus ja parempi pakkassuolakestävyys. Masuunikuona sopii myös hyvin massiivisten rakenteiden valmistukseen, sillä se alentaa lämmönkehitystä ja vähentää korkeasta lämmöstä johtuvaa lujuskatoa. Monien hyvien ominaisuuksien lisäksi masuunikuonan käytössä tulee kuitenkin huomioida, että betonin alkulujuudenkehitys hidastuu sekä betonin jälkihoitoaika pitenee. (Finnsementti 2019)

Hawileh *et al.* (2016, s. 511) selvittivät tutkimuksessaan masuunikuonan vaikutusta rau-
doitettujen betonipalkkien toimintaan. Tutkimuksen mukaan palkkien sideaineessa on
mahdollista käyttää jopa 70 % masuunikuonaa ilman että palkkien toiminta heikkenee.
Betonipalkit, joissa masuunikuonan osuus oli 70 % tai vähemmän, käyttäytyivät samalla
tavalla tutkimuksen testeissä kuin seostamaton vertailupalkki. Masuunikuonan käytön on
todettu parantavan myös betonirakenteiden korroosionkestävyyttä, sillä betonin lä-
päisevyys pienentyy. Merkittävien hiilidioksidipäästöjen vähenemisen lisäksi masuu-
nikuonan on tutkittu esimerkiksi parantavan betonin työstettävyyttä ja vähentävän beto-
nin kutistumista. (Hawileh *et al.* 2016, s. 512, 518) Toisaalta Tulimaa *et al.* (2005, s. 53)
tuovat esille tutkimuksessaan, että masuunikuonan osuuden ollessa 70 % sideainemää-
rystä, koebetonin pakkasenkestävyys oli heikompi verrattuna matalampiin masuunikuo-
nan prosentiosuuksiin. Betonin päästöjä on kuitenkin mahdollista vähentää merkittävästi
käyttämällä seostettuja sementtejä etenkin kohteissa, joissa säilyvyysvaatimuksia ei ole.
Tällaisia ovat esimerkiksi sisätiloissa olevat betonirakenteet, joihin ei kohdistu pakkas-
enkestävyysvaatimuksia. (Tulimaa *et al.* 2005, s. 54–55)

4.2.1 Vaihtoehtoiset seosaineet

Euroopan sementtiteollisuus aikoo tutkia erilaisten jättemateriaalien ja muun teollisuuden
sivutuotteiden käyttöä kalkkikiveä korvaavina raaka-aineina klinkkerin valmistuksessa.
Sementtiteollisuus arvelee, että tulevaisuudessa lentotuhkan saatavuus rajoittuu sekä
kuonan käyttö vähenee. Tämä perustuu siihen, että esimerkiksi hiilivoimaloita poistetaan
vaiheittain käytöstä. Tämän myötä sementtiteollisuus tutkii myös uusien seosaineiden,
kuten kalsinoitujen savien käyttöä sementin seostamisvaiheessa. (CEMBUREAU 2020,
s. 15, 23)

Tosti *et al.* (2021) esittävät tutkimuksessaan, että yhtenä vaihtoehtona sementin hiilidi-
oksidipäästöjen vähentämiseksi on biomassatuhkan käyttäminen klinkkerin valmistuk-
sessa raaka-aineena tai seosaineena sementin valmistuksessa. Tämä perustuu siihen,
että biomassatuhka sisältää sementin valmistuksessa tarvittavia alkuaineita ja yhdisteitä,
kuten kalsiumia, silikaa, alumiinia ja rautaa. Sementin valmistukseen soveltuisi etenkin
biomassatuhka, jonka poltossa raaka-aineina käytettäisiin puuta ja kaarnaa. Sen käyttöä
saattaa kuitenkin rajoittaa tuhkan kemiallinen koostumus ja lopullisen klinkkerin laatua
sekä tuotteiden kestävyttä tulisi vielä tutkia lisää. Biomassatuhkan käyttö edellyttäisi
toimia sekä sementtiteollisuudelta että bioenergiateollisuudelta. Sementtiunien tulisi
kestää biomassatuhkan korkeampia emäspitoisuuksia sekä bioenergiateollisuuden pyr-
kiä optimoimaan polttoprosessista syntyvän tuhkan laatua. (Tosti *et al.* 2021)

Oulun yliopistossa tutkitaan vaihtoehtoisia materiaaleja, joilla voitaisiin korvata sementtiä. Näin voitaisiin valmistaa geopolymeeribetonia, jossa sementin sijaan käytettäisiin teollisuuden sivuvirran materiaaleja ja alkaliaktivaattoreita. Erilaisia sementin valmistukseen soveltuvia sivuvirtoja syntyy esimerkiksi louhinnasta, kaivostoiminnasta, paperituotteiden valmistuksesta ja rakentamisesta. Ne sisältävät alkuaineita, kuten piitä, kalسيومia, rautaa, alumiinia ja magnesiumia. Siitä syystä ne pystyvät tietyissä olosuhteissa käyttäytymään ja kovettumaan sementin tapaan. Geopolymeeribetonin hiilidioksidipäästöt olisivat tavalliseen betoniin verrattuna 40–90 % pienemmät ja se lujittuisi tavallisen betonin tapaan. Esimerkiksi mineraalivillajätteestä olisi mahdollista valmistaa rakennustuotteita kemiallisen alkaliaktivoinnin avulla. (Härkönen 2020, s. 82–86)

