

Anne Pitkänen

KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN ASUINKERROSTALON BETONIRUNGOSSA

Diplomityö
Rakennettu ympäristö
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Anne Pitkänen: Kasvihuonepäästöjen vähentäminen asuinkerrostalon betonirungossa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Vastuuohjaaja ja tarkastaja: Professori Kalle Kähkönen
Tarkastaja: Väitöskirjatutkija Ulrika Uotila
Huhtikuu 2021

Rakennusmateriaalien merkitys rakennetun ympäristön aiheuttamista kasvihuonepäästöistä tunnetaan yleisellä tasolla. Materiaalien ja tuotteiden osuus tulee tulevaisuudessa vain kasvaamaan koko hankkeen elinkaarenaikaisissa kasvihuonepäästöissä, kun käytönaikaisia päästöjä saadaan vähennettyä. Vastuu materiaalipäästöjen vähentämisestä kuuluu kaikille alan toimijoille, ei vain materiaaltoimittajille. Suunnittelijat ja urakoitsijat voivat omilla valinnoillaan edesauttaa vähähiilisten tuotteiden ja ratkaisuiden päätymistä pysyvään tuotantoon.

Terästä sisältävien betonirakenneseosten osuus asuinkerrostalon päästöissä on merkittävä, joten tutkimus oli luonnollista rajata käsittelemään näitä materiaaleja. Työn tavoitteena oli selvittää asuinkerrostalon vaakarakenteiden kasvihuonepäästöjä. Työssä huomioitiin myös eri ratkaisuiden kustannus- ja aikatauluvaikutukset. Tutkimuksessa tarkasteltiin vain sellaisia rakennusratkaisuja, jotka on mahdollista toteuttaa tämänhetkisin tiedoilla ja olosuhteilla.

Laskelmissa käytettiin todellisen kohteen määriä ja suunnitelmia sekä kohdeyrityksen tavallisia rakennusratkaisuja. Vertailtavat rakenteet olivat ontelolaatta ja paikalla valettava välipohja. Tutkimuksessa vertailtiin perinteisiä ratkaisuja sekä näiden vähähiilisempiä versioita. Ontelolaatoista on olemassa markkinoilla vähähiilisempi tuote ja paikalla valettavassa välipohjassa voidaan hyödyntää vihreää betonia, jonka kasvihuonepäästöt ovat perinteistä betonia pienemmät.

Tarkasteluajanjakso eri ratkaisuiden kasvihuonepäästöille oli tuotevaihe A1-A3. Ontelolaattarakenteisen välipohjan kasvihuonepäästöt ovat 0,9 prosenttia pienemmät kuin paikalla valetun välipohjan. Vähähiilisen ontelolaattavälipohjan päästövähennyksiä saatiin 5,9 % verrattuna perinteiseen ontelolaattaan.

Ontelolaattarakenteinen välipohja on tutkimuksen tulosten mukaan 15,2 % halvempi ratkaisu kuin paikalla valettu välipohjalaatta. Kustannuksissa on huomioitu työ, materiaali ja jälkivalut tai -tuenta. Jos perinteiset ontelolaatat vaihdetaan vähähiilisiin versioihin välipohjissa, kustannukset nousevat 4,2 prosenttia. Työssä tutkittiin myös tapausta, jossa kohteen kaikki ontelolaatat ovat vähemmän ympäristöä kuormittavia.

Paikalla valettavassa välipohjassa voidaan käyttää vähähiilisempää betonia, jolloin puristuslujuuden kehittyminen on hitaampaa kuin tavallisella betonilla valettaessa. Betonin päästöjen pienentyessä 20 %, muotipurkulujuuden kehittyminen vaatii yhden päivän enemmän tavalliseen betoniin verrattuna. Runkoaikataulun pidentyminen aiheuttaa myös välillisten kustannusten nousua. Työmaatoiminnot, toimihenkilöt ja työkonet kuten torninosturi vaaditaan koko runkoasennuksen ajaksi.

Tutkimuksessa saadut tulokset koetaan hyödylliseksi käytännöllisyyden kannalta. Vertailtavat ratkaisut ovat todellisia tuotteita. Vähähiilisistä ontelolaatoista on saatu myös käytännön kokemusta, joka vahvistaa uuden tuotteen laskennallisesti mallinnetut päästövähennykset. Päästövähennysten lisäksi tuote sopii aikataullisten vaatimusten takia, sillä ratkaisu tukee rakennustyömaan läpimenoajan lyhennystrendiä.

Vähähiilisten ratkaisuiden merkitys rakennusalan kehitykselle on huomattava. Tutkimus rajattiin suppealle alueelle asuinkerrostalon rakenneosissa, mutta kasvihuonepäästöjen vähentäminen on tulevaisuudessa osa jokaista suunniteltua ratkaisua ja käytettyä rakennusmateriaalia.

Avainsanat: rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöt, vähähiilinen rakentaminen, ontelolaattavälipohja, paikalla valettu välipohja

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Anne Pitkänen: Reducing greenhouse emissions in the concrete frame of a residential apartment building
Master's thesis
Tampere University
Degree Program in Civil Engineering
April 2021

Share of building materials in the greenhouse emissions is recognized in the built environment. The share of materials and products will only increase in the future as entire greenhouse emissions in the project lifecycle, when using emissions are reduced. Responsibility for reducing material emissions falls to all industry operations, not just material suppliers. Designers and contractors can use their own choices contribute to low-carbon products and solutions ending up in permanent production.

The proportion of concrete components containing steel in the emissions of residential apartment building is significant, so the research was natural to narrow down to dealing with these materials. The goal of the work was to find out greenhouse emissions of horizontal structures of a residential apartment building and note the cost and scheduling impact of various solutions. The aim of the study was to discover and explore solutions, which are possible to implement with current data.

The calculations used the quantities and plans of actual object as well as the common structural solutions of the target company. The structures to be compared were the cavity slab and the site cast midsole as well as low-carbon versions of these. Greenhouse emissions of the cavity slab structure were 0,9 per cent lower than the spot cast midbase, when the product phase A1-A3 was used during the period considered. The emission reduction of the low carbon cavity slab base was given as 5,9 per cent compared to traditional cavity slab.

The intermediate base of the cavity slab is according to the result of the study 15,2 % cheaper solution than spot molded intermediate slab. Costs include work, material and residual or support. If traditional cavity tiles are switched to low-carbon versions in the intermediate soles, increases the cost by 4,2 percent. The work also investigates the case of all cavity tiles are less environmental laden.

A spot on the molded midbase can be used lower carbon concrete when development of compressive strength is slower than with ordinary concrete. With a 20 % reduction in concrete emissions, the development of mold discharge requires a day more compared to ordinary concrete. The lengthening of the frame schedule also causes increase in indirect costs. Site operations, staff members and working machinery as a tower crane is required for the entire frame installation.

Results obtained in the study are useful for practicality. The solutions to compare are real products. Low carbon cavity slabs have also gained practical experience, which confirms the new product computationally modelled emission reductions for the new product. In addition to emissions reductions, the product is suitable due to scheduling requirements, as the solution supports the shortening trend of turnaround time of the construction site.

The importance of low-carbon solutions for development in the construction sector is important. The study was limited to a narrow area in the structural parts of the residential apartment building but reducing greenhouse emissions will be a part of every planned solution and construction material used.

Keywords: greenhouse emissions of building materials, low carbon construction, cavity slab, spot cast midbase

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Ympäristöystävällisyys on osa lähes jokaista arkista toimintaamme. Rakennetun ympäristön osuus ilmastonmuutoksessa on merkittävä, joten konkreettisten vaihtoehtojen tutkiminen oli mielenkiintoinen projekti. Todelliset käyttökokemukset uusista tuotteista ja tutkimuksen tulosten hyödyntäminen yrityksen päätöksenteossa edesauttoi diplomityön valmiiksi saattamista nopealla aikataululla.

Haluan kiittää ystäviäni lukemattomista yhteisistä opiskelutunneista sekä kannustusviesteistä diplomityöhön. Erityiskiitos Inka, Arttu, Tiia-Lotta ja Suvi tuesta vaikeina hetkinä. Kiitos myös perheelleni, joka on auttanut läpi koulutaipaleen pitämällä huolta sekä henkisestä että fyysisestä hyvinvoinnista.

Kiitos Mika Toivonen, Johanna Avikainen, Elina Virolainen Jani Tuominen ja Lassi Hämälainen suunnattomasta tuesta, jota tarjositte läpi kirjoitusprosessin. Yrityksen ja ohjaajien kiinnostus aihetta kohtaan helpotti diplomityön kirjoitusprosessia huomattavasti. Kiitos myös vastuunohjaaja Kalle Kähkönen kommentteista ja avusta työn toteutuksessa.

Työ vähähiilisen rakentamisen parissa on vasta alkanut. Yhteistyöllä ja aidolla halulla kehitystyö tuottaa nopeasti hedelmää.

Helsingissä 27.4.2021

Anne Pitkänen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	2
1.3 Tutkimuksen rajaus	3
1.4 Tutkimuksen toteutus	4
2. RAKENNUSMATERIAALIEN AIHEUTTAMAT KASVIHUONEPÄÄSTÖT	6
2.1 Rakennuksen hiilijalanjälki	7
2.2 Ympäristöseloste EPD	9
2.3 Sementin valmistusprosessi ja sen vähentäminen	10
2.4 Sementin korvaaminen ja teknologia.....	13
2.5 Terästuotanto.....	14
2.6 Tuotteistus	15
2.7 Puurakentaminen.....	16
3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTOT.....	19
3.1 Kirjallisuuskatsaus ja aiemmat tutkimukset.....	19
3.2 Haastattelututkimus.....	19
3.3 Empiirinen tutkimus vaihtoehtoisista ratkaisuista.....	22
3.4 Kohdeyritys	23
3.5 Käsiteltävät rakenneosat ja tuotteet	23
4. HAASTATTELUIDEN TULOKSET	25
4.1 Haastatteluaineisto.....	25
4.2 Vähähiilinen rakentaminen	26
4.3 Valmisbetoni	28
4.4 Terästuotanto.....	29
4.5 Elementtirakentaminen	32
4.6 Suunnitteluratkaisuiden vaikutukset hiilijalanjälkeen.....	34
5. KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN SIMULOINTI	40
5.1 Simulointi One Click LCA-ohjelman avulla	40
5.2 Simuloitava kohde.....	42
5.3 Laskennassa tehdyt oletukset ja valinnat	43
5.4 Laskelman tulokset	45
5.5 Vaihtoehtoiset ratkaisut.....	48
6. AIKATAULU.....	52
6.1 Tahtituotanto.....	52
6.2 Haasteet betonin kuivumisessa ja lujuudenkehityksessä.....	53

7.KUSTANNUSVAIKUTUS	56
7.1 Uusien/ympäristöystävällisten materiaalien/tuotteiden kalleus	56
7.2 Välilliset kustannukset.....	58
7.3 Aikataulun vaikutus kustannuksiin	60
8.JOHTOPÄÄTÖKSET	62
8.1 Johtopäätökset.....	62
8.2 Tutkimuksen arviointi ja merkitys.....	63
8.3 Tulosten luotettavuus	64
8.4 Jatkotutkimus	65
LÄHTEET.....	67
LIITTEET.....	72

KUVALUETTELO

Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren aikaiset kasvihuonepäästöt.

Kuva 2: Tutkimusmenetelmät ja aiheen merkitys.

Kuva 3: Rakennuksen elinkaaren vaiheet.

Kuva 4. Mallikohteen koko elinkaaren päästösumma.

Kuva 5. Eri välipohjaratkaisuiden kasvihuonepäästöt tuotevaiheessa A1-A3.

Kuva 6. Välipohjaratkaisuiden päästöerot prosentuaalisesti tuotevaiheessa.

Kuva 7. Päästöerot ratkaisuille, joissa ympäristölle ystävällisempiä tuotteita on käytetty välipohjan lisäksi myös ala- ja yläpohjissa (A1-A3).

Kuva 8. Tahtituotantoaikataulu kohdeyrityksen todellisessa kohteessa.

Kuva 9. Lujuudenkehitys päivälämpötilan ollessa korkeimmillaan + 20 °C.

Kuva 10. Lujuudenkehitys päivälämpötilan ollessa korkeimmillaan + 10 °C.

Kuva 11. Eri välipohjaratkaisuiden kustannusvertailua.

Kuva 12. Välipohjaratkaisuiden kustannus- ja päästövertailua A1-A3 valmistusvaiheessa.

Kuva 13. Välipohjaratkaisuiden kustannus- ja päästövertailua prosentuaalisesti A1-A3 valmistusvaiheessa.

Kuva 14. Välipohjaratkaisuiden kustannusvertailu, jossa on huomioitu myös aikataulu.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelma

Tämän diplomityön aiheena on betonia sisältävien rakennusosien kehittäminen ja uusien vaihtoehtojen löytäminen kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi kerrostalorakentamisessa. Aihe on merkittävä, sillä rakentamisen aiheuttamat päästöt ovat maailmanlaajuisesti iso tekijä ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Olennaista on koko rakennuksen elinkaaren päästöjen pienentäminen, jossa huomioidaan rakentaminen, käyttö, purku ja kierrätys. Rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyneistä kasvihuonepäästöistä noin kolmannes syntyy rakennusmateriaalien raaka-aineiden hankinnan, materiaalin valmistuksen, kuljetuksen ja työmaatoimintojen seurauksena (Ruuska & Häkkinen 2013).

Kasvihuoneilmiön torjuminen on tullut osaksi arkipäiviämme. Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin eli IPCC:n asettama tavoite on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu 1,5 asteeseen. Tavoitteen pohjana toimii Pariisin ilmastosopimus, joka astui voimaan vuonna 2016. (Valtioneuvosto 2018) Suomen valtio on julkaissut vuonna 2020 uuden hallitusohjelman, jonka mukaan Suomi on hiilineutraali vuonna 2035. Hallitusohjelman kohdassa 3.1.1 otetaan kantaa asuntopolitiikkaan. Ensimmäinen tavoite käsittelee rakentamisen laadun parantamista ja hiilineutraalin rakentamisen tukemista. Maankäytön- ja rakennuslain uudistuksella voidaan vaikuttaa niin kaavoitukseen, rakentamiseen kuin rakennuskannan ylläpitoon. (Valtioneuvosto 2019)

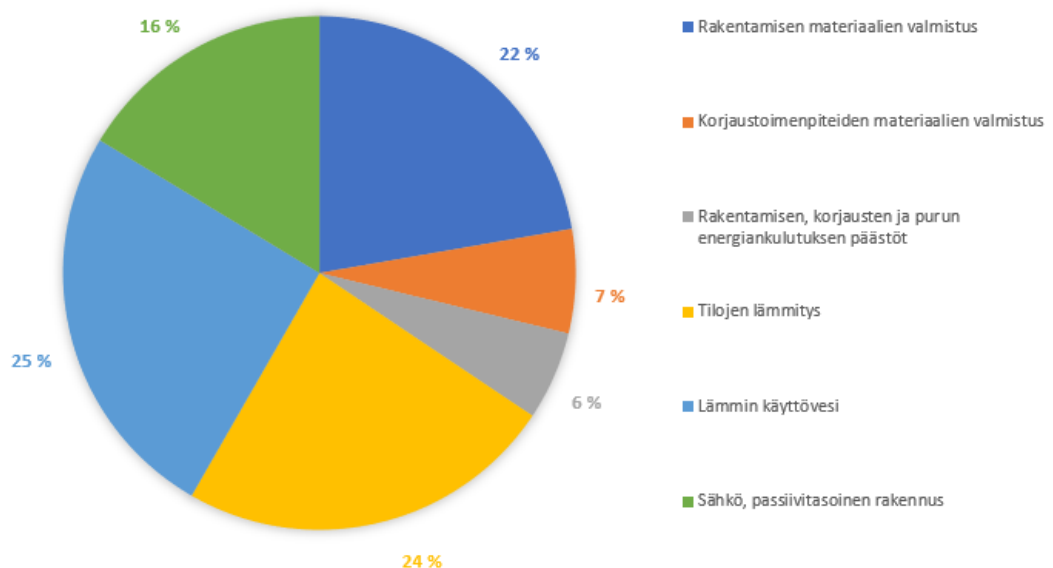
Monet kaupungit ovat julistaneet omat tavoitteensa. Muun muassa Helsingin kaupunki on julistanut olevansa hiilineutraali viimeistään vuonna 2035. Tavoitetta tukemaan valtio sekä Helsingin, Tampereen, Turun ja Oulun kaupunkiseudut solmivat MAL-sopimukset 8.10.2020. Pyrkimyksenä on lisätä asuntotuotantoa mainituilla alueilla kasvihuonepäästöt huomioiden. Hallitusohjelman lisäksi myös MAL-sopimukseen on kirjattu kannusteita puurakentamisen edistämiseen päästöjen valossa. (Ympäristöministeriö 2020b)

Puu- ja betonirakentamisen vertailua on jo suoritettu viime vuosina, josta hyvänä tuloksena on Helsingin Kuninkaantammen valmistunut hanke. Tutkimuksessa suunniteltiin ja toteutettiin kaksi lähes identtistä taloa vierekkäisille tonteille niin, että vain runkomateriaali vaihtui betonista puuhun. Huomioon otettiin koko rakennuksen elinkaari. Lopputuloksena todettiin puurakenteisen kerrostalon 100 vuoden elinkaaren aiheuttamien pääs-

töjen olevan 6 % pienemmät kuin perinteisen betonirakenteisen kerrostalon. Rakennusmateriaaleja vertaillaessa päästöissä oli 20 % ero puurakentamisen eduksi. (Helsinki 2017)

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Rakentamisen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä on viime vuosina tutkittu paljon niiden suuren vaikuttavuuden vuoksi. Kuvassa 1 on esitetty materiaalien osuus koko elinkaaren ajalta. Ympäristön kannalta saastuttavimmat materiaalit on tunnistettu ja niitä on pyritty kehittämään. Tutkimuksen tavoitteena on löytää ne rakenneratkaisut, joiden avulla pienennetään betonirunkoisen asuinkerrostalon aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Tarkemman tutkimuksen kohteena on betonia sisältävät rakenneosat, koska niiden osuus tavanomaisessa betonirunkoisessa asuinkerrostalon hiilidioksidipäästöistä on 50-60 % (Ruuska et al, 2013)



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren aikaiset kasvihuonepäästöt. (Mukaiillen lähde Ruuska et al, 2013, s. 32)

Työn tueksi on laadittu kolme tutkimuskysymystä:

1. Millaisilla rakenneratkaisuilla asuinkerrostalon hiilijalanjälkeä saadaan pienennettyä tehokkaimmin?
2. Miten näitä rakenneratkaisuja voidaan viedä asuntotuotannossa eteenpäin?
3. Miten uudet ratkaisut soveltuvat nykyiseen rakentamisajan lyhentämiseen pyrkivään tuotantoon?

Tutkimuksessa huomioidaan myös uusien ratkaisujen vaikutukset aikatauluun. Tahtituotanto ja muut läpimenoajan lyhentämiseen pyrkivät keinot ovat olleet pinnalla viime vuosina, joten ratkaisujen tulee olla aikataulullisesti mahdollisia kerrostalojen perustajaurakointiin. Uusia rakenneratkaisuja on päästy kokeilemaan pilottihankkeissa, joista saadaan arvokasta tietoa sekä urakoitsijalle että tuotetoimittajalle. Samalla on saatu ensimmäinen hinta vähähiilisille tuotteille. Kustannuksia tarkastellessa on muistettava niiden merkitys hankkeen kannattavuuteen ja sitä kautta esimerkiksi yrityksen sisäiseen käynnistyspäätökseen.

Ympäristölle ystävällisemmät ratkaisut ovat usein perinteisiä tuotteita kalliimpia, etenkin tuotteen volyymin ollessa alhainen. Kalliimpi rakenneosia voi tuottaa pidemmällä aikajännteellä suuremman rakennuksen arvon nousun kuin perinteisillä ratkaisuilla (Junnila 2019). Tutkimus tehdään yhteistyössä hankintatoimen kanssa, jolloin tavallisten rakennusosien markkinahinta on tiedossa. Kerrostalohankkeiden päästölaskenta on alkanut yrityksen asumisen liiketoimintayksikössä. Tavoitteena on luoda yritykselle hankkeiden suunnitteluun uusia vaihtoehtoja, joiden kustannukset ja vaikutus päästöihin on tiedossa.

1.3 Tutkimuksen rajaus

Diplomityö rajataan käsittelemään asuinkerrostalojen uudistuotantoa. Tarkemmin tutkimuksessa paneudutaan rakennushankkeen vaiheisiin A1-A3, joka käsittää materiaalin raaka-aineen hankinnasta, kuljetuksesta valmistukseen ja tuotteen valmistuksesta syntyvät kasvihuonepäästöt. Rakennusmateriaalien ja osien osuus asuinkerrostalon hiilijalanjäljessä tulee kasvamaan tulevaisuudessa, koska energiamuotojen kehitys pienentää käytönaikaisia päästöjä. Rakennusliikkeen näkökulmasta voimme vaikuttaa vain energiamuodon valintaan, jolloin tämä on luonnollista rajata tutkimuksen ulkopuolelle.

Asuinkerrostalo käsittää satoja erilaisia rakennusosia. Eri materiaalien valmistus kuormittaa ympäristöä eri tavoilla, riippuen muun muassa raaka-aineen kotimaisuudesta. Tuonti raaka-aineen kuljetuskustannukset ovat huomattavat, kun kotimaista raaka-ainetta saatetaan joutua käsittelemään paljon ennen hyödyntämistä. Tutkimuksen kannalta tärkeimmät rakenneosat ovat ontelolaatat ja paikalla valettava välipohjalaatta, sillä materiaalitasolla suurin menekki on betonilla ja terästuotteilla. Nykyisessä elementtirakentamisessa käytetään myös paljon valmisbetonia, joka on yksi tutkimuksen tärkeä osa. Sisäpuolisten rakenneosien osuus materiaalien päästöissä on verrattain hyvin pieni, jonka vuoksi niitä ei käsitellä tässä diplomityössä.

Tarkemman tarkastelun kohteena on betonirakenteet. Asuinkerrostalotuotanto on pääosin betonirunkoista, jota myös kohdeyritys suosii. Betonirunkoinen kerrostalo on pitkälle

elementtirakentamista, pois lukien paikalla valetut välipohjat. Tässä työssä perehdytään erityisesti ontelolaatta- ja paikallavaluvälipohjiin. Välipohjilla on suurin päästömäärä CO_2 -ekvivalenttitonneina, kun laskennassa on käytetty rakennusosien perustapauksia (Ruuska & Häkkinen 2013). Tarkempaan tarkasteluun valitut rakenneosat ovat myös yrityksen näkökulmasta kiinnostavat, sillä ne ovat iso kustannuserä kerrostalossa ja vaikuttavat osaltaan myös aikatauluun. Työn teoriassa ja asiantuntijahaastatteluissa tarkastellaan myös puurakentamista. Puuvälipohjia ei kuitenkaan mallinneta laskelmissa, sillä kohdeyritys vasta pilotoi puukerrostaloja.

1.4 Tutkimuksen toteutus

Diplomityö koostuu kirjallisuuskatsauksesta, haastatteluista ja laskentaosuudesta. Kuvassa 2 on esitetty tutkimuksen vaiheet. Kirjallisuuskatsauksen yhtenä tavoitteena on selvittää rakennuksen hiilijalanjäljen muodostuminen. Vähähiilisen rakentamisen yksi merkittävä osa-alue on EPD-ympäristöselosteet, joihin paneudutaan myös tarkemmin. Työ on rajattu käsittelemään asuinkerrostalon välipohjan betonirakenteita, jolloin tärkeimmät kirjallisuuskatsauksen materiaalit ovat betoni ja teräs. Koska tavoitteena on vähentää asuinkerrostalon hiilidioksidipäästöjä, kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan myös hieman puurakentamista.

Asiantuntijahaastatteluilla selvitetään vähähiilisen rakentamisen nykytilannetta ja tulevaisuuden mahdollisuuksia haastatteleamalla erilaisissa tehtävissä toimivia asiantuntijoita. Yksi työn kannalta tärkein osa-alue on materiaali- ja tuotetoimittajien tämän hetken tilanne vähähiilisen rakentamisen osalta.

Laskentaosuudessa selvitetään kohdeyrityksen mallikohteen hiilidioksidipäästöt. Mallikohteen välipohjarakenteiden hiilidioksidipäästöjä vertaillaan kolmeen erilaiseen välipohjaratkaisuun. Seuraavissa luvussa huomioidaan eri välipohjaratkaisuiden kustannukset ja aikatauluvaikutukset. Aikataulu ja kustannukset kulkevat osin käsi kädessä, joten näitä tarkastellaan myös yhdessä.

Tavoite

Kasvihuonepäästöjen vähentäminen betonirukoisessa asuinkerrostalossa

Tutkimuskysymykset

Millaisilla rakenneratkaisuilla betonirukoisen asuinkerrostalon hiilijalanjälkeä saadaan pienennettyä?

Miten näitä rakenneratkaisuja voidaan viedä asuntotuotannossa eteenpäin?

Miten nämä ratkaisut soveltuvat nykyiseen läpimenoajan lyhentämiseen tähtäävään asuintuotantoon?

Tutkimusmenetelmät**Tulokset**

Kuva 2. Tutkimusmenetelmät ja aiheen merkitys.

2. RAKENNUSMATERIAALIEN AIHEUTTAMAT KASVIHUONEPÄÄSTÖT

Rakennustyömaalla on käytössä satoja eri materiaaleista tehtyä tuotetta. Tutkimus on rajattu käsittelemään vain pientä osaa rakennustyömaan materiaaleista, mutta menekiltään suhteellisen suuria. Rakennusmateriaalien menekki ei lopu, kun asuinkerrostalo valmistuu. Rakennuksen hiilijalanjälki huomioi myös rakennuksen kunnossapidon aikana käytetyt materiaalit. Kappaleessa 2.1 tarkastellaan yksityiskohtaisemmin rakennuksen hiilijalanjäljen laskentaa.

Hiilijalanjäljen laskennan on pohjaututtava faktoihin. Yksi uusi tietolähde rakennusalalla on EPD -ympäristöselosteet, joiden sisältö pohjautuu standardien vaatimuksiin. Ympäristöselosteet ovat kolmannen osapuolen tarkastamia, joten eri tuotteiden EPD:t ovat vertailukelpoisia. Näitä käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan tärkeimpien rakennusmateriaalien ja niiden raaka-aineiden prosessointia. Betonirakenteet koostuvat betonista ja teräksestä. Betonia valmistetaan vedestä, kiviaineksesta ja sementistä. Sementin valmistus on merkittävä betonirakenteiden päästölähde, joten luvuissa 2.4 ja 2.5 käsitellään valmistusprosessia ja vaihtoehtoja sementin korvaamiseen sekä vähentämiseen teknologian avulla.

Terästuotanto on Suomessa yksi suurimpia yksittäisiä päästölähteitä. Kappaleessa tarkastellaan valmistusprosessia, kierrätystä ja tulevaisuuden teemoja terästuotannon ympärillä. Kohdeyrityksen vakioratkaisut eli tuotteistetut ratkaisut sisältävät aina saman määrän terästä ja betonia. Diplomityön laskelmissa hyödynnetään näitä organisaation käytössä olevia ratkaisuja.

Työn tavoitteena on vähentää betonirunkoisen asuinkerrostalon kasvihuonepäästöjä. Viimeisessä kappaleessa tarkastellaan puurakentamista, sillä yksi vaihtoehto asuintalon päästövähennykselle on korvata betonirakenteita puurakenteilla, jolla on huomattavasti pienemmät päästöt esimerkiksi tuotevaiheessa A1-A3. Puumateriaalin käytön lisääminen kotimaisessa rakentamisessa on osa nykyistä hallitusohjelmaa. Valtio myös tukee puurakentamista erilaisilla avustuksilla.