4.2.2 Seosaineiden käytön rajoitteet

Kalkkikiveä on mahdollista korvata vain osittain seosaineilla. Tämä perustuu siihen, että kalsinointireaktio on klinkkerin valmistuksessa välttämätön reaktio. (Finnsementti 2020, s. 10) Seosaineiden käytölle asettaa rajoituksia myös betonin valmistusta säätelevä eurooppalainen standardi SFS-EN 206 sekä sen kansallinen liite SFS 7022 (SFS-EN 296:2014 + A2:2021:en 2021; SFS 7022:2019 2019). Standardissa SFS 7022 (2019, s. 9–10) määritellään esimerkiksi eri rasitusluokissa sallittavat sementtityypit ja seosainekertoimet. Lisäksi sementtistandardi SFS-EN 197-1 (2012, s. 15) määrittelee eri sementtityyppien seosaineet ja niiden prosenttiosuudet sementissä. Finnsementin asiakastukipäällikön Sini Ruokosen mukaan tällä hetkellä yrityksen myydyin tuote on CEM II/B–M sementti, jossa seosaineiden määrä on standardin EN 197-1 (2012, s. 15) mukaan 21–35 % ja klinkkerin määrä 65–79 %. Tulevaisuudessa on mahdollista valmistaa CEM III tyyppin seossementtiä, jota on kolme ryhmää: CEM III/A, CEM III/B ja CEM III/C. Niistä CEM III/C on seostetuin ja siinä klinkkerin osuus sementissä voi olla vain 5 %. (SFS-EN 197-1 2012, s. 15) Standardissa SFS 7022 (2019, s. 9) määritellään, että kyseisen sementtityypin käyttö ei ole kuitenkaan mahdollista missään rasitusluokissa. Lisäksi CEM III/C sementtiin verrattuna alhaisempien seostussuhteiden sementtien CEM III/A ja CEM III/B käyttö ei ole mahdollista pakkas-suolarasitusluokissa XF2 ja XF4. (SFS 7022 2019, s. 9)

Leveelahti esittää, että seostettujen sementtien valmistaminen on teknisesti mahdollista ja Finnsementti onkin tuomassa markkinoille nykyisiä sementtejä seostetun CEM III tyyppin sementin. Korkean seostussuhteen sementtien haasteena on kuitenkin niiden rajatimmat käyttökohteet ja asiakkaiden vaatimukset, Leveelahti kertoo. Ruokonen mainitsee myös, että voimakas seosaineiden käyttö hidastaa betonin lujudenkehitystä, mikä pidentää työmaiden aikatauluja. Lujudenkehitykseen vaikuttaa myös ympäristön

olosuhteet, jolloin Suomen talviolosuhteissa lujuudenkehityksen hidastuminen korostuisi, Leveelahti kertoo. Hyödynnettäessä sivuvirtoja ja jätteitä myös hankala sijainti, pitkät kuljetusmatkat tai materiaalin suuret laadunvaihtelut voivat rajoittaa niiden käyttöä (Härkönen 2020, s. 84).

4.3 Hiilidioksidin talteenotto sementin valmistuksessa

Eurooppalaisen sementtiteollisuuden hiilineutraaliustavoitteen saavuttaminen edellyttää teknologiaoikkoa, jotta hiilineutraalin sementin valmistaminen on mahdollista. Tärkeänä teknologiana sementin valmistuksen päästöjen vähentämisessä on hiilidioksidin talteenotto, hyödyntäminen ja varastointi. (Mattila 2020, s. 24–25) Myös Finnsementin ympäristöpäällikkö Ulla Leveelahti esittää haastattelussa, että hiilidioksidin talteenotto on hiilineutraaliuden saavuttamiseksi välttämätöntä. Sementtiteollisuudessa maailman ensimmäistä hiilidioksidin talteenotto ja varastointihanketta suunnitellaan tällä hetkellä Norjan Brevikissä ja hankkeen on tarkoitus käynnistyä vuonna 2023 tai 2024. Hankkeessa talteenotettu hiilidioksidi kuljetetaan laivalla Norjan rannikolla sijaitsevaan väliaikaiseen varastointilaitokseen, josta se siirretään putkistoa pitkin Pohjanmerellä sijaitsevaan merenalaiseen lopulliseen varastoon. (Norcem) Hankkeessa on tarkoitus hyödyntää lopullisena varastointikohteena tyhjentyntä öljykenttää (Finnsementti 2020, s. 15).

Teir *et al.* (2011) esittävät, että hiilidioksidin talteenotto ja varastointi sisältää monia vaiheita sekä vaihtoehtoisia tapoja niiden toteuttamiseen. Sementin valmistukseen soveltuvassa tekniikassa ensimmäinen vaihe on hiilidioksidin erottaminen ja talteenotto poltossa syntyvistä savukaasuista. Prosessissa savukaasut jäähdytetään ja hiilidioksidin erottamiseen käytetään kemiallisia liuottimia. (Teir *et al.* 2011, s. 13, 26) Euroopassa käynnissä oleva LEILAC (Low Emissions Intensity Lime And Cement) hanke tutkii hiilidioksidin erottamiseen vaihtoehtoisia tekniikkaa, jossa puhdasta, savukaasuista erillään olevaa hiilidioksidia olisi mahdollista saada talteen suoraan polttoprosessista. Tällöin hiilidioksidin talteenotto ei vaadi ylimääräistä energiaa tai kemikaaleja. (LEILAC) Tavoitteena hiilidioksidin talteenotossa on tuottaa puhdasta hiilidioksidia, joka paineistetaan ja kuljetetaan joko laivalla tai putkilinjoja pitkin mahdollisesti välivaraston kautta lopulliseen varastointikohteeseen. Lopullisena varastointipaikkana voidaan hyödyntää esimerkiksi huokoisia kivihiilikerrostumia tai geologisia muodostumia, kuten käytettyjä öljykenttiä. Talteenotettua hiilidioksidia voitaisiin varastoinnin sijaan myös hyötykäyttää teollisesti. (Teir *et al.* 2011, s. 39, 41, 62)

Leveelahden mukaan Suomessa yhtenä hiilidioksidin varastoinnin ongelmana on sopivien geologisten varastointikohteiden puuttuminen. Pysyvän varastoinnin vaihtoehtona on Suomessa sen sijaan tutkittu hiilidioksidin sitomista mineraaliin, Leveelahti kertoo.

Hän esittää, että haasteeksi tässä menetelmässä muodostuu kuitenkin hiilidioksidin sitomiseen vaadittava suuri kiviainesmäärä ja sen lopullinen käyttökohde. Siitä syystä hänen mukaansa Suomessa potentiaalisena vaihtoehtona hiilidioksidin varastoinnin sijaan voisi olla hiilidioksidin hyötykäyttöä synteettisen polttoaineen valmistamisessa. Polttoaineen toisena raaka-aineena käytettäisiin Kemiran tehtaalla syntyvää ylijäämävetyä ja se soveltuisi esimerkiksi lentoliikenteen polttoaineeksi, Leveelahti kertoo. Hiilidioksidin hyötykäyttöä synteettisen polttoaineen valmistamisessa hankaloittaa tällä hetkellä lainsäädäntö, joka ei tulkitse polttoaineen olevan päästötöntä, sillä sen valmistamiseen tarvittava vety on fossiilista alkuperää, Leveelahti mainitsee.