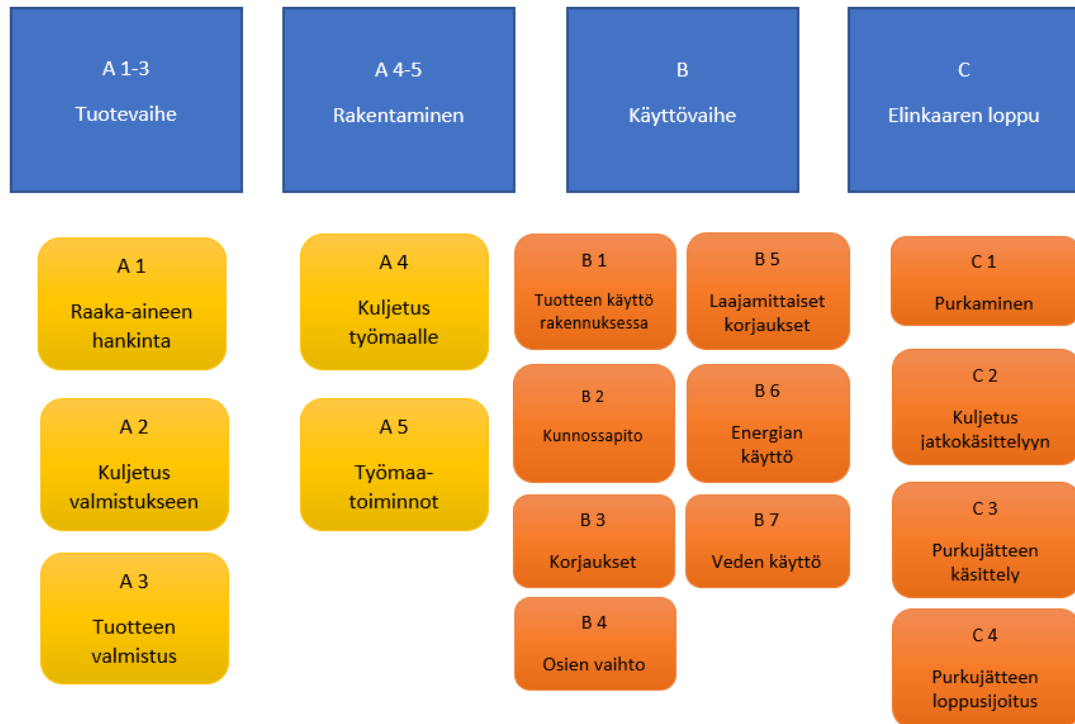
2.1 Rakennuksen hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljellä on monia määritelmiä, riippuen eri kasvihuonekaasujen huomioinnista, rajauksesta ja elinkaaren vaiheista. Pohjimmiltaan käsite perustuu elinkaariarviointiin ja ekologiseen jalanjälkeen. (Ympäristö 2013) Hiilineutraalilla rakennushankkeella tarkoitetaan hanketta, jossa koko elinkaaren hiilijalanjälki on 0. Hiilineutraali rakennuksen käyttö tarkoittaa rakennusta, jossa energian käytön hiilijalanjälki on 0. (Bruce-Hyrkäs 2020)

Rakennusten hiilidioksidipäästöille tullaan asettamaan raja-arvot ennen vuotta 2025. Uusi lainsäädäntö tulee kattamaan koko rakennuksen elinkaaren ajan. (Ympäristöministeriö 2020c). Toistaiseksi hiilijalanjäljen arviointi on pilotointivaiheessa ja laskentamenetelmää on testattu erilaisissa uudis- ja korjausrakentamisen hankkeissa. (Elinkaarilasenta 2020). Käytön aikainen energia on olennainen osa rakennusten hiilijalanjälkeä, joten tällä sektorilla on ryhdytty jo konkreettisiin tekoihin. Vuonna 2018 voimaan tulleiden uusien energiamääräysten myötä Suomen uudisrakentaminen on lähes nollaenergiatasolla. Ympäristöministeriö pyrkiikin uusilla säädöksillä pureutumaan ennen ja jälkeen rakennuksen käyttöä syntyviin hiilidioksidipäästöihin. Valtion hankinnoissa pyritään jatkossa suosimaan ympäristöä vähemmän kuormittavia vaihtoehtoja.

Elinkaaren vaiheet on määritelty standardissa EN 15643-2. Kuvassa 3 on esitetty rakennuksen elinkaaren eri vaiheet ympäristöministeriön määritelmän mukaan. Vaihe on isompi kokonaisuus ja voi sisältää useampia moduuleja. Tässä työssä käsitellään tuote- ja rakentamisvaihetta, joka sisältää moduulit A1-A5. Muut vaiheet ovat rakennuksen käyttövaihe B ja elinkaaren loppu C. Rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävät haitat ja hyödyt, joita ei tunnisteta tai osata luokitella, on luokiteltu vaiheeseen D.

Moduulit on luokiteltu seuraavasti: A1 käsittää rakennusmateriaalin raaka-aineen hankinnan, A2 raaka-aineen kuljetuksen ja A3 huomioi tuotteen valmistukseen liittyvät osat alueet. Rakentamisvaiheen moduulit A4 ja A5 käsittää materiaalin kuljetuksen työmaalle sekä työmaatoiminnot. Työmaatoiminnoilla tarkoitetaan tässä yhteydessä rakentamisen energiankulutusta, jätteiden syntyä ja niiden käsittelyä. (Ympäristöministeriö 2019).



Kuva 3. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (SFS-EN 15978:2012).

Elinkaariarviointia (LCA=Life Cycle Assessment) käytetään ihmisten ja esineiden aiheuttamien ympäristövaikutusten arvioitiin, sillä se ottaa huomioon sekä suorat että epäsuorat vaikutukset (Säynäjoki et al. 2011, s.116). Rakennuksen elinkaariarviointi ottaa huomioon rakennushankkeen ympäristövaikutukset aina raaka-aineiden hankinnasta purkamiseen asti (Ympäristöministeriö 2019, s.12) eli moduulista A1 moduuliin C4 asti.

LCA-menetelmä on standardoitu, joten elinkaariarvioinneilla on mahdollista vertailla eri vaihtoehtoja esimerkiksi suunnitteluvaiheessa. Laskenta perustuu standardeihin ISO 14040 ja ISO 14044. (LCA Consulting 2020). Rakennusten elinkaaren vaikutusta ympäristöön laskettaessa indikaattorina toimii useimmiten hiilijalanjälki. LCA on käytössä myös muualla kuin rakennusalalla, jonka vuoksi mitattavia indikaattoreita erilaisia. Tällaisia ovat esimerkiksi ei-fossiilisten luonnonvarojen abiottinen ehtyminen ja uusiutuvien vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö. Näitä ei toistaiseksi hyödynnetä rakennusten ympäristövaikutusten laskennassa ja tuloksissa.

Tässä työssä paneudutaan eritoten materiaalien ympäristövaikutuksiin. Elinkaaren päästöjä laskettaessa materiaalien määrä selvitetään ja kerrotaan materiaalikohtaisilla ympäristövaikutuskertoimilla. Saadut kertoimet perustuvat ympäristöselosteisiin, joista tavallisin on EPD -ympäristöseloste.

2.2 Ympäristöseloste EPD

Ilmastonmuutoksen seurauksena on tiedostettu tarve luotettavalle informaatiolle kasvi-huonepäästöjen hillitsemiseksi. EPD eli Environmental Product Declaration on kansainvälinen ympäristöseloste luotettavan datan hallintaan ja vertailuun. Tavoitteena on dokumentoida läpinäkyvästi tuotteen koko elinkaaren ympäristövaikutukset. Seloste perustuu vapaaehtoisuuteen, jolloin yritykset voivat halutessaan hakea tuotteelleen EPD ympäristöselostetta. Selosteet ovat aina kolmannen osapuolen todentamia. (EPD International 2020)

Ympäristöselosteet luodaan lähtökohtaisesti yritysten käyttöön. On olemassa myös kuluttajille suunnattuja ympäristöselosteita, joissa tuotteen teknisiä ominaisuuksia käsittelevät tiedot jätetään pienemälle huomiolle ja kerrotaan enemmän kuluttajia kiinnostavista ominaisuuksista. Tällaisia ovat muun muassa tuotteen hiilijalanjälki ja vaikutus energian kulutukseen. Kuluttajille suunnatut selosteet täyttävät harvoin EPD -selosteen vaatimukset. EPD -ympäristöselosteet pohjautuvat standardiin EN 15804, johon on kirjattu kaikki ne tiedot, jotka ympäristöselosteessa pitää esittää.

Viralliset EPD -selosteet ovat tyyppin III ympäristöselosteita, joista on puolestaan säädetty standardissa SFS-EN ISO 14025 Ympäristömerkit ja -selosteet. Tyyppin III ympäristöselosteiden sisällöille on tarkat vaatimukset vertailtavuuden takaamiseksi. Huomioon otetaan muun muassa lähtötietojen kattavuus, epävarmuus ja laskentamenettelyt. (SFS-EN ISO 14025: 2010). EPD -ympäristöselosteen sisältö on jaettu kolmeen osaluueeseen, jotka ovat tuotteen tiedot, elinkaariarvioinnin laskentaperusteet ja elinkaariarvioinnin tulokset.

Tuotteen tiedot käsittävät kuvauksen tuotteen ominaisuuksista ja tyyppillisestä käyttökohteesta. Selosteessa on kerrottava tuotteen pääraaka-aineet, jonka lisäksi listataan tuotteen sisältämät REACH SVHC -aineet. Fysikaalisista ominaisuuksista huomioidaan rakentamiseen vaikuttavat tekijät. Mahdolliset tuotestandardit kerrotaan myös EPD-selosteessa. Elinkaarilaskennan perustiedoissa ilmoitetaan yksikkö, jolla tuotetta lasketaan ja käytetään. Rakennuksen elinkaaren kannalta pakollisia moduuleja ovat A eli tuotevaihe, C eli rakennuksen purkuvaihe ja D elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset. Tuotevaihe on määritetty luvussa 1. Rakennuksen purkuvaihe käsittää purkamistyön ja siihen liittyvät kuljetukset sekä purkujätteen käsittelyn ja loppusijoituksen. (Rakennustietosäätiö 2020)

Elinkaaren ulkopuolisilla vaikutuksilla tarkoitetaan uudelleenkäyttöä ja kierrätystä sekä muu materiaalin hyödyntäminen. Rakentamis- ja käyttövaihe kuuluvat EPD -selosteessa valinnaisiksi. Suomalainen rakennustietosäätiö RTS on lisäksi asettanut A4 eli kuljetuksen työmaalle pakolliseksi myöntämilleen EPD -selosteille.

Tärkein osa EPD:ssä on elinkaariarvioinnin tulokset. Tämä pitää sisällään tuotteen vaikutuksen luonnonvarojen käyttöön ja sitä kautta ympäristövaikutuksiin koko elinkaaren aikana. Tuotteen elinkaari pitää sisällään valmistuksen, käytön, kierrätyksen ja uudelleenkäytön lisäksi hukan työmaalla. Eri jätetekategoriat ja ympäristöindikaattorit ovat myös huomioitu. Tuotteen aiheuttamat päästöt on jaettu maahan, pintavesiin ja sisäilmaan aiheutuviin päästöihin. (Rakennustietosäätiö 2020)

EPD -ympäristöselosteita voi käyttää EU:n alueella. Seloste kehitettiin yritysten väliseen viestintään, mutta nykypäivän käyttö on laajentunut. Tuotteiden EPD -selosteita voidaan hyödyntää hankkeiden suunnittelussa, jos halutaan suunnitteluvaiheessa vaikuttaa hankkeen aiheuttamiin kasvihuonepäästöihin. Muita käyttökohteita on esimerkiksi tuotteiden resurssi- ja materiaalitehokkuuden laskennassa. EPD -ympäristöselosteet eivät rajoitu vain rakennusmateriaaleille, sillä Vattenfall tarjoaa ympäristömerkittyä sähköä olleen ainoa EPD-sertifioitu sähköyhtiö Suomessa (Vattenfall 2020). Sähkölle luotu ympäristöselostus kertoo yhtä kilowattituntia kohden käytetyt resurssit, syntyneet päästöt ja jätteet sekä kierrätyksen ja maankäytön tason.

Rakennustietosäätiön sivuilla maaliskuussa 2021 julkaistu 95 EPD:tä. Ympäristöselosteen hakeminen tuotteelle perustuu vapaaehtoisuuteen. Virallinen EPD -ympäristöseloste on luotettava osoitus tuotteen ympäristövaikutuksesta, joten taustalla on aito halu läpinäkyvyydestä. Toimijat, jotka hakevat tuotteilleen virallisen ympäristöselosteen, osoittavat samalla aitoa halua vaikuttaa tulevaisuuteen. Toistaiseksi EPD -ympäristöselosteiden määrä on Suomessa suhteellisen pieni, mutta määrä kasvaa joka kuukausi ja kasvun voidaan ottavan suuriakin harppauksia seuraavien vuosien aikana.

Luotettavuus on EPD:n kulmakivi. Nykypäivänä monien tuotteiden kohdalla mainitaan ympäristöystävällisyys, mutta todellinen vaikutus esimerkiksi elinkaareen on harvoin esitetty. Kolmannen osapuolen todentamat selosteet luetaan verifioituiksi. Verifioinnissa tarkistetaan, että kaikki esitetyt luvut ja tiedot ovat oikeita sekä standardissa ISO 14025:2006 asetetut minimivaatimukset täyttyvät. (Rakennustietosäätiö 2020)

2.3 Sementin valmistusprosessi ja sen vähentäminen

Sementin valmistuksessa syntyvistä päästöistä yli 50 % on peräisin raaka-aineita, jotka eivät ole korvattavissa. Tulevaisuuden kehitys koskee valtaosin hiilidioksidin vähentämistä, hyötykäyttöä ja varastoimista. Suomen tasolla sementin valmistaminen aiheuttaa 1,6 prosenttia valtion hiilidioksidipäästöistä. (Finnsementti 2020).

Sementtiä valmistetaan Suomessa, jonka lisäksi sementtiä myös tuodaan Saksasta. Tuontimäärä oli eri arvioiden mukaan 300 000 tonnia (Scandinavian Cement Oy). Suomessa on vain yksi sementtiä valmistava yritys, Finnsementti, jonka tuotanto vuonna 2019 oli 1 423 000 tonnia sementtiä. Nykyisin sementti koostuu kalkkikivestä, kipsistä ja savesta, mutta tuotannossa käytetään myös masuunikuonaa, lentotuhkaa, ferrosulfaattia ja mineraalijätettä. Koostumus riippuu sementin käyttökohteesta ja halutuista ominaisuuksista.

Rakennussementin valmistusprosessi käsittää monia erilaisia työvaiheita kalkkikiven louhinnasta valmiin sementin kuljetukseen. Suomessa on perustettu sementtitehtaita lähelle avolouhoksia, joissa pääraaka-aineen louhinta ja murskaus tapahtuu. Murskauksen jälkeen kiviaineksen laatu tarkistetaan, jauhetaan edelleen hienommaksi. Raaka-aineiden laatua, suhteellisia määriä ja tasaista jakautumista seurataan läpi valmistusprosessin. Kalsinointireaktio, jossa kalkkikiven karbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi, tapahtuu esilämmityksessä. Sementtiklinkkerin poltto vaatii yli 1400 asteen lämpötilan, jossa klinkkerimineraalit muodostuvat jauheen sulaessa. Klinkkeri jäädytetään 200 asteeseen, jonka seurauksena karkeaa soraa muistuttava sementtiklinkkeri voidaan varastoida ennen hienoksi jauhamista. (Finnsementti 2020).

Valmistusprosessin päästöt jakautuvat kahteen osaan, joista kalkkikiven kalsinoituminen aiheuttaa 66 % päästöistä ja loput 34 % polttoaineiden palamisesta. Päästöjen suuruuteen voidaan vaikuttaa neljällä eri tavalla, jotka ovat raaka-aineiden ja polttoaineiden valinta, energiatehokkaat ratkaisut ja menetelmät sekä seosaineiden käyttö. Energiaa kuluu suuria määriä sementtiklinkkerin polttamisessa, mutta sementtitehtaat myös tuottavat vuosittain 30 GWh kaukolämpöä kaupunkien verkostoon. Tämän prosessin kehittäminen on haastavinta, sillä kalkkikiven kalsinointi on pakollinen kemiallinen reaktio sementtiklinkkeriä valmistettaessa.

Korkea lämpötila polttouunissa vaatii paljon energiaa pääpolttoaineen ollessa kivihiili. Öljynjalostusteollisuudessa syntyy paljon sivutuotteita, joita hyödynnetään kierrätyspolttoaineena sementin valmistuksessa. Lisäksi rengasmursketta, PPAF-reunanauhaa ja SRF-kierrätyspolttoainetta on korvaamassa fossiilisten polttoaineiden osuutta. Finnsementin tuotannossa kierrätyspolttoaineilla on jo 40 % osuus käytetystä polttoaineesta. Jätettä ei polteta vain energiaksi, sillä käytettyjen autonrenkaiden metallikudos ja reunavaijerit sulavat sementtiklinkkeriin. Kyseessä on rinnakkaisprosessi, jossa polttoaineen sisältämä energia käytetään mahdollisimman tehokkaasti hyödyksi ja prosessi ei tuota lopputuotteena lainkaan tuhkaa. Kierrätysmateriaalien määrä Finnsementin tuo-

tannossa vuosittain vastaa jopa 6000 rekkakuormallista jätettä. Koko sementin valmistusprosessi on myös jätteetön, sillä kaikki syntyvä energiajäte voidaan käyttää tuotannossa uudelleen.

Seosaineiden käytöllä voidaan vähentää sementin menekkiä betonituotteita valmistettaessa. Muita lisäaineilla tavoiteltavia ominaisuuksia on vesitiiveys, koossapysyvyys, kemiallinen kestävyys, alhainen hydrataatiolämpö ja kemiallinen kestävyys. Suomalaisilla betonivalmistajilla on käytössä lentotuhka, masuunikuona ja silika. Silika on piidioksidia, jota syntyy piin ja piiraudan valmistuksen seurauksena. Silikan käyttö seosaineena vaatii notkistavan lisäaineen käyttö, jotta betonin työstettävyys ei kärsi. Ympäristökuorman vähentämisen lisäksi silika parantaa betonin vedenpitävyyttä, tiiviyyttä ja lujuutta. Kuona parantaa myös sulfaatinkestävyyttä, mutta lisää betonin virumaa ja heikentää pakkas-suolakestävyyttä. (Betoniteollisuus 2020)

Raudan valmistuksen yhteydessä syntyy ylijäämänä masuunikuonaa, jolla voidaan korvata portlandsementin osuutta betonissa. Masuunikuonan ominaisuudet sideaineena ovat riippuvaisia sulan kuonan jäähdystystavasta ja kemiallisesta koostumuksesta. Masuunikuona vaikuttaa varhaislujuuden kehitykseen hidastavasti, mutta loppulujuuden kehitykseen kuona vaikuttaa kasvattamalla niitä. Yleisin seosaine on lentotuhka, jota syntyy kivihiihen polton seurauksena. Ominaisuuksiltaan lentotuhka sopii sementin korvauksiksi hyvin, sillä se voi toimia sekä kiviaineksena että sideaineena, riippuen raekoosta. Lentotuhka reagoi kalsiumhydroksidin kanssa, jonka seurauksena muodostuu kalsiumsilikaattihydraattigeeliä. Vaikka lentotuhka hidastaa betonin kovettumista, edut ovat suuremmat. Päästöjen vähentämisen lisäksi se parantaa betonin työstettävyttä ja vähentää vedentarvetta. (Tikkanen 2020)

Muun muassa lentotuhkalle, silikalle ja masuunikuonalle on olemassa tarkat laatu- ja valmistusvaatimukset, jotta seosainetta saa käyttää sementin seosaineena. Standardissa SFS-EN 197-1 Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus on säädetty seosaineiden määrästä tavallisen sementin joukossa. Sivuosaa-aine, joita lentotuhka, silika ja masuunikuona ovat, määritellään materiaaliksi, jonka paino-osuus kaikkien aineiden summasta on maksimissaan 5 prosenttia. Sivuosaa-aineet sekoitetaan helposti lisäaineisiin, joita ovat erilaiset betonin notkistimet, huokostimet, kiihdyttimet tai hidastimet ja paisunta-aineet. Lisäaineen määrä ei saa olla suurempi kuin 1,0 prosentti sementin painosta. (SFS-EN 197-1: 2012)

2.4 Sementin korvaaminen ja teknologia

Sementin valmistuksen ollessa ympäristölle suuri kuormitustekijä, on aktiivisesti etsittävä tapoja korvata se muilla kuin lisäaineilla. Oulun yliopisto on tutkinut geopolymeerejä, jonka avulla voidaan korvata perinteisellä reseptillä valmistettua betonia. ”Geopolymeeri on betonimainen aine, joka syntyy esimerkiksi teräs- ja kaivannaisteollisuuden pii- ja alumiinipitoisesta jäteaineesta tietyissä alkalisissa eli korkean pH:n olosuhteissa. Aineen koostumusta voidaan säätää olosuhteita muuttamalla” (Tuominen 2016). Geopolymeerin aiheuttama kuormitus ympäristölle voi olla parhaimmillaan 80 prosenttia pienempi tavalliseen betoniin verrattuna.

Raaka-aineina toimivat masuunikuona ja natriumsilikaatti. Puristuslujuudeksi saadaan jopa 107 MPa 28 vuorokauden lujuudenkehityksen jälkeen, kun perinteisen betonireseptin vastaava lujuus samassa iässä on noin 55 MPa (Oulun yliopisto 2019). Geopolymeeribetoni hyödyntää teollisuuden ylijäämämateriaalia, jolloin se pystyy myös hinnassa kilpailemaan perinteisen betonin kanssa. Ympäristövaikutusten lisäksi tärkeä tekijä on kustannukset, joiden on pysyttävä maltillisina laajempaa käyttöä ajatellen.

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto on tutkinut kuituvahvisteisten geopolymeerikomposiittien vaikutusta ympäristöön. Tutkimuksissa verrattiin perinteistä rautavahvisteista betonia lasikuituvahvisteiseen ja polypropeenivahvisteiseen tuotteeseen. Pohjimmaisena ajatuksena on teollisuudessa syntyneiden ylijäämämateriaalien hyödyntäminen kestäväen kehityksen mukaisina rakennusmateriaaleina (Abdulkareem et al. 2019).

Sementin valmistuksen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ei perustu vain materiaalin kehitystyöhön ja kiertotalouteen. Yksi osa-alue on valmistusprosessiin liittyvä teknologia. Nähdään, että suuret päästövähennykset vaativat teknologiaoikan. Kalsointiprosessissa vapautuneesta hiilidioksidista 23 prosenttia sitoutuu betonirakenteen elinkaaren aikana takaisin betoniin, joten suuri osa saastuttavimman vaiheen päästöistä on vielä poistettava. Vaihtoehtoja hiilidioksidin hyödyntämiseen ovat talteenotto sementin valmistuksessa, hyötykäyttö ja varastointi. (Finnsementti 2020)

2.5 Terästuotanto

Rauta on epäjaloa metallia, joka reagoi helposti eri alkuaineiden kanssa lämpötilan kohotessa. Rautaa ei juurikaan esiinny puhtaana alkuaineena, vaan siinä on usein mukana hiiltä. Teräs on rautaa, jonka hiilipitoisuus on alle 1,7 prosenttia. (Väisänen 2007) Hiilipitoisuus on tärkein tekijä teräksen ominaisuuksia muutettaessa. Tämän vuoksi eri teräkset luokitellaan esimerkiksi hiilipitoisuuden mukaan. Yleisin luokittelu on kuitenkin käytötarkoituksen mukaan. Tässä työssä tärkein luokka on rakenneteräkset, joka sisältää perusteräksiä, ilmastokorroosiota sietäviä teräksiä ja ruostumatonta sekä erikoislujuu terästä. (Teräsrakenneyhdistys 2020)

Terästeollisuus tuottaa arviolta 7-9 prosenttia koko maailman hiilidioksidipäästöistä. Suomen tasolla SSAB:n Raahen tehdas yksinään tuottaa Suomen vuotuisista päästöistä 7 %. Teräksen valmistus käsittää monta vaihetta ja korkeita lämpötiloja vaativia prosesseja. Valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöt jaetaan kahteen luokkaan: käytetystä raaka-aineesta ja polttoaineen käytöstä syntyviin päästöihin. Pohjoismaissa kierrätetyn teräksen osuus on pieni, jolloin raaka-aineet muodostavat 95 % terästuotannon hiilidioksidipäästöistä. (SSAB 2020b)

Teräksen vahvuus rakennusmateriaalina on sen suuri lujuus. Valmistusprosessissa lujuuden kehittymiseen vaikuttaa kolme eri tekijää, jotka ovat mikrorakenne, kemiallinen koostumus ja teräksen jäähdytysnopeus sulasta tilasta kiinteäksi. (Ovako 2020) Teräksen valmistukseen on kaksi erilaista prosessia, riippuen raaka-aineen valinnasta. Konvertteriprosessissa pääraaka-aine on sulaa raakarautaa, mutta prosessissa on käytössä myös kalkkia ja kierrätettyä terästä. Kalkki sitoo valmistuksessa syntyvät ylijäämäaineet muodostaen kuonaa. Kierrätysteräksen tehtävänä on estää raudan liiallinen kuumeneminen. (Väisänen 2007)

Raakaraudan valmistaminen tapahtuu masuunissa 1500 asteen lämpötilassa. Suomessa käytettävät masuunit ovat teknologialtaan alansa huippuja, mutta prosessi rasittaa ympäristöä ilman suurta teknologista kehitystä. Raudan prosessoinnissa hyödynnetään koksia, joka on hienoksi jauhetusta kivihielestä korkeassa lämpötilassa valmistettua hiiltä. Koksia käytetään metallurgisessa reaktiossa, jossa koksen sisältämä hiili hapettuu hiilimonoksidiksi ja edelleen hiilidioksidiksi. Raudan hiilipitoisuutta pienennetään mellotukseksi kutsutussa prosessissa, jonka lopputuotteena syntyy terästä. Suurin kuormitus ympäristölle prosessissa syntyy hiilen ja kivihieksen käytöstä, josta luopuminen on kuitenkin haastavaa. Hiilidioksidipäästöjen määrä on siis riippuvainen masuunissa käytettävän pelkistysaineen määrästä (Väisänen 2007)

Teräs on maailman kierrätetyin materiaali, jonka kierrätysaste Euroopassa on tällä hetkellä noin 55 prosenttia (Bureau of International Recycling 2018). Teräs ei menetä ominaisuuksiaan kierrätysprosessissa, joten sitä voidaan kierrättää lähes ikuisesti. Kierrätysterästä kuumennetaan valokaariuunissa, joka kuluttaa vain 33 % perinteiseen terästuotantouuniin verrattuna. Uunin toiminta perustuu fysikaaliseen ilmiöön, jossa kahden elektrodin välille muodostuu sähkökenttä. (Väisänen 2007)

Tuotannon hiilidioksidipäästöjä pienentää osaltaan sivutuotteiden hyötykäyttö. Sementin seosaineena hyödynnetty masuunikuona syntyy juuri raudan- ja terästuotannon sivuaineena. Muita käyttökohteita on esimerkiksi maatalouden ravinteena ja tienrakennuksessa. SSAB:n terästuotannosta vuosittain syntyvästä ylijäämästä vain 5 prosenttia päätyy kaatopaikalle hyödyntämättömänä. Tonneissa tämä tarkoittaa noin kahtasataa tuhatta. (SSAB 2020c)

Terästuotteiden menekki on ollut kasvussa viime vuosikymmeninä. Malmipohjaista terästuotantoa tarvitaan edelleen, sillä kierrätysteräs ei riitä vastaamaan kysyntää. Uuden HYBRIT tuotantotavan avulla voidaan tulevaisuudessa valmistaa fossiilivapaata terästä. Tavoitteena on tuotteen tuominen markkinoille jo vuonna 2026. Hankkeessa on mukana yrityksiä teräs-, rautamalmi ja sähkötuotannon osa-alueilta. Pohjimmaisena ideologiana on korvata teräksenvalmistuksessa käytettävä koksi fossiilivapaalla sähköllä ja vedyllä. (SSAB 2020a)

2.6 Tuotteistus

Diplomityön toimeksiantajalla on olemassa erilaisia vakioratkaisuja, joita pyritään hyödyntämään läpi Suomen. Nämä ovat niin sanottuja tuotteistettuja ratkaisuja, joita on kehitetty vuosien saatossa yhdessä tuotteiden toimittajien kanssa. Lähtökohtana toimivat maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) tekniset vaatimukset, joita ovat lujuus, palo- ja käyttöturvallisuus, terveellisyys, esteettömyys, energiatehokkuus ja meluntorjunta sekä ääniolosuhteet. Vaatimusten täyttymistä valvotaan EU:n tuoteasetuksen 305/2011 avulla.