Leveelahti esittää, että hiilidioksidin talteenoton ja varastoinnin yhtenä haasteena on siitä syntyvät suuret kustannukset, jotka muodostuvat tutkimustyöstä, investointikustannuksista sekä käyttökustannuksista. Käyttökustannuksia syntyy talteenoton aikana esimerkiksi prosessissa tarvittavista kemikaaleista ja energiasta, Leveelahti tuo esille. Hänen mukaansa kustannukset tulevat vaikuttamaan sementin hintaan, jonka arvioidaan nousevan vähintään 60 %. Tämän seurauksena yksi haaste on myös vihreiden tuotteiden kysyntä, Leveelahti toteaa. Hän mainitsee myös, että hiilidioksidin talteenoton mahdollistava teknologia on suhteellisen uutta ja esimerkiksi talteenotetun hiilidioksidin kuljettamiseen vaadittava infrastruktuuri ja lopullinen sijoituskohde tai käytötapa aiheuttavat vielä haasteita.

Sementin hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä hiilidioksidin talteenotto, hyötykäyttö ja varastoiminen ovat avainasemassa (CEMBUREAU 2020, s. 19). Euroopan sementtiteollisuus tutkii useita vaihtoehtoisia tapoja hiilidioksidin talteenotolle, varastoinnille ja hyötykäytölle. Norjassa varastoimiseen käytettävien geologisten muodostumien lisäksi tutkitaan esimerkiksi levien kykyä absorboida hiilidioksidia ja kasvattaa biomassaa, jota myöhemmin olisi mahdollista käyttää sementtiuunien polttoaineena. (CEMBUREAU 2020, s. 19) Leveelahti tuo esille, että hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö tai varastoiminen on suuri hanke, joten se edellyttää esimerkiksi monien toimijoiden välistä yhteistyötä sekä lainsäädännöllistä ohjausta.

4.4 Betonin päästöjen vähentäminen

Betonin valmistuksessa päästöjä on mahdollista vähentää betonimassan osalta suunnitteluvaiheessa esimerkiksi hyödyntämällä seosaineita sekä optimoimalla betonin lujuutta ja määrää. Betonimassan päästöjen vähentämisessä tärkeässä roolissa on betonin sideaineen sekä sen sisältämän klinkkerin määrä, joita tulisi vähentää. Klinkkerimäärän

vähentäminen betonissa tarkoittaa seostettujen sementtien käyttöä. Lisäksi betonin si-deaineen määrää on mahdollista vähentää myös valitsemalla käyttötarkoitukseen opti-maalisimman betonin lujuusluokan. (Pasanen *et al.* 2012, s. 10, 22)

Alhaisemman lujuusluokan betonissa sementtiä on vähemmän, joka vähentää betonin hiilidioksidipäästöjä. (Pasanen *et al.* 2012, s. 22). Toisaalta Mindess ja Aitcin (2011, s. 8) esittävät, että betonirakenteiden valmistuksessa korkealujuusbetonien käytöllä on mahdollista vähentää betonimassan määrää, joka kuuluu saman toiminnallisuuden saa-vuttamiseen. Alhainen lujuus ei siten välttämättä vähennä betonin hiilidioksidipäästöjä, joten betonin lujuus tulee optimoida rakennekohtaisesti. Alhaisemman lujuusluokan be-tonien käytössä on huomioitava myös niiden hitaampi lujuuden kehitys. (Pasanen *et al.* 2012, s. 22) Lumme (2012, s. 39) esittää, että käytettäessä viileissä valuolosuhteissa lujuudenkehitykseltään nopeaa betonilaatua, työmaan lämmitysenergian tarve vähenee. Tämä tarkoittaa, että alhaisempien lujuusluokkien käytössä sekä betonilaadun valin-nassa on otettava huomioon myös ympäristön olosuhteet. Lisäksi on varmistuttava, ettei alhaisempien lujuusluokkien betonin käyttö vaikuta rakennuksen käyttöikään heikentä-västi (Pasanen *et al.* 2012, s. 23). Sementin määrää betonissa voidaan vähentää myös käyttämällä alhaisempaa vesi-sementti-suhdetta, joka vaikuttaa positiivisesti myös beto-nirakenteen käyttöikään ja sitä kautta vähentää betonin päästöjä (Mindess & Aitcin 2011, s. 8).

Pasanen *et al.* (2012, s. 23–24) esittävät, että betonin päästöjä on mahdollista vähentää myös käyttämällä suunnittelussa pidempää betonin laadunarvosteluikää. Tavallisesti be-tonin laadunarvostelu määritetään 28 vuorokauden ikäiselle betonikappaleelle, vaikka kovettuminen jatkuu tämän jälkeenkin. Sementin määrää olisi mahdollista vähentää noin yhden lujuusluokan verran, jos kuukauden sijaan laadunarvostelu tehtäisiin kolmen kuu-kauden ikäisille koekappaleille. Betonin hiilijalanjälkeä voidaan pienentää myös raken-teiden entistä paremmalla optimoinnilla, jolloin betonin määrä rakenteissa vähenee. Be-tonimassan määrän vähentämisessä tulee ottaa kuitenkin huomioon rakennuksen ener-giatehokkuus, muuntojoustavuus sekä käyttö. (Pasanen *et al.* 2012, s. 23–24)

BIBM (2021, s. 10) esittää, että betonin valmistuksen päästöjen vähentämisessä yksi keino on käyttää betonielementtejä paikallavaletun betonin sijaan. Tätä perustellaan muun muassa sillä, että betonielementtien valmistuksessa kuluu vähemmän sementtiä, raudoitusta sekä materiaaleja. Esimerkiksi betonielementtirakenteisen lattian paino on 35–50 % pienempi verrattuna paikallavalettuun lattiaan, jolloin myös betonin valmistuk-sesta syntyvät päästöt ovat alhaisempia. Lisäksi betonielementtien valmistuksessa käy-tettävän sementin määrää on helpompi optimoida tehdasoloissa verrattuna paikallava-

lurakenteiden valmistukseen. (BIBM 2021, s. 10, 58) Suomessa betonielementtivalmistaja Parma on tuonut markkinoille vähähiilisen ontelolaatan, jonka valmistuksessa käytetään ympäristöystävällistä valmistustekniikkaa. Tavallisiin ontelolaattoihin verrattuna sen hiilidioksidipäästöt ovat 40 % pienemmät. (Parma 2020) Valmisbetonituotannossa Lujabetoni tarjoaa hiilineutraalia valmisbetonia. Tuotteessa hiilineutraalius saavutetaan päästökompensoinnilla, joka tarkoittaa päästövähennysprojekteihin, kuten metsityshankkeisiin, sijoittamista. (Lujabetoni)

Betonin valmistuksessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen lisäksi betoni sitoo elinkaarensa aikana hiilidioksidia takaisin. Finnsementin ympäristöraportin (2020, s. 7) mukaan betonin sitoma hiilidioksidin määrä on keskimäärin 23 % kalsinointireaktiossa vapautuvasta hiilidioksidista. Hiilidioksidin sitoutuminen betoniin tapahtuu kalsinointireaktiolle vastakkaisen kemiallisen reaktion, karbonatisoitumisen, avulla. Betonin kierrätys lisää sitoutuvan hiilidioksidin määrää, sillä murskatussa betonissa on ehjään betonirakenteeseen verrattuna lisää karbonatisoitumatonta pinta-alaa. (Kekkonen 2021) Betonin hiilijalanjälkitarkasteluissa betonin sitomaa hiilidioksidia ei kuitenkaan oteta huomioon (Finnsementti 2020, s. 7).

4.5 Hiilidioksidikovettuva betoni

Betonin päästöjä on mahdollista vähentää myös uusien innovaatioiden avulla. Yksi innovaatioista on hiilidioksidikovettuva betoni, jota teknologian tutkimuskeskus VTT on Suomessa ryhtynyt kehittämään. Prosessissa betonin jälkihoito tapahtuu hiilidioksidikaasulla, jolloin sementin reaktiotuotteiden lisäksi syntyy karbonaattipohjaisia reaktiotuotteita. Tämä tarkoittaa, että hiilidioksidikovetuksessa betoniin sitoutuu hiilidioksidia karbonaattiyhdisteissä. Kokeissa on todettu, että käyttämällä sementtiä korvaavia sideaineita prosessissa on mahdollista saavuttaa jopa hiilinegatiivinen lopputulos. Myös seostamattomalla Portland-sementillä hiilijalanjälki on 10–40 % pienempi verrattuna tavalliseen betoniin. (Hirvonen *et al.* 2019)

CEMBUREAU:n tiekartan (2020, s. 29) mukaan myös Solidia Technologies -yrityksellä on käynnissä tutkimusprojekti hiilidioksidilla jälkihoidettavaan betoniin liittyen. Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella hiilidioksidilla jälkihoidetut betonituotteet ovat lujempia, niiden valmistus maksaa vähemmän sekä ne saavuttavat vaadittavan puristuslujuuden alle vuorokaudessa. Menetelmän etuna on lyhyemmän lujuudenkehitysajan ja pienempien ympäristövaikutusten lisäksi se, että prosessissa on mahdollista käyttää samoja raaka-aineita ja laitteistoja kuin tavallisen betonin valmistuksessa. Lisäksi niiden valmistus säästää tavallisen betonin valmistukseen vaadittavan makean veden. (Solidia) Tutkimuksen menetelmä soveltuu kuitenkin ainoastaan betonielementeille, sillä se vaatii

erityislaatuisia jälkihoitokammioita (CEMBUREAU 2020, s. 29). Betonin kovettamiseen hiilidioksidilla olisi mahdollista käyttää sementin valmistuksessa syntyvää ja talteenotettua hiilidioksidia. Tällöin sementti- ja betonielementtitehtaiden sijainti lähekkäin tehostaisi prosessia. (Mattila 2020, s. 24)

5. YHTEENVETO

Rakennusten hiilijalanjäljen laskennassa otetaan huomioon elinkaaren kaikissa vaiheissa syntyvät päästöt tuotevaiheesta rakennuksen purkuvaiheeseen. Hiilijalanjäljen laskennassa määritetään tavoitetaso, joka pyritään alittamaan. Kun kaikkien elinkaaren aikaisten prosessien ja tuotteiden määrät kerrotaan niiden päästötiedoilla, saadaan rakennuksen lopullinen hiilijalanjälki, jonka tulee alittaa määritelty tavoitetaso. Käyttövaiheessa syntyvien päästöjen pienentyessä muiden elinkaaren vaiheiden aikana syntyvien päästöjen suhteellinen osuus kasvaa. Elinkaaren aikana syntyvistä päästöistä suurimman kokonaisuuden käyttövaiheen jälkeen muodostaa tuotevaihe, eli raaka-aineiden hankinta, kuljetus ja rakennusmateriaalien valmistus. Sen vuoksi rakennusmateriaalien valmistuksesta aiheutuvien päästöjen vähentäminen on tärkeä kokonaisuus ympäristön kannalta. Rakennuksen hiilijalanjälkeä voidaan pienentää esimerkiksi valitsemalla vähähiilisiä materiaaleja tai optimoimalla materiaalien käyttöä.

Betonin valmistus aiheuttaa vuosittain paljon kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä selittyy osittain jo sillä, että betonin valmistusmäärät ovat valtavia. Suurin osa betonin valmistuksen päästöistä syntyy sementin valmistuksesta, minkä seurauksena sementin valmistuksen päästöjen vähentäminen on tärkeää. Tarkasteltaessa betonin valmistuksesta aiheutuvia päästöjä on hyvä huomioida, että betonilla on suurten päästöjen lisäksi monia hyviä ominaisuuksia, jotka näkyvät sen hiilikädenjäljessä. Betonirakenteet ovat pitkäikäisiä ja vaativat vähän huoltoa sekä niiden massiivisuus parantaa lämpöoloja, mikä näkyy niiden elinkaaren muiden vaiheiden hiilijalanjäljessä. Betonin käytöllä on mahdollista saavuttaa myös positiivisia ympäristövaikutuksia esimerkiksi uusiutuvan energian tuotannossa. Lisäksi betoni sitoo itseensä hiilidioksidia elinkaarensa aikana. Näitä ei kuitenkaan huomioida hiilijalanjälkitarkasteluissa.