Tuotteistetut rakennetyypit on jaettu perustuksiin, alapohjiin, runkoon, julkisivuihin, vesikattoon ja tilan jako-osiiin. Tämän työn kannalta tärkeimmät osa-alueet ovat runko, julkisivut ja tilan jako-osista betonirakenteiset väliseinät. Runko käsittää väli- ja yläpohjat sekä kantavat seinät. Erityinen mielenkiinto yrityksellä on välipohjarakenteissa, joissa vaihtoehtoina ovat ontelolaatta- ja massiivilaattavälipohja. Kylpyhuoneissa vaadittavat kaatolattiat ja yleiset tilat muokkaavat välipohjien ominaisuuksia.

Ominaisuuksiltaan välipohjat eivät suuresti eroa toisistaan. Ympäristöministeriön uuden rakennuksen energiatehokkuudesta on asetus vuodelta 2017, joka määrää välipohjan lämmönläpäisykertoimen suuruudesta (Ympäristöministeriö 1010/2017). Saman ministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta määrittelee tavallisen asuntojen välisen ontelolaattavälipohjan palonkestoluokaksi REI60. Tavallisen massiivilaattavälipohjan vastaava palonkestoluokka asuntojen välillä on REI 60 tai REI 120. Ääneneristävyys on sekä ontelolaatta- että massiivilaattavälipohjalla 53 desibeliä. Tämä on säädetty ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä vuonna 2017.

Suurin osa välipohjalaatoista pystytetään toteuttamaan tavallisella ontelolaatalla, mutta asuntojen kylpyhuoneiden kohdalla on käytettävä niin sanottua kololaattaa. Ontelolaataan tehtävät työt kylpyhuoneen kokoisen aukon aikaansaamiseksi nostavat kololaatan kustannuksia. Palonkestovaatimus ontelolaatalle on REI120 esimerkiksi irtaimistovarastojen päällä. Tällöin puhutaan palolaatasta. Ontelolaatan paloluokkaa voidaan nostaa lisäämällä jänneterästen suojabetonipaksuutta (Betoniteollisuus ry 2012). Tehollinen korkeus on tavallista pienempi, joka vaikuttaa laatan kapasiteettiin.

Työmaalla valettavan massiivivälipohjan paksuus vaihtelee kohteittain. Yleisesti työmaalla valettava laatta on noin 100 millimetriä ohuempi kuin ontelovälipohja. Valinta tehdään kohdekohtaisten vaatimusten mukaisesti rakennesuunnittelijan ja tilaajan yhteistyössä. Massiivivälipohjassa huomioidaan myös asuntojen kylpyhuoneet, joiden lattioihin on tehtävä kaadot. Toimintatapoja on monia, sillä kaatoja voidaan tehdä jo välipohjaa valettaessa tai erottaa kylpyhuone toisella muotilla ja valaa kylpyhuoneen lattia matalammaksi. Tällöin kaadot tehdään myöhemmin pintalattian avulla.

2.7 Puurakentaminen

Suomen valtio on laatinut puurakentamisen toimenpideohjelman vuosille 2016-2022. Tavoitteena on lisätä puun käyttöä niin kaupunkien rakentamisessa kuin julkisessa rakentamisessa. Puun käytön lisääminen pohjautuu valtion asettamaan tavoitteeseen hiilineutraaliudesta vuoteen 2035 mennessä, sillä puu rakennusmateriaalina on vähäpäästöinen. (Ympäristöministeriö 2020d)

Ohjelman painopisteet on jaettu viiteen osa-alueeseen. Ensimmäinen painopiste on puun käytön lisääminen kaupunkirakentamisessa esimerkiksi valtionavustuksina kuntien puurakentamiseen. Tärkeimmiksi kohderyhmiksi tunnistettiin kaupunkien rakentamista ohjaavat viranomaiset, puurakennusosastoellisuus ja rakennuttajat. (Ympäristöministeriö 2020d) Omakotitalorakentamisessa puurakentamisen osuus on lähes 90 %, joten ohjelma painottuu kerros- ja toimistotaloihin sekä korjausrakentamiseen (Heino 2019).

Toinen osa-alue on suunnattu puunkäytön edistämiseksi julkisessa rakentamisessa. Yleinen puurakentamisen osaamisen lisääminen on tärkeä osa, kun rakennusmateriaalien ja -tuotteiden päästöjä halutaan vähentää. Julkisissa hankinnoissa tullaankin suosimaan puupohjaisia tuotteita. Kolmas ja neljäs painopiste pureutuu rakennusteknisen osaamisen lisäämiseen, jonka avulla voidaan toteuttaa esimerkiksi siltoja ja halleja. Kasvua ja kehitystä puusta -tukiohjelma onkin alan toimijoiden yhteinen prosessi, jossa kehitetään uusia ratkaisuja. Tärkeänä pidetään alueellista yhteistyötä, jossa hankkeissa saadut opit jaetaan niin viranomaisille, rakennusliikkeille kuin puutuoteosatoimittajille sekä tutkimus- ja kehitystyöhön.

Viimeinen osa-alue on viennin kehittäminen, jossa pyritään saavuttamaan puurakentamisen osaamisella ja tuotteiden kehittämisellä kansainvälistä kilpailukykyä. Samalla puun merkitystä ilmastonmuutoksen torjunnassa korostetaan niin kotimaisessa kuin kansainvälisessä politiikassa. Tavoitteen saavuttaminen vaatii muun muassa puurakentamisen tutkimushankkeiden rahoittamista ja puurakentamisen säädösten kehittämistä. (Ympäristöministeriö 2020d)

Sanna Marinin hallitusohjelman tavoitteiden julkaisun jälkeen puurakentamisen toimenpideohjelman tavoitteita täsmennettiin 8.9.2020. Tavoitteet on asetettu koskemaan vain julkisen rakennuttajan uudisrakentamista. Puurakentamisen osuus kaikesta julkisesta rakentamisesta vuonna 2019 oli 15 %. Vuonna 2025 tavoitteena on 45 % osuus. Vastaavat osuudet asuinkerrostalojen puolella on vuonna 3 % ja 46 %. (Ympäristöministeriö 2020a)

Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA myöntää rahallista avustusta asuntopolitiikan parissa. Avustuksilla tuetaan niin muutos-, kehitys- kuin käynnistyshankkeita. (Suomi.fi 2020) ARA on ympäristöministeriön hallinnon alainen virasto. Tukemalla esimerkiksi puurakentamista avustuksilla, valtiolta pystyy ohjailemaan kolmannen sektorin asuntotuotantoa. Viime vuosina onkin tutkittu ARA:n rahoittamana puurunkoisen- ja betonirunkoisen kerrostalon kasvihuonepäästöjen eroja.

Puurakentaminen myös kerrostalotuotannossa tulee yleistymään. Volyymia ei pysty vielä kukaan ennustamaan, sillä puurakentamisessa on omat edut ja haitat betonirakentamiseen verrattuna. Ruotsissa kerrostalorakentaminen puusta on Suomea huomattavasti yleisempää, joten ruotsalaisten eri toimijoiden kokemuksia puukerrostaloista ja niissä asumisesta on kerätty yhteen. Haasteita koettiin muun muassa ääneneristävyydessä, paloturvallisuudessa, kustannuksissa ja julkisivun huoltamisessa. (Haapio 2013, s. 29) Mikään haasteista ei noussut ylitse muiden ja esille nousseet asiat edustavat melko yleisesti puurakentamisen haasteita.

Määräyksiä muokkaamalla pyritään vauhdittamaan puurakentamista, sillä nämä koetaan rakentamisvolyymia hidastavaksi tekijäksi. Uudet palomääräykset astuivat voimaan 1.1.2018. Muutokset koskivat muun muassa suojaamattoman massiivisen puun hyödyntämistä puurakenteisen kerrostalon sisäpinnoissa ja portaikkojen lukumäärää aiempaa korkeammassa asuinkerrostaloissa. Aiemmin puupinnat on verhoiltu kipsilevyillä puukerrostaloissa, jotta paloturvallisuusvaatimukset täyttyvät. (Rakennuslehti 28.11.2017)

Puukerrostalorakentaminen koetaan perinteistä betonikerrostaloa kalliimpana. Suuremmille kustannuksille on erotettu kolme tekijää. Puurunkoinen kerrostalo vaatii kalliin sprinklerijärjestelmän ja rakentamisen aikaisen sääsuojauksen. Lisäksi puurakentamisen suunnittelu on hitaampaa ja työläämpää, joten suunnittelukokemuksen puute lisää suunnitteluun vaadittavaa aikaa ja sitoo samalla rahaa. (Rakennuslehti 2016)

Puu on uusiutuva luonnonvara, jota on runsaasti saatavana kotimaasta. Mahdollisuudet puurakentamisessa liittyvät vahvasti puun ekologisuuteen ja omavaraisuuteen. Tutkimuksissa on pystytty osoittamaan, että puurunkoisen kerrostalon hiilidioksidipäästöt koko rakennuksen elinkaaren aikana ovat betonirunkoista kerrostaloa pienemmät (Helsinki 2017). Muut positiiviset puolet puurakentamisessa liittyvät nopeuteen ja sisäilmaan. Kerrostalorakentaminen puusta tarkoittaa usein puumoduulien hyödyntämistä, jolloin rakennuksen runko nousee muutamassa viikossa. Moduulit ovat tehtaalla hyvin pitkälle työstettyjä, jolloin puurakentamisella voidaan jopa puolittaa rakentamisen aika (Oinas 2020). Tavallisen betonirakenteisen kerrostalon runkovaihe vie aina useamman kuukauden, joten nopeus merkittävä etu.

Puurakentamisen vaikutus sisäilmaan on myös huomioitu. Aihetta on tutkittu VTT:llä, jonka tuloksena todettiin, että sisäilman kosteus on terveyden kannalta optimaalisella tasolla puurakenteisissa kohteissa. Mitä enemmän rakennuksessa on käytetty puuta, sitä paremmin kosteus pysyy optimaalisella alueella. (Carey J. Simonson et al 2001)

3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA -AINEISTOT

3.1 Kirjallisuuskatsaus ja aiemmat tutkimukset

Työn toisessa luvussa paneudutaan teräsbetonisten rakenneosien raaka-aineisiin, tuotantoon ja kierrätykseen. Tarkastelussa on sementin ja teräksen valmistusprosessi. Valmistusprosessi on materiaalien suurin päästökijä, jolloin on luonnollista perehtyä tähän.

Vähähiilistä rakentamista on tutkittu VTT:llä jo vuonna 2013 Antti Ruuskan ja Tarja Häkisen toimesta. Tutkimuksen tuloksena syntynyt ”Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset -taustaraportti” toimii osaltaan yhtenä lähteenä ja lähtökohtana tälle diplomityölle. Kolmannessa luvussa tarkastellaan myös tuotteiden EPD-ympäristöselosteita, jotka perustuvat elinkaarianalyysiin. Rakennusala kaipaa luotettavaa tietoa tuotteiden todellisista ympäristövaikutuksista, jolloin kolmannen osapuolen verifioima EPD-ympäristöseloste on ratkaisu tähän tarpeeseen. Luvussa paneudutaan myös puurakentamisen mahdollisuuksiin, sillä yksi vaihtoehto betonirakenteiden aiheuttamien päästöjen vähentämiseksi on korvata nämä toisella materiaalilla.

Suomen rakentamismääräyskokoelma koostuu asetuksista, ohjeista ja eurokoodeista. Tässä työssä käytetään eurokoodien määritelmiä esimerkiksi rakennuksen hiilijalanjäljestä, ympäristöselosteista ja sementin koostumuksesta. Lähdemateriaali koostuu pääsääntöisesti verkkojulkaisuista. Syy tähän on koronapandemian aiheuttama haaste kirjaston lähdemateriaalin hyödyntämiselle.

3.2 Haastattelututkimus

Yksi osa tutkimusta on kvalitatiivinen haastattelututkimus, jossa selvittää olemassa olevia vaihtoehtoja, tulevaisuuden ratkaisuja ja mahdollisuuksia. Rakennusmateriaalien osuus koko elinkaaren päästöissä on osoitettu taulukossa 1. Rakennusyhtiöiden on vaikea vaikuttaa käytön aikaiseen kulutukseen, joten materiaalien 22 prosentin osuus on perustellusti tärkein osa-alue.

Haastattelut ovat olennainen osa, sillä myös materiaalitoimittajilla on suuret paineet ja tavoitteet päästöjen vähentämiseksi. Pitkäjänteisellä yhteistyöllä rakennusliikkeet ja materiaalitoimittajat kehittävät tuotteita ympäristöystävällisemmäksi ja käytännöllisemmäksi. Pilottihankkeiden kautta uudet tuotteet jalkautetaan pysyvästi markkinoille.

Taulukko 1. Haastattelututkimukseen pyydetyt henkilöt, asema ja organisaatio

Tunnus	Asema	Organisaatio	Päivämäärä	Kesto
Haastattelu1, Liite A	Vastuullisosaston toimihenkilö	Saint-Gobain Finland & Weber Nordic	10.11.2020	56 min
Haastattelu 2, Liite B	Kehitysosaston toimihenkilö	Rudus Oy	17.11.2020/ 28.1.2021	55 min 35 min
Haastattelu 3, Liite C	Myynti- ja markkinoinnin toimihenkilö	Celsa Steel Service	20.11.2020	50 min
Haastattelu 4, Liite D	Kehitys- ja suunnittelun toimihenkilö	Parma Oy	26.11.2020	45 min
Haastattelu 5, Liite E	Rakennesuunnittelija, projektipäällikkö	Sitowise Oy	7.12.2020	48 min

Haastatteluja suoritetaan viidelle kohdeyrityksen yhteistyökumppanille. Kaikki haastattelut suoritettiin Microsoft Teams -ohjelman välityksellä. Haastattelukysymykset on esitetty liitteissä A-E.