Sementin valmistuksen päästöt ovat viime vuosikymmenien aikana vähentyneet, mikä selittyy muun muassa energiatehokkuuden parantumisella sekä fossiilisten polttoaineiden korvaamisella kierrätyspolttoaineilla. Sementtiuunien energiatehokkuutta sekä kierrätyspolttoaineiden käyttöä on mahdollista vielä lisätä. Nämä eivät kuitenkaan pelkää riittä, sillä sementin valmistuksessa sen raaka-aineen, eli kalkkikiven, osuus päästöistä on merkittävä. Suurin haaste onkin vähentää kalkkikiven kalsinointireaktiossa syntyviä päästöjä. Reaktio on oleellinen sementin valmistuksen kannalta ja aiheuttaa noin 60 % syntyvistä päästöistä. Raaka-aineista peräisin oleviin päästöihin on mahdollista vaikuttaa seostamalla sekä hiilidioksidin talteenottoteknologioilla.

Sementin seostamisella pyritään vähentämään sementtiklinkkerin määrää lopputuotteessa. Se on tehokas keino vähentää sementin valmistuksessa syntyviä päästöjä, sillä klinkkerimäärän vähentäminen vaikuttaa suoraan sementin hiilidioksidipäästöihin. Seosaineita voidaan lisätä raakajauheeseen ennen klinkkerin valmistusta, sementin jauhatusvaiheessa tai betoniasemalla. Raakajauheessa kalkkikiveä on mahdollista korvata suhteellisen pieni määrä seosaineilla, mutta sementin jauhatusvaiheessa voidaan seosaineita käyttää runsaammin. Seosaineista masuunikuona on yksi potentiaalisimmista vaihtoehtoista, sillä sen käyttö vähentää tehokkaasti hiilidioksidipäästöjä ja se antaa betonille monia hyviä ominaisuuksia.

Sementin seostamisen yhtenä suurimpana haasteena on määräysten ja standardien asettamat rajoitteet. Runsaasti seosaineita sisältävien sementtien käyttö ei ole sallittua kaikissa rasisluokissa ja etenkin sääle alltiissa rakenteissa niiden käyttö on mahdollista. Lisäksi seosaineiden saatavuus saattaa muodostua ongelmaksi. Perinteisten seosaineiden korvaaminen uusilla vaihtoehtoisilla seosaineilla saattaa helpottaa seosaineiden saatavuusongelmaa sekä vähentää hiilidioksidipäästöjä. Myös sementtiä korvaavien sideaineiden käytöllä on mahdollista vähentää hiilidioksidipäästöjä. Sementin suurien valmistusvolyymien takia minkään yksittäisen seosaineen tai sideaineen käytöllä tuskin on mahdollista ratkaista sementin valmistuksesta syntyviä päästöjä.

Tehokkain ja kallein keino sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi on hiilidioksidin talteenotto ja -varastointi tai hyötykäyttö. Sen avulla sementin valmistuksesta on mahdollista tehdä hiilineutraalia. Suomessa hyötykäyttö saattaisi olla varastointia potentiaalisempi vaihtoehto geologisten varastointikohteiden puuttuessa. Talteenotettua hiilidioksidia voitaisiin hyödyntää esimerkiksi synteettisen polttoaineen valmistuksessa, mutta menetelmän suurimpana esteenä on tällä hetkellä lainsäädäntö. Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö ei ole kuitenkaan täysin ongelmaton, sillä se edellyttää suuria investointeja, uudenlaisen infrastruktuurin rakentamista ja lisää tutkimustyötä.

Betonimassan osalta päästöjä on mahdollista vähentää etenkin suunnitteluvaiheessa. Tämä edellyttää parempaa rakenteiden lujuuden ja massojen optimointia sekä seostettujen sementtityyppien käyttöä mahdollisuuksien mukaan. Tavoiteltaessa suuria päästövähennyksiä yhtenä ratkaisuna ovat tulevaisuuden innovaatiot, kuten hiilidioksidikövettyvä betoni. Jos sementin valmistuksessa talteenotettua hiilidioksidia hyödynnettäisiin seostetun sementin lisäksi betonirakenteiden jälkihoidossa, päästöjä olisi mahdollista vähentää merkittävästi. Haasteena on kuitenkin pitkät kuljetusmatkat sementti- ja betonielementtitehtaiden sekä työmaan välillä, jolloin kuljetusten osuus hiilijalanjäljestä kasvaisi ja vähentäisi saavutettuja päästövähennyksiä.

On hyvä huomata, että työssä tarkasteltiin tarkemmin vain sementin valmistuksesta syntyviä päästöjä. Päästöjä syntyy myös esimerkiksi betonin valmistusvaiheessa sekä kuljetuksista ja raudotteista. Tämä tarkoittaa, että vähähiilisen tai hiilineutraalin betonin valmistaminen edellyttää toimia sementin valmistuksen lisäksi myös betonimassan valmistuksessa sekä rakentamisessa. Haasteeksi suurien päästövähennyksien saavuttamisessa ovat eri menetelmien suurten kustannusten lisäksi vihreiden tuotteiden kysyntä. Vaikka teknisesti vähähiilistä betonia olisi mahdollista valmistaa, sen käyttökohteet rajoittavat sen kysyntää. Lisäksi sementin valmistuksen päästövähennyksillä on yhteys sementin hintaan, joka vaikuttaa myös betonin hintaan. Tällä on varmasti vaikutusta tuotteiden kysyntään. Betonin valmistuksen päästöjen vähentäminen edellyttää siis monien eri osapuolten välistä yhteistyötä sekä lainsäädännöllistä ohjausta.