Toimittajat ovat kestävän kehityksen osalta erilaisissa vaiheissa, joten kysymykset vaihtelevat eri toimittajien välillä. Tavoitteena on muun muassa selvittää tulevaisuuden suurimpia haasteita, jotka ennakkoon ajateltuna voivat liittyä esimerkiksi raaka-aineen saatavuuteen tai kustannusten nousuun. Toimittajilta kysytään EPD ympäristöselosteesta ja omista tavoistaan laskea sekä osoittaa informaation luotettavuus.

Diplomityö on rajattu käsittelemään talopuolen runkorakenteita, mutta samat yhteistyökumppanit toimivat kohdeyrityksen kanssa myös infrarakentamisen puolella. Koska aihe on suhteellisen tuore koko rakennusalaalla, on kiinnostavaa kuulla toimijoiden kautta myös infrarakentamisen tilanne. Yksi kysymys on myös eri toimijoiden asenne hiilidioksidipäästöjen ja koko kestävää kehitystä kohtaan. Rakennusala on juurtunut pitkälle perinteisiin toimintamalleihin, jolloin asenteiden muutos vaatii aikaa.

Yksi haastateltavista on vähähiilisestä rakentamisesta kiinnostunut rakennesuunnittelija. Vaikka haastattelun ratkaisuja ja ehdotuksia ei työssä pystyittäisikään juuri hyödyntämään, on myös suunnittelijan näkemys olennainen ja omaa ajattelutapaa laajentava. Kiinnostavia teemoja ovat esimerkiksi tulevaisuuden innovaatiot ja rakenteiden optimointi, jolloin betonin tai teräksen määrää voitaisiin vähentää.

Ensimmäinen haastateltava on Saint-Gobain Finlandin vastuullisuuden johtotehtävissä työskentelevä asiantuntija. Haastateltava henkilö on työskennellyt jo vuosia vähähiilisen rakentamisen parissa ja toimii kiinteässä yhteistyössä alan eri toimijoiden kanssa. Hän on myös pitänyt vierailijaluentoja useilla yliopiston kursseilla.

Yksi diplomityön tärkeimpiä tuotteita on valmisbetoni, jolloin haastatteluissa on luonnollista hyödyntää Rudus Oy:n asiantuntemusta. Haastateltava henkilö toimii organisaation kehitystyön parissa, jolloin haastattelussa kuullaan myös tulevaisuuden teemoista. Paikalla valettavassa välipohjalaatassa valmisbetonitoimittajan ja urakoitsijan saumaton yhteistyö on perinteisesti tärkeää, sillä valutapahtuman muuttujia on hallittava yhteisesti.

Paikalla valettava välipohjalaatta vaatii valmisbetonin ja talotekniikan lisäksi massiivisen raudoituksen. Kolmas haastateltava toimija on Celsa Steelin myynnin- ja markkinoinnin johtotehtävissä toimiva asiantuntija. Paikalla valettavan välipohjalaatan raudoitus on vielä verrattain pieni infrarakentamisen raudoituksiin, mutta silti se on usein tahdistavin työvaihe. Terästuotannon merkitys myös hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä on merkittävä ja tähän paneudutaan myös kirjallisuuskatsauksessa.

Neljäs haastateltava henkilö on Parma Oy:n suunnittelun johtotehtävissä toimiva henkilö. Diplomityön yksi tärkeä rakenneosia on ontelolaatat ja niiden uusi vähähiilinen versio. Kohdeyritys myös pilotoi diplomityön aikana ensimmäisiä vähähiilisiä ontelolaattoja (Parma 2020). Haastattelussa paneudutaan myös tulevaisuuden vähähiilisiin rakennesosiin.

Viimeisin haastateltava henkilö on Sitowise Oy:n projektipäällikkö, joka on perehtynyt vähähiiliseen rakentamiseen rakennesuunnittelun näkökulmasta. Haastattelussa paneudutaan suunnittelijan keinoihin vaikuttaa rakennuksen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin. Yksi osa on muun muassa kohdeyrityksen tuotteistetut rakenneratkaisut, jotka vähentävät rakennesuunnittelijan vaikutusmahdollisuuksia.

Haastattelujen tulosten hyödyntäminen vaihtelee eri yritysten välillä. Rakennesuunnittelijan ajatuksia ja ideoita ei diplomityön parissa päästä laajemmin hyödyntämään. Nämä avaavat myös kohdeyritykselle erilaisia vaihtoehtoja, jolla rakentamisen hiilijalanjälkeä saadaan pienemmäksi.

Betonituotteiden toimittajien tuotteita hyödynnetään päästölaskennassa. Mallikohde on ontelolaattakohde, jolloin raudoitusta voidaan käsitellä vain teoreettisella tasolla. Raudoituksen vaikutusta aikatauluun- ja kustannuksiin voidaan kuitenkin tarkastella.

3.3 Empiirinen tutkimus vaihtoehtoisista ratkaisuista

Kasvihuonepäästöjen simuloinnissa hyödynnetään kohdeyrityksen käytössä olevaa OneClick LCA-ohjelmaa ja EPD-ympäristöselosteita. Laskentaohjelmalla lasketaan kohdeyrityksen todellisen mallikohteen kasvihuonepäästöt. Tässä apuna toimii laskentatoimen tarkka määräluettelo, jonka avulla saadaan tarkat määrät kutakin rakenneosaa.

Kasvihuonepäästöjen laskentamenetelmä perustuu Suomen ympäristöministeriön julkaisuun rakennuksen vähähiilisyysarvioinnista. Laskentaohjelma tukee tätä julkaisua. Julkaisussa määritellyt mitkä tekijät otetaan mukaan hiilijalanjäljen arviointiin. Yhteinen toimintatapa selkeyttää rakennusten välisten ympäristövaikutusten vertailua tulevaisuudessa.

Vaihtoehtoiset ratkaisut mallinnetaan mahdollisimman realistisiksi ja toteuttamiskelpoiksi. Mallinuksen avulla saadut määrät syötetään laskentaohjelmaan, niin että mallikohteen muut ominaisuudet pysyvät samana ala-, väli- tai yläpohjaa lukuun ottamatta. Kohdeorganisaation kannalta tärkeimmät tulokset saadaan materiaalien aiheuttamista päästöistä hankkeen elinkaaren vaiheissa A1-A3. Saatuja tuloksia verrataan alkuperäiseen, käynnissä olevaan mallikohteeseen.

Vaikka mallikohde on toteutettava kohde ja lopulliset kustannukset ovat osittain selvillä, käytetään diplomityössä vain kohdeyrityksen laskentatoimen kustannustietoutta. Tällöin linja pysyy samana läpi työn, jolloin yksittäiset onnistuneet tai epäonnistuneet urakaneuvottelut eivät vaikuta lopputulokseen.

Rakennusalan trendinä on läpimenoajan lyhentäminen, jolla säästetään ajan lisäksi myös kustannuksia. Vihreää betonia on ollut kehitteillä jo vuosia, mutta pidempi kuivumisaika ja hitaampi lujuudenkehitys on toistaiseksi estänyt vihreän betonin hyödyntämisen käytännössä. Samalla pyritään tarkastelemaan uusien tuotteiden suurempia kustannuksia verrattuna perinteisiin tuotteisiin.

Kustannuksissa otetaan myös kantaa pidentyneeseen läpimenoaikaan. Muuttujia pidentyneessä läpimenoajassa on monta, jolloin vain osa välillisistä kustannuksista pystytään tarkastelemaan riittävän luotettavalla tasolla. Aliurakan sopimisen lähtökohta voi vaihdetta yksikköhinnoinnista neliöihin tai viikkotason aikatauluun.

3.4 Kohdeyritys

Diplomityö tehdään yhdessä YIT Suomi Oy:n kanssa. Työ on luonnollinen jatkumo diplomitoille, joita yritykselle on viime vuosina tehty. Rakentamisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat viimeisen vuoden aikana nousseet suuresti esiin, joten aihe on myös ajankohtainen. Kohdeyritys edistää päästöjen vähentämistä monella rintamalla, josta esimerkkinä toimii puukerrostalojen pilottihankkeet Tampereella.

Kohdeyrityksen strategia koostuu neljästä osa-alueesta, joista kestävä kehitys on yksi. Strategia ulottuvuus on vuosille 2020-2022, mutta kestävä kehityksen tavoitteet on luotu jo pidemmälle aikavälille. Tämän työn lähtökohtana toimii kohdeyrityksen tavoite puolittaa suhteellisesti oman toiminnan ja valmistuneiden omaperusteisten hankkeiden CO_2 -päästöt vuoden 2019 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Toinen tavoite on omaperusteisten hankkeiden CO_2 -tunnuslukujen laskeminen ja raportointi vuodesta 2020 lähtien. Eri rakennusosien vaikutus hankkeen päästöihin on olennaista tuntea, sillä tulevaisuudessa jo hankkeiden suunnitteluvaiheessa on nämä otettava paremmin huomioon. (YIT Oyj 2020)

Diplomityö sijoittuu kohdeyrityksen Helsingin asumisen yksikköön. Hankkeet vaihtelevat perustajaurakoinnista sijoittajille myytäviin kohteisiin, mutta tuotannossa on vain betonirunkoisia asuinkerrostaloja. Työn kirjoitusprosessin aikana käynnistettiin ensimmäinen pilottihanke vähähiilisten ontelolaattojen parissa. Yliopiston osalta diplomityö sijoittuu rakennetun ympäristön tiedekuntaan.

3.5 Käsiteltävät rakenneosat ja tuotteet

Kohdeyrityksellä on käynnissä monia projekteja rakentamisen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Yksi hankkeista on betonirakenteiden kehittäminen ja korvaaminen, sillä näiden osuus etenkin materiaalien aiheuttamissa päästöissä on merkittävä. Työssä käsiteltävät rakenneosat ovat vaakarakenteitarakenteita, joihin liittyy myös deltapalkit. Ensimmäisessä osassa vertaillaan vain eri välipohjaratkaisuja. Toisessa osassa huomioidaan myös ala- ja yläpohjat siinä laajuudessa, kuin se on mahdollista.

Käsiteltävä mallikohde on suunniteltu ja toteutettu perinteisillä ontelolaatoilla. Kohde on tavallinen pistekerrostalo, jolloin ontelolaattarakenne on kustannustehokkain ratkaisu. Betonirakenteisessa rungossa myös väliseinät toimivat myös kantavina rakenteina. Välipohjarakenne vaatii yhdeksän deltapalkkia.

Markkinoille on tullut myös vähähiilisempi ontelolaatta. Toinen tarkasteltava välipohjaratkaisu on Consolis Parman vähähiilinen ontelolaatta, jota on mahdollista käyttää välipohjien lisäksi ala- ja yläpohjissa. Tavallisten deltapalkkien lisäksi työssä tarkastellaan vihreitä deltapalkkeja, jotka yhdistetään käytettäväksi vähähiilisten ontelolaattojen kanssa.

Välipohjarakenne voidaan toteuttaa myös paikalla valettavana laattana. Työssä hyödynnetään kohdeyrityksen tietotaitoa, jonka avulla pystytään mallintamaan paikalla valettava välipohja ilman todellisia suunnitelmia. Olennaisimmat muuttujat työn kannalta ovat paikalla valettavan laatan raudoitus- ja betonimäärä neliometriä kohden. Kolmas tarkasteltava rakenne on 270 millimetriä paksu paikalla valettava laatta, jossa käytettävä betoni on tavallinen C30/37.

Neljäs tarkasteltava välipohjaratkaisu on paikalla valettava välipohjalaatta, jossa käytettävä betoni on vähähiilisempi kuin alkuperäinen C30/37. Vihreä betoni on Ruduksen betonilaatu, jolla on tavallista betonia pienemmät hiilidioksidipäästöt. Luvulla tarkoitetaan prosentuaalista päästövähennystä, eli vihreä betoni 20 hiilidioksidipäästöt ovat 20 prosenttia pienemmät, kuin tavallisella betonilla. Viides tarkasteltu tapaus on vihreä betoni 40, jolla voidaan saavuttaa 40 prosentin päästövähennys perinteiseen betoniin verrattuna.

Paikalla valettavan laatan tapauksissa verrataan lisäksi kahta erilaista betonia, joita laskelemaohjelma tarjoaa. Molemmat vaihtoehdot ovat C30/37 lujuusluokan betonia, mutta erona on kierrätysaste. Käytettävät valmisbetonin tyypit ovat 0% kierrätetty C30/37 betoni ja 10 % kierrätetty C30/37 lujuusluokan betoni. Kierrätetyn materiaalin osuus valmisbetonissa viittaa sementtiin eli kuinka paljon lentotuhkaa tai kuonaa on käytetty sementin raaka-aineena. Mitä vähemmän sementtiä on betonin reseptissä käytetty, sitä pienempi on betonin ympäristövaikutus.

4. HAASTATTELUIDEN TULOKSET

Haastatteluun pyydetty asiantuntijat toimivat rakennusalalla hyvin erilaisissa työtehtävissä. Yhteistä on kiinnostus vähähiilistä rakentamista kohtaan. Erilaisia asiantuntijoita haastatteleamalla saatiin luotua tilannekatsaus vähähiilisen rakentamisen nykytilanteesta ja tulevaisuudesta.

Haastattelut alkoivat tutkimuksen aiheen ja tavoitteiden esittelyllä. Yhtenä lähtökohtana toimi kohdeyrityksen kanssa aiemmin kirjoitettu diplomityö, jossa tarkasteltiin eri rakennusmateriaalien vaikutusta hiilijalanjälkeen. Lisäksi kohdeyrityksen julkiset päästövähennystavoitteet tukivat aiheen merkittävyyttä.