LÄHTEET

Betoni a. Betoni ja ympäristö. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.3.2021): <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-ja-ymparisto/>

Betoni b. Sementti ja kasvihuonekaasupäästöt. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.4.2021): <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>

BIBM (2021). The little green book of concrete. Sustainable construction with precast concrete. Federation of the European Precast Concrete Industry. Belgium. 174 p. Saatavissa (viitattu 19.4.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/04/The-Little-Green-Book-of-Concrete-2021.pdf>

Bionova Oy (2017). Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. Ympäristöministeriö. 72 s. Saatavissa (viitattu 28.1.2021): <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Birgisdottir, H. & Nygaard Rasmussen, F. (2016). Introduction to LCA of buildings. Danish Transport and Construction Agency. 17 p. Saatavissa (viitattu 2.2.2021): <https://www.trafikstyrelsen.dk/en/Construction/Lists/Publication-list?theme=Sustainable-construction>

BY201 (2018). Betonitekniikan oppikirja. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 568 s.

BY65 (2016). Betoninormit. Suomen betoniyhdistys ry. Helsinki. 164 s.

Cembureau (2020). Cementing the European Green Deal. The European Cement Association. 36 p. Saatavissa (viitattu 13.4.2021): http://www.cembureau.eu/media/kuxd32qi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf

Finnsementti (2019). Masuunikuonajauhe KJ400. Saatavissa (viitattu 20.4.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe_KJ400.pdf

Finnsementti (2021). Suomalaista sementtiä 100 vuotta. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.4.2021): <https://finnsementti.fi/yritys/historia/>

Finnsementti (2020). Ympäristöraportti 2020. 29 s. Saatavissa (viitattu 11.3.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Finnsementti_ymparistoraportti_2020.pdf

GBC Finland (2020). Vähähiilisuuden sanakirja -vähähiilisen rakentamisen ja kiinteistöliiketoiminnan terminologia. Green Building Council Finland. 8 s. Saatavissa (viitattu 25.3.2021): <https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/GBC-V%C3%A4h%C3%A4hiilisyys-sanakirja-27.5.2020.pdf>

Hashem, F.S., Razek, T.A. & Mashout, H.A. (2019). Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry. Construction and Building Materials. Volume 212. pp. 275-282. Saatavissa (viitattu 15.4.2021): <https://www.sciencedirect.com.lib-proxy.tuni.fi/science/article/pii/S0950061819308153>

Hawileh, R.A., Abdalla, J.A., Fardmanesh, F., Shahsana, P. & Khalili, A. (2017). Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement. Archives of civil and mechanical engineering 17. pp. 511–517. Saatavissa (viitattu 20.4.2021):

Hirvonen, J., Mäkikouri, S. & Vehmas, T. (2019). Muutetaan betonin ongelmat ratkaisuiksi. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.4.2021): <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/muutetaan-betonin-ongelmat-ratkaisuiksi>

Häkkinen, T. & Kuittinen, M. (2020). Kohti vähähiillistä rakentamista. Rakennustieto Oy. 192 s.

Härkönen, T. (2020). Uudet materiaalit käyttöön hiilipihissä rakentamisessa. Betoni-lehti 1/2020. Saatavissa (viitattu 22.4.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/03/Betoni-1-2020-KOKO-lehti-1.pdf>

Kekkonen, T. (2021). Suomen betonikanta sitoo n. 5,2 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Concrete Solution. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): <https://concretesolution.fi/suomen-betonikanta-sitoo-n-52-miljoonaa-tonnia-hiilidioksidia/>

Kuittinen, M. (toim.) (2019). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. 54 s. Saatavissa (viitattu 28.1.2021): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

LEILAC. The core technology – Direct Separation. Low Emissions Intensity Lime And Cement. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.4.2021): <https://www.project-leilac.eu/the-core-technology>

Leveelahti, U. (12.4.2021). Ympäristöpäällikkö, Finnsementti Oy. Teams-haastattelu.

Lujabetoni. Lujabetonin hiilineutraali valmisbetoni. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.4.2021): <https://www.lujabetoni.fi/tuotteet/valmisbetonit/kompensoitubetoni/>

Lumme, P. (2012). Otetaanko rakennusmateriaalien päästöt oikeasti huomioon rakentamisessa? Betoni-lehti 1/2012. Saatavissa (viitattu 19.3.2021): <https://betoni.com/betoni-lehti/12012/>

Mattila, J. (2015) Betoni ja ympäristö. Rakentajain kalenteri 2015. Saatavissa (viitattu 19.3.2021): <https://www.rakennustieto.fi/kortistot/rk/fi/index/artikkeliarkisto/tuotteet.html.stx>

Mattila, V. V. (2020). Kohti hiilineutraalia betonia. Sementti-lehti 2/2020. Saatavissa (viitattu 10.4.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_2-2020.pdf

Mattila, V. V. (2019). Kädenjälki jalanjäljen rinnalle. Sementti-lehti 1/2019. Saatavissa (viitattu 12.3.2021): https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_1_19.pdf

Mindess, S. & Aitcin, P.C. (2011). Sustainability of Concrete. Taylor & Francis Group. 328 p.

Nhuchhen, D.R., Sit, S.P. & Layzell, D.B. (2021) Alternative fuels co-fired with natural gas in the pre-calciner of a cement plant: Energy and material flows. Fuel, Volume 295.

16 p. Saatavissa (viitattu 15.4.2021): <https://www.sciencedirect.com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0016236121004208>

Norcem. CCS at Norcem Brevik: Background. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.4.2021): <https://www.norcem.no/en/CCS%20at%20Brevik>

Oulun Yliopisto (2019). Ennätysluja ekobetoni kehitetty Oulun yliopistossa. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.4.2021): <https://www oulu.fi/yliopisto/node/56919>

Pajula, T., Vatanen, S., Pihkola, H., Grönman, K., Kasurinen, H. & Soukka, R. (2018). Carbon Handprint Guide. VTT Technical Research Centre of Finland. 25 p. Saatavissa (viitattu 10.3.2021): https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/22508565/Carbon_Handprint_Guide.pdf

Parma (2020). Consolis Parmalta vähähiilinen laattatuotesarja. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.4.2021): <https://parma.fi/consolis-parmalta-vahahiilinen-laattatuotesarja/>

Pasanen, P., Bruce, T. & Sipari, A. (2012). Ympäristöystävällisen kivitalon suunnittelu ja toteutus. Bionova Oy. Saatavissa (viitattu 11.4.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Ymp%C3%A4rist%C3%B6yst%C3%A4v%C3%A4llisen-kivitalon-suunnittelu-ja-toteutus.pdf>

Rakennustarkastusyhdistys RTY (2016). Tiekartta rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen vähentämiseksi valmisteilla. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.2.2021): <https://www.rakennustarkastusyhdistysry.fi/%E2%80%8E/uutiset.html?a100=73264>

Ruokonen, S. (12.4.2021). Asiakastukipäällikkö, Finnsementti Oy. Teams-haastattelu.

Salminen, E. (2021). Suomalaisen betonin hiilijalanjälki. Betoni-lehti 1/2021. Saatavissa (viitattu 25.3.2021): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/03/Betoni-1-2021-KOKO-LEHTI.pdf>

SFS 7022:2019 (2019). Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki. 35 s.

SFS-EN 2016:2014 + A2:2021:en (2021). Concrete. Specification, performance, production and conformity. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki. 89 p.

SFS-EN 197-1 (2012). Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki. 35 s.

SFS-EN 15643-2 (2012). Sustainability of construction works. Assessment of buildings. Part 2: Framework for the assessment of environmental performance. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki. 32 p.

SFS-EN 15978 (2012). Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. Suomen Standardisoimisliitto. Helsinki. 60 p.

Solidia. Solutions. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.4.2021): <https://www.solidiatech.com/solutions.html>

Teir, S., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. & Aatos, S. (2011). Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). VTT. 103 s. Saatavissa (viitattu:)

17.4.2021): <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2011/W161.pdf>

Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J.R. & Comans, R.N.J. (2021). Evaluating Biomass Ash Properties as Influenced by Feedstock and Thermal Conversion Technology towards Cement Clinker Production with a Lower Carbon Footprint. Waste Biomass Valor. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01339-0>

Tulimaa, M., Wirtanen, L., Holt, E., Kukko, H. & Penttala, V. (2005). Ympäristöystävälliset ja hyvin säilyvät betonit. Helsinki University of Technology. Teknillinen korkeakoulu: Rakennusmateriaalitekniikan laboratorio. Julkaisu Vol. 18.

Ympäristöministeriö (2021). Rakentamisen päästöjä voidaan nyt vertailla – uusi päästötietokanta luo perustan vähähiilisen rakentamisen säädösohjaukselle. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.3.2021): <https://ym.fi/-/rakentamisen-paastoja-voidaan-nyt-vertailla-uusi-paastotietokanta-luo-perustan-vahahiilisen-rakentamisen-saadsohjaukselle>

Ympäristöministeriö. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.3.2021): <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Zieri, W. & Ismail, I. (2019). Alternative Fuels from Waste Products in Cement Industry. Handbook of Ecomaterials. Cham: Springer International Publishing. pp. 1183–1206.

LIITE A: HAASTATTELURAPORTTI

Paikka ja aika: Teams-ympäristössä 12.4.2021

Haastattelija: Anne Myllylä

Haastateltavina: Finnsementti Oy:n ympäristöpäällikkö Ulla Leveelahti, asiakastukipäällikkö Sini Ruukonen

1. Minkä verran on mahdollista lisätä seosaineiden käyttöä sementin valmistuksessa verrattuna tämän hetken seossementteihin, kuten Oiva-sementtiin? Kuinka suuri vaikutus sementin hiilidioksidipäästöihin voidaan saavuttaa seostamalla?

Ruukosen mukaan tällä hetkellä Finnsementin myydyin tuote on CEM II/B-M, jossa seosaineiden määrä on standardin EN 197-1 mukaan 21 – 35 %. Leveelahti esittää, että seostettujen sementtien valmistaminen on teknisesti mahdollista ja Finnsementti onkin tuomassa markkinoille nykyisiä sementtejä seostetun CEM III tyyppin sementin. Korkean seostussuhteen sementtien haasteena on kuitenkin niiden rajatut käyttökohteet ja asiakkaiden vaatimukset, Leveelahti kertoo.

Leveelahti kertoo, että sementin seostamisessa käytettävät seosaineet, kuten lentotuhka ja kuona, luokitellaan sivutuotteiksi ja niiden päästöt otetaan huomioon sivutuotteita muodostavassa alkuperäisessä prosessissa. Koska sementin valmistuksessa hiilidioksidipäästöt muodostuvat pääosin klinkkerin valmistuksesta, Leveelahden mukaan sementin seostamisella voidaan vaikuttaa suoraan hiilidioksidipäästöjen määrään. Leveelahden mukaan yhtenä sementin seostamisen haasteena voi olla seosaineiden saatavuus. Hänen mukaansa uusia mahdollisia sementin seostamiseen sopivia seosaineita, kuten kalsinoituja savia, tutkitaan. Ruukosen mukaan uusien sivutuotteiden käyttöönotossa haasteena on myös niiden saatavuus. Lisäksi uusien sivutuotteiden käyttöä hankaloittaa usein niiden käsiteltävyys, ennakoimaton käyttäytyminen lopputuotteessa sekä mahdollisesti pitkät kuljetusmatkat, Leveelahti kertoo. Leveelahti tuo esille myös, että betonin pitkän käyttöiän saavuttamiseksi uusien seosaineiden käyttö edellyttää myös pitkää tutkimustyötä. Ruukonen mainitsee, että voimakas seosaineiden käyttö hidastaa betonin lujudenkehitystä, mikä pidentää työmaiden aikatauluja. Myös ympäristön olosuhteilla on seosaineiden käytön kannalta merkitystä ja esimerkiksi Suomen talviolosuhteissa lujuden kehityksen hidastuminen vielä korostuisi, Leveelahti mainitsee.

2. Onko Suomessa hiilidioksidin talteenotto kalsinointireaktion aikana mahdollista? Mitä esteitä tai haasteita talteenotolle on (esimerkiksi tekniset/taloudelliset)?