4.1 Haastatteluaineisto

Asiantuntijahaastatteluiden teemana oli selvittää kyseisen organisaation tilanne vähähiilisen rakentamisen parissa. Jos kyseessä oli materiaalitoimittaja, oli luonnollista selvittää lähtötilanne ja mahdollinen strategia. Haastateltavat yritykset on valikoitu haastatteluihin myös merkittävyytensä puolesta. Samalla tiedettiin, että he ovat aiheeseen perehtyneet, joten haastattelusta saadaan lisäarvoa.

Materiaalitoimittajat aiheuttavat omalla toiminnallaan suuren määrän hiilidioksidipäästöjä vuosittain. Organisaatiot ovat luoneet omat päästövähennystavoitteensa, jotka ovat julkisia. Vähennyskeinot ovat riippuvaisia tuotannosta, sillä suurimmat tuotannolliset päästövähennykset vaativat myös teknologista kehitystä. Kuljetusten optimointi, energiankäytön ja hukkan minimointi sekä ympäristöystävälliseen sähkөөn siirtyminen ovat esimerkkejä yksinkertaisemmista päästövähennyskeinoista.

Tulevaisuuden tavoitteet ovat osittain selvillä, mutta erilaisia keinoja näiden saavuttamiseksi etsitään jatkuvasti. Kehitystyö on pysyvä osa yritysten toimintaa. Kasvihuonepäästöjen vähentäminen ei ole vain huono asia, sillä kehitystyön tuloksena voidaan saavuttaa myös muita ominaisuuksia. Hitaampi lujituksen kehitys on alkuvaiheen ongelma, mutta korkeampi loppulujuus on tavoiteltava ominaisuus.

Haastateltavat yritykset tunnistavat rakennusalan aikataulu- ja kustannuspaineet. Haastatteluista käy ilmi uusien tuotteiden hetkellinen kalleus, mutta volyymin ja kokemusten kasvu vaikuttaa kustannuksiin laskevasti. Lähtökohtana on kuitenkin ajatus, että muutos on väistämätön, joten tähän on sopeuduttava. Haastatteluissa saatiin kustannustietoa, joka auttoi eri ratkaisuiden vertailuissa.

Rakennusala on perinteisesti vahvojen asenteiden ala, joten haastatteluissa kysyttiin myös asenteista. Aihe on suhteellisen uusi, mutta haastateltavat eivät koe tässä isoa ongelmaa. Muutos on hidasta, mutta isot toimijat ovat valmiita näyttämään esimerkkiä. Osa kysymyksistä kohdistettiin asiantuntijoiden vahvuusalueille, jotta itse tuotteesta tai rakenneteknisistä vaihtoehdoista saataisiin paras tieto tutkimuksen kannalta.

4.2 Vähähiilinen rakentaminen

Haastateltava henkilö on Saint-Gobain Finlandin vastuullisuuden johtotehtävissä työskentelevä asiantuntija, jolla on laaja osaaminen kestävästä rakentamisesta. Saint-Gobain ja kohdeyritys tekevät myös laajaa yhteistyötä eri tuotteiden ja ratkaisuiden parissa.

Ensimmäinen kysymys koski vähähiilistä rakentamista ja sen tulevaisuutta. Mikä on isoin ja merkittävin asia. Toimittajat, rakennusliikkeet, valtion sanelema vai asiakkaat. Onko edessä pakottaminen vai luonnollinen siirtymä. Haastateltavan mielestä sekä että. Ympäristöministeriön tuleva vähähiilisen rakentamisen regulaatio julkaistaan luultavimmin jo vuonna 2024. Haastateltava kertoo, että nyt menetelmää testataan ja rakennetaan geneeristä päästötietokantaa. Tällä hetkellä se koskee vain julkisia rakennuksia. Pilotoinnin kautta haetaan rajoja, mitkä mahdollisesti linkitetään rakennuslupaun. Tämä vie eteenpäin ja esimerkiksi Senaatti-kiinteistöt pohtivat jo nyt, miten tulevat tavoitteet tullaan saavuttamaan. A-insinöörit puolestaan konsultoivat heitä vähähiilisestä rakentamisesta. Yhtä lailla RAKLI:lla on menossa vähähiilisen rakennuttamisen klinikka kiinteistön omistajille.

Haastateltava kertoi tutkimuksesta, joka teetettiin kaksi vuotta sitten työnantajansa toimesta pohjautuen normaaleihin kuluttajiin ja rakennettuun ympäristöön. Jos 90 % vietetään sisätiloissa, niin millaisia on hyvät kodit, työpaikat ja rakennukset ylipäättään. 2020 kesänä tutkimus tehtiin uudelleen. Tuhannelta tavalliselta kansalaiselta kysyttiin, että näkevätkö he yhteyden ilmastonmuutoksen hillinnän ja rakennetun ympäristön välillä. Kyllä-vastauksien osuus oli 67 prosenttia. Samalla kysyttiin, että mitkä ovat keinot vähähiiliseen rakentamiseen pääsemiseksi. Keinoiksi tunnistettiin muun muassa rakennusten pidempi elinkaari ja paikallisten rakennusmateriaalien hyödyntäminen. Kokonaisuutena tulos oli merkittävä, jos kaksi kolmasosaa tavallisista kansalaisista ymmärtää tässä yhteyden.

Seuraavana teema haastateltavalta kysyttiin vähähiilisyys tulevaisuudesta. Haastateltava asiantuntija ajattelee, että materiaalneutraalius ei ole pelkkä sementti, teräs ja puu.

On myös tulevaisuuden materiaaleja, mistä emme edes vielä tiedä. Esimerkiksi uusio-betonit, vähähiiliset ja vaihtoehtoiset sideaineet. Kaikkia tullaan tarvitsemaan ja kaikkien on tehtävä töitä tämän asian eteen. Samalla kaikkien on saatava kilpailuetu. Ei ole oikein ajatella, että teräs-, sementti- ja betoniteollisuus ratkaisevat tämän ja kenenkään muun ei tarvitse tehdä yhtään mitään. Jos katsotaan rakennettua ympäristöä isossa mittakaavassa ja yhtä rakennushanketta, niin perspektiivi muuttuu.

Yrityksen isoa kuvaa on lähdetty nyt rakentamaan. Laskennassa tarkastellaan raaka-aineita ja mistä ne tulevat. Tarkoituksena on rakentaa tiekartta, jossa on keinot tavoitteisiin pääsemiseksi. Tavoitteet on asetettu sekä suorille että epäsuorille päästöille, joka tarkoittaa, että jokin päivä kaikki tuotantolaitokset ovat päästövapaassa sähkössä. Tanskassa ja Norjassa toimivat tehtaot pilotteina. Haastateltava kertoo, että pohjoismailla on tiukka kilpailuympäristö, sillä töitä asian eteen tehdään eri tahtia maailmassa. Keinojen selvittäminen vaatii yhteistyötä toimittajien, kuljetuskumppaneiden, reseptiikan, raaka-aineiden ja vaihtoehtoiset raaka-aineiden välillä. Myös oman tuotannon energiatehokkuus on olennainen osa. Kompensointi on viimeinen keino. Prosenttiosuutena Saint-Gobainin suorat päästöt ovat noin 20% ja 80% tulee arvoketjusta.

EPD-ympäristöselosteet ovat myös Saint-Gobainille tuttuja. Haastateltavalta kysyttiin näiden uusimisnopeudesta. Haastateltava kertoo, että kun reseptiikkaan tai energiapuolella tapahtuu suuria muutoksia, niin standardin mukaan on odotettava tietty aika ennen uusimista. Aika on 3 kuukautta tai vuosi. Jos tekee EPD:n kolmen kuukauden perusteella ja sillä on yli 20% vaikutus hiilijalanjälkeen, niin vuoden kuluttua laskelmat on tehtävä uudelleen. Esimerkkinä tästä toimii Gyprocin ja Isoverin uudet EPD -ympäristöselosteet, kun tuotannossa siirryttiin uusiutuvaan sähköön.

Haastateltava on rakentamisen monialainen osaaja, joten seuraava kysymys liittyi rakennusten mahdollisuuksiin sitoa hiilidioksidia. Henkilö kertoo esimerkkinä Green Building Councilin määritelmä hiilineutraalista rakennuksesta. Tämä käsittää hiilijalanjäljen ja -kädenjäljen eli betonin karbonisaatio on edelleen mukana.

Raaka-aineiden kierrätys ja kiertotalous liittyy osaltaan ympäristön kuormituksen hillitsemiseen. Haastateltava mainitsee, että vaihtoehtoisina raaka-aineina Weberille mietitään esimerkiksi betonimurskeen alitetta. Hollannissa on hyödynnetty kierrätettyä sementtiä, jossa mursketta on prosessoitu sementin kierrättämiseksi. Raaka-aineiden kohdalla myös hiekan käyttö ja kierrätys on tulevaisuudessa olennaista. Hiekka on toiseksi käytetyin luonnon resurssi puhtaan veden jälkeen. Yritys etsii hiekan korvikkeita. Esimerkiksi Nordkalkin sivukivi käy hiekan korvikkeena heille. Sivukiveä on jo pilotoitu ja testattu

tuotannossa. Näiden hyödyntämiseen vaikuttaa toistaiseksi monia asioita. Tällaisia ovat muun muassa jätedirektiivi ja rakennustuoteasetus, mainitsee haastateltava.

Yhtenä diplomityön osa-alueena on tarkastella vähähiilisen rakentamisen kustannuksia. Haastateltava mainitsee, että aikataulu ja kustannukset kulkevat usein käsi kädessä. Esimerkiksi jos weberille löydettäisiin hiekankorvike, niin se voi hetkellisesti nostaa kustannuksia. Tämä pitää jostain kuljettaa, mahdollinen prosessointi, kuivaaminen ja kuka sen tekee ja miten. Hetkellisesti kalliimpi raaka-aine, mutta pitkässä juoksussa kustannusten tulee tasaantua saatavuuden, hinnan ja muiden tekijöiden osalta. Tasapaino näiden löytämiseksi on vaikeaa, sillä onko asiakkaat valmiita maksamaan tällaisesta ja jos on, niin milloin ja minkä verran.

4.3 Valmisbetoni

Tässä kappaleessa kirjoitetut faktat perustuvat Ruduksen laatu- ja kehityshenkilöiden haastatteluihin. Ruduksen vihreä betoni on jo vuosia sitten kehitetty vähähiilinen betoni. Reseptiikka on vanha, mutta käyttö on ollut suhteellisen vähäistä vihreän betonin lujuu- denkehityksen hitauden ja rakentamisen perinteiden vuoksi. Ympäristöasiat ovat tulleet ohjaamaan myös rakennusalan valintoja ja kehitystyötä, jolloin vihreä betoni nostettu paremmin esiin. Vihreällä betonilla minimoidaan ympäristön kuormitus. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen tapahtuu uudella reseptiikalla ja kuljetusten optimoinnilla, joka onnistuu yrityksen laajan toimipisteverkon avulla.

Ruduksen hiilidioksidipäästöjen arvot on saatu Self Declaration -laskelmasta, jonka laskelmissa käytettävät lähtöarvot eri materiaaleille on tarkistettu kolmannen osapuolen toimesta. Normaalille CEM I betonille on laskettu arvo $281 \text{ kg/m}^3 \text{CO}_2\text{-eq}$. Vastaava arvo vihreälle betoni 40:lle on $158 \text{ kg/m}^3 \text{CO}_2\text{-eq}$ ja 60:lle $109 \text{ kg/m}^3 \text{CO}_2\text{-eq}$.

Betonin hiilidioksidipäästöissä suuri osuus aiheutuu sementin valmistusprosessissa. Vihreän betonin vertailukohtana käytetään tavallisella sementillä tehtyä betonia. Yksi haaste vihreällä betonilla on hitaampi lujuu- denkehitys kuin vertailubetonilla. Tavallinen C30/37 betoni on vuorokauden ikäisenä saavuttanut noin 12-18 MPa:n lujuu- den. Samassa ajassa vihreä betoni 40 on lujuudeltaan vain 8 MPa. Hitaammalla lujuu- denkehityksestä huolimatta loppulujuus kehittyy yleensä korkeammaksi kuin normaalilla betonilla. Myös ympäristön lämpötila vaikuttaa osaltaan lujuu- denkehitykseen.

Lujuu- denkehitys on sitä hitaampaa, mitä suurempi on betonin päästöalenema. Muut lujuu- denkehitykseen vaikuttavat tekijät ovat notkistimet, kiihdyttimet, ilman lämpötila, kos- teuspitoisuus, tuuli ja betonin jälkihoito (Rudus 2020). Hidas lujuu- denkehitys hidastaa

esimerkiksi muottikiertoa, jolloin lämmityksellä voidaan vaikuttaa lujuuden muodostumiseen. Lisälämmitys lisää rakenteen hiilidioksidipäästöjä, sillä lämmitys kuluttaa energiaa. Yrityksen oman arvion mukaan päästölisyys on noin 10 prosenttia laskettuna vertailubetonin kasvihuonepäästöstä.

Kehitystyö vihreän betonin parissa on edelleen käynnissä. Tällä hetkellä käytössä olevilla toimivilla vihreillä betoneilla voidaan saavuttaa maksimissaan 60 % päästöalennus, kun tarkastellaan elinkaaren vaiheita raaka-aineen hankinnasta ja kuljetuksesta tuotteen valmistukseen eli tuotevaihe A1-A3. Yleisimmät käyttökohteet ovat valmisbetoni ja julkisivuelementit. Ominaisuuksiltaan vihreää betonia voidaan käyttää talonrakentamisessa kaikissa rasisluokissa, kun päästöalennus on 40 prosentti eli tuote on vihreä betoni 40. Vihreä betoni 60 soveltuu kaikkiin rasisluokkiin lukuun ottamatta luokkia XF2 ja XF4. Valmius toimittaa ympäristöä vähemmän kuormittavaa betonia on hyvä, sillä Rudukselle vihreä betoni on normaali tuote.