Leveelahti kertoo, että hiilidioksidin talteenoton mahdollistava teknologia on suhteellisen uutta ja esimerkiksi talteen otetun hiilidioksidin kuljettamiseen vaadittava infrastruktuuri ja lopullinen sijoituskohte tai käyttötapa aiheuttavat vielä haasteita. Leveelahti tuo myös esille, että Suomessa yhtenä hiilidioksidin varastoinnin ongelmana on myös sopivien geologisten varastointikohteiden puuttuminen. Pysyvän varastoinnin vaihtoehtona on Suomessa sen sijaan tutkittu hiilidioksidin sitomista mineraaliin, Leveelahti kertoo. Haasteeksi tässä menetelmässä muodostuu hiilidioksidin sitomiseen vaadittava suuri kiviainemäärä ja sen lopullinen käyttökohte, Leveelahti selittää.

Leveelahden mukaan Suomessa potentiaalisena vaihtoehtona hiilidioksidin varastoinnin sijaan voisi olla hiilidioksidin hyötykäyttö synteettisen polttoaineen valmistamisessa, jossa polttoaineen toisena raaka-aineena olisi Kemiran tehtaalla syntyvä ylijäämävyty. Leveelahti mainitsee, että hiilidioksidin hyötykäyttöä synteettisen polttoaineen valmistamisessa hankaloittaa lainsäädäntö, joka ei tulkitse polttoaineen olevan päästöntä, sillä sen valmistamiseen tarvittava vety on fossiilista alkuperää.

Taloudellisena haasteena hiilidioksidin talteenotolle on sen suuri kustannus, joka muodostuu tutkimustyöstä, investointikustannuksista sekä käyttökustannuksista, Leveelahti mainitsee. Leveelahti kertoo, että käyttökustannuksia syntyy talteenoton aikana esimerkiksi prosessissa tarvittavista kemikaaleista ja energiasta. Kustannukset tulevat vaikuttamaan myös sementin hintaan, jonka Leveelahti arvioi nousevan vähintään 60 %. Hänen mukaansa yksi haaste on sen myötä vihreiden tuotteiden kysyntä. Leveelahti tuo esille myös, että hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö tai varastoiminen on suuri hanke, joten se edellyttää esimerkiksi monien toimijoiden yhteistyötä sekä lainsäädännöllistä ohjausta.

3. Onko kehitteillä mahdollisia muita keinoja kalkkikiven kalsinointireaktion päästöjen vähentämiseksi?

Leveelahden mukaan kalsinointireaktion päästöjen vähentämiseksi tutkitaan mahdollisuuksia, joissa joko kalsiumoksidin määrää voitaisiin hieman pienentää tai käyttää yhdisteitä, joissa kalsiumoksidi ei olisi sitoutunut karbonaattiin. Kalkkikiven korvaaminen ei kuitenkaan suurissa määrin ole mahdollista, joten suuria päästövähennyksiä ei kalkkikiven korvaamisella ole kuitenkaan saavutettavissa, Leveelahti kertoo.

4. Onko fossiilisten polttoaineiden palamisesta syntyviä päästöjä mahdollista pienentää? Kuinka paljon tällä hetkellä on mahdollista lisätä kierrätyspolttoaineiden käyttöä ja mitä esteitä kierrätyspolttoaineiden käytön lisäämisessä on?

Leveelahden mukaan sementtiuunien energiatehokkuuden parantamiseksi tehdään tutkimustyötä liittyen matalalämpötilaklinkkeriin, jossa tutkitaan klinkkerin valmistusmahdollisuutta matalammassa lämpötilassa, jolloin energiaa kuluu vähemmän. Lisäksi Finnsementti tutkii Paraisten tehtaalle energiatehokkuutta parantavaa muutosmahdollisuutta, joka mahdollistaisi fossiilisten polttoaineiden päästöjen vähentämisen ja hukkalämmön tehokkaamman talteenottamisen, Leveelahti kertoo. Leveelahti kertoo, että Suomen sementtitehtaat sijoittuvat eurooppalaisessa vertailussa hyvin, kun verrataan klinkkerin ominaispäästöjä.

Leveelahti esittää, että esimerkiksi Lappeenrannan tehtaalla, jossa on kierrätyspolttoaineiden polttamiseen hyvin soveltuva kalsinaattoriuuni, teknisesti kierrätyspolttoaineiden osuus polttoaineesta voisi olla jopa 100 %. Kierrätyspolttoaineiden käytön yhtenä haasteena on sopivien polttoainemateriaalien löytäminen, jotka täyttävät vaatimukset esimerkiksi tasalaatuisuudesta sekä riittävän korkeasta lämpöarvosta, Leveelahti kertoo. Leveelahden mukaan käyttöä rajoittaa myös Suomen lainsäädäntö, jossa on muista Euroopan maista poiketen määriteltä, että vaaralliseksi luokiteltavia jätteitä ei saa polttaa sementtiuunissa. Leveelahden mukaan Euroopasta on saatavilla paljon käyttökokemuksia kyseisten polttoaineiden polttamisesta ja on todettu niiden palavan jopa puhtaammin sementtiuunissa. Leveelahti mainitsee, että ainoastaan biopolttoaineita käyttämällä ei pystytä täyttämään uunien energiatarvetta, mikä johtuu biopolttoaineiden saatavuudesta.

5. Mitä päästövähennystavoitteita Finnsementti Oy:llä on ja millä aikataululla?

Leveelahti kertoo Finnsementin päästövähennystavoitteiden noudattavan eurooppalaisen tiekartan päästövähennystavoitteita, joiden mukaan sementin koko arvoketju olisi hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi Finnsementillä on konsernitason hiilidioksidipäästövähennystavoitteita, joiden saavuttamista viedään eteenpäin erilaisilla hankkeilla, Leveelahti kertoo. Leveelahden mukaan hiilidioksidipäästöjen väheneminen riippuu kuitenkin myös markkinoista ja asiakkaiden valmiudesta siirtyä esimerkiksi seostetumpien sementtien käyttämiseen. Hiilineutraalin sementin valmistaminen edellyttää hiilidioksidin talteenottoa, kertoo Leveelahti. Hänen mukaansa sementin arvoketjun hiili-

neutraalius vuoteen 2050 mennessä on kuitenkin realistinen tavoite. Leveelahti muistuttaa, että sementtiteollisuus on kuitenkin vain yksi osa sementin arvoketjussa, joten tavoitteen saavuttaminen vaikuttaa toimia kaikissa arvoketjun osissa.