Tuotekehityksen parissa Rudus tutkii vihreän betonin kovettumista ja sen nopeuttamista, kuivumista ja kutistumista. Tutkittua tietoa saadaan koko ajan enemmän, kun testijaksot etenevät ja käyttökohteet laajenevat. Muun muassa kuivumis- ja kutistumismittaukset jatkuvat Ruduksen toimesta vähintään vuoden. Tutkimuksissa on saatu jo 91 päivän ikäiselle vihreälle betonille 65-62 MPa:n lujuuksia, riippuen päästövähennysten määrästä betonissa. Tulevia tutkimuskohteita ovat uuden tyyppiset vihreät betonit, joilla pyritään saavuttamaan entistä korkeampia päästövähennyksiä ja parempia lujuusominaisuuksia. Ruduksen lisäksi rakennustuoteteollisuus RTT on vuonna 2011 testannut näitä betoni-laatuja.

Uusien ratkaisuiden parissa esiintyy aina toistaiseksi ratkaisemattomia haasteita. Vihreä betoni ei vaikuta rakenneteknisesti esimerkiksi mitoituksessa. Hitaampi lujuudenkehitys vaikuttaa työmaan toimintaan, sillä aikataulu- ja työmaasuunnittelu on tavallisella betonilla tutumpaa. Varhaislujuudenkehitys vaikuttaa myös jälkihoidon suunnitteluun ja toteutukseen.

4.4 Terästuotanto

Terästuotanto vaikuttaa osaltaan asuinrakennuksen kasvihuonepäästöihin. Suurin osuus terästuotteilla on betonielementtien raudoituksessa. Diplomityössä haastateltiin Celsa Steel Servicen toimihenkilöä, joka toimii yrityksen myynti- ja markkinointiosastolla.

Ensimmäinen kysymys pohjautui yrityksen kestäväen kehityksen toimiin ja strategiaan. Haastateltava kertoi, että ympäristöseloste EPD on ollut voimassa jo noin viisi vuotta. Nyt EPD:stä on tehty ensimmäinen revisio, joka on uusimman ISO 14025 standardin

mukainen. Vastaavia selosteita ei vielä toistaiseksi muilta betoniterästoimittajilta löydy. Tämän vuoksi vertailukelpoisuus eri ympäristöselosteiden välillä on huono. Yritykselle uusi seloste on erittäin tärkeä, vaikka hiilijalanjälki hieman kasvoi kiristyneiden vaatimusten vuoksi. Vuonna 2012 julkaistun EPD:n ilmastonmuutos on ollut 420 kg CO₂ ekv./tonni. Tuoreen julkaisun ilmastonmuutos on 456 kg CO₂ ekv./tonni. Molemmat sijoittuvat tuotevaiheeseen A1-A3.

Jos vastaava seloste tehtäisiin Baltiassa tai muissa vastaavissa maissa, joissa on perusteellisuutta, vastaava luku voisi olla 66% tai puolet enemmän? Celsan Mo I Ranan tehtaan alhainen luku perustuu esimerkiksi vesivoiman käyttöön. Raaka-aine on pitkälle romupohjainen ja se sulatetaan sähköllä, jolloin sähkön tuotto on kaikkein tärkein tekijä päästöjen vähentämisessä.

Aihe on myös tärkeä jatkossa, sillä tämän ja ensi vuoden aikana parannetaan ja on parannettu terästehtaan toimintaa. Haastateltava kertoo, että ensi kesänä yritys julkaisee uuden revision EPD:stä, koska muutoksilla saadaan aikaan huomattava päästöjen pudotus. Muutokset koskevat muun muassa terästehtaan energiapuolen parannuksia. Odotettavissa on jopa 20 prosentin pudotus hiilijalanjälkeen. Samalla panostetaan myös pieniin tekijöihin, joita ovat muun muassa aurinkokennot ja led-valaistus.

Haastateltava henkilö kertoo myös organisaationsa tavoitteista. Celsa Nordicilla on julkiset kestävä kehityksen tavoitteet vuosille 2030 ja 2050. Yksi iso tavoite on nolla hiilijalanjälki vuonna 2050. Samalla tavoitellaan 70 % vähemmän paikallisia päästöjä. Tavoitteena on täysin suljettu materiaalikierto, joka on jo nyt hyvin lähellä kierrätysasteen ollessa 95 %. Tavoitteena on myös fossiilittomat sisäiset ja ulkoiset kuljetukset. Kuljetusten tehostaminen esimerkiksi laivoilla tarkoittaa sitä, että kun terästä tuodaan Suomeen niin paluumatkalla laiva vie romua tehtaalle, jotta laiva ei kulje tyhjänä.

Päästöjen pienentämiseen pyritään usein materiaalimenekin pienentämisellä. Yritys pyrkii optimoimaan projekteissa työn osuutta. Vähentämällä rakentamiseen kuluvaa aikaa saataisiin säästöä myös päästöissä. Kun työn määrä optimoidaan minimiin, kuluu materiaalia 5-8 % enemmän. Rakenteita tehdään komponenteista, jolloin työn nopeus on voi kasvaa 3-6 kertaiseksi perinteiseen raudoittamiseen verrattuna. Yritys kokee, että resurssien säästöllä vaikutetaan enemmän kestävään kehitykseen kuin pelkällä materiaalin minimoinnilla. Ensisijainen tavoite onkin kaikin keinoin lyhentää raudoitusaikaa, jonka kautta rakentamisen aika vähenee. Raudoittaminen on perinteisesti koettu tahdistavaksi työvaiheeksi, mutta yritys pyrkii aktiivisesti pois tästä ajatuksesta.

Haastateltava kertoo, että usein materiaalin minimointi hankaloittaa työtä, jolloin työn osuus kasvaa ja rakentamisaika pitenee. Tyypillinen esimerkki tällaisesta tilanteesta on

irtoterästen kanssa, jotka asetetaan yksitellen. Jos nämä halutaan komponentiksi, niin teräkset on sidottava valmiiksi toisiinsa, esimerkiksi poikittaisella teräksellä. Tällöin poikittaiset teräkset tuovat lisää materiaalia, mutta asennusaika voi olla kuusinkertainen irtoteräsvaihtoehtoon verrattuna.

Yksi kysymys tarkasteli yrityksen mahdollisuuksia valmiiksi suunniteltujen raudoitusten kanssa. Haastateltava kertoo, että tällä hetkellä noin 15-20 % raudoitteista on komponentteja. Raudoiteverkot mukaan luettuna osuus on vielä suurempi. Muuntosuunnittelu voi suunnitella asuinrakentamiskohteiden välipohjat komponenteiksi lähes 100 prosenttisesti. Ensimmäiset kerrokset ja väestönsuojat ovat haastavampia aikataulusyistä, mutta välipohjat sopivat komponenttiraudoiteille erittäin hyvin. BAMTEC -mattoraudoite, reunahakakorit ja kaistaraudoitteet ovat esimerkkejä Celsa Steel Servicen raudoituskomponenteista, joilla pystytään tekemään melkein kaikki asuinrakennukset.

Komponentisointi ei ole kohdeyrityksen asumistuotannolle tuttua, joten seuraava kysymys liittyi komponentisoinnin kustannuksiin. Haastattelija kertoi, että tavallinen irtoraudoitus pätkittyinä tankoin maksaa noin 550e, elementteinä kustannus on noin 650-750e. BAMTEC -mattoraudoite maksaa noin 750e ja raudoitusverkot maksaa tällä hetkellä noin 600e. Hintaero ei ole valtavan suuri, mutta säästö työmaan yleiskustannuksissa on huomattava.

Yritys on lähtenyt kehittämään ympäristöä vähemmän kuormittavia tuotteita sillä ajatuksella, että he eivät tee tuottoa tällä. Oleellisempaa on henkinen puoli, jotta he voivat ylpeänä todeta näiden asioiden olevan kunnossa. Kestävä kehitys on tärkeää myös yrityksen imagon kannalta. Asioista ei haluta kaunistella, vaan faktat faktoina.

Kestävä rakentaminen on Suomessa vielä suhteellisen uutta, joten seuraava kysymys paneutui suurimpiin haasteisiin aiheen parissa. Haastateltava kertoi, että suurin haaste Celsa Steel Servicelle on kehityksen hitaus Suomessa. Ruotsi ja Norja on huomattavasti pidemmällä, sillä heillä aiheesta on keskusteltu vakavasti jo edelliset kaksi vuotta. Suomessa aiheesta ollaan periaatteessa kiinnostuneita, mutta todelliset teot vielä puuttuvat. Monin paikoin otetaan vain halvin ratkaisu. Yritys on tehnyt konkreettisia asioita kehittääkseen ja kehittyäkseen, mutta asia ei Suomessa vielä kiinnosta. Suomessa vain kaksi isoa rakennusyritystä ja muutama elementtitehdas on ollut kiinnostunut aiheesta.

Kohdeyritys tekee Celsa Steel Servicen kanssa yhteistyötä sekä talo- että infrarakentamisen parissa. Viimeinen kysymys paneutui näiden toimialojen eroon. Haastateltava kertoi, että tavoitteet ovat molemmilla luonnollisesti samansuuntaiset. Yritykselle infrapuoli on huomattavasti suurempi, sillä betoniteräksen menekki on suurempi. Infrapuolella saa-

vutettavat edut esimerkiksi rakentamisajan lyhentämisellä ovat talopuolta suurempia. Infrapuolella rakentamisaikainen jalanjälki on myös erilaisessa asemassa, koska käyttö ja ylläpito eroaa talopuolesta huomattavasti. Toistaiseksi infrapuoli ei ole ollut vielä aiheesta kiinnostunut.

4.5 Elementtirakentaminen

Välipohjien osuus kerrostalojen päästöissä on huomattava, joten haastatteluun toteutettiin Parma Oy:n kehitys- ja suunnittelutoimihenkilön kanssa. Vähähiilinen kehitystyö on aloitettu ontelolaattojen parissa, mutta yritys valmistaa lisäksi muun muassa tasolaattoja, hissikuiluja, väliseiniä ja kuorielementtejä, joita käytetään kerrostalorakentamisessa. Päästöjen vähentäminen tulee olemaan kaikkien rakenneosien tulevaisuuden kehitystyössä yksi osa-alue.

Lämpötilan vaihtelut Suomen olosuhteissa on aina otettava huomioon, joten betonivaatimukset ovat sisä- ja ulkopuolisille rakenteille erilaiset. Olosuhteet rakennuksen sisäpuolella on helpompi hallita, joten kehitystyötä on aloitettu sen vuoksi sisäpuolisista rakenteista. Haastateltavan henkilön mukaan betoninormien koostumusohjeet asettavat tietynlaisia vaatimuksia, jotka on huomioitava. Suorien testien kautta on mahdollista osoittaa kelpoisuus esimerkiksi pakkassuolarasituksessa, jolloin laskennallinen menettely voidaan ohittaa. Tämä perustuu säännöllisten pakkaskokeiden tuottamaan dataan.

Haastattelussa keskusteltiin kehitystyön suurimmista haasteista. Asiantuntijan mukaan haasteet liittyvät materiaalien hallintaan, joka tarkoittaa uutta betoniteknologiaa ja reseptikehitystä. Toinen haaste on markkinoinnissa ja kustannuksissa, sillä vähähiilisiin ratkaisuihin saattaa liittyä lisäkustannus. Ensimmäisten pilottihankkeiden jälkeen kehitystä ja markkinointia on jatkettava, jotta uudesta tuotteesta syntyy hyvä ja pysyvä tuote markkinoille. Markkinoiden valmius vastaanottaa uusi tuote on aina yksi haaste, jota on vaikea ennakkoon hahmottaa. Vähähiilisten tuotteiden markkinointi ja markkinaosuus poikkeaa tavallisista uusista tuotteista, sillä tulevat määräykset rakennusten päästöille myös pakkottaa alan toimijoita tähän suuntaan.

Haastateltava kertoo, että Parmalle elinkaariasiat eivät ole uusi asia, sillä asioiden parissa on työskennelty jo 20 vuotta sitten. Tällöin yrityksessä oli muun muassa oma elinkaari-insinööri. Kehitteillä oli muun muassa tuulettuva julkisivujärjestelmä, jossa paremmilla lämmöneristeillä ja vähemmällä riskeillä pyrittiin markkinoille. Samalla tehtiin erilaisia elinkaarianalyysyjä puhuen ekotehokkuudesta. Tällöin markkina ei ollut vielä valmis ja ns. läpimurto jäi tekemättä.

Nykyään tilanne on täysin eri. Parannuksia ekologisuuteen on tehty aiemmin jo tuotannossa ja Parma oli ensimmäisten yritysten joukossa tekemässä EPD -ympäristöselosteita 4-5 vuotta sitten, jolloin muut toimijat eivät niistä olleet vielä kiinnostuneita. Parma on ollut mukana kehittämässä myös päästötietokantaa ja laskentamenetelmiä. Yritys pyrkii myös julkaisemaan jatkossa vuosittain raportin ympäristötoimistaan, jossa voidaan esitellä konkreettisia tekoja.

Parman kehittämällä vihreän ontelolaatan päästölaskelmalla on kolmannen osapuolen tarkastus. Tavoitteena on saada tuote myös One Click LCA-ohjelman kirjastoon, jolloin sitä voitaisiin suoraan hyödyntää esimerkiksi tämä diplomityön laskelmissa. Inspecta valvoo Parman laatutoimintaa, esimerkiksi sementin määrää. Tulevaisuudessa ympäristöasioiden valvonta ja toteutuminen voi tulla samanlaisen valvonnan piiriin.

Suomessa käytettävillä betonituotteilla on oltava harmonisoitu tuotestandardi. Tuotestandardissa on määritelty leikkauskoetestit, jotka pohjautuvat perinteisiin ontelolaatan tuotehyväksynnässä. Ontelolaatta on optimoitu tuote, joka ei ole tavallisilla suunnittelu-säännöillä mitoitettu. Ontelolaatat ovat alun perin olleet Suomessa tyyppihyväksytyjä tuotteita, sillä laatoissa menee vaijerit vain yhteen suuntaan. Suunnittelunormit eivät hyväksy tällaista raudoitusta.

Tyyppihyväksyntä ontelolaatalle on perustunut tuotteen rakennetekniseen testaamiseen. Vaatimustenmukaisuus on määritelty nykyään standardeissa. Merkittävät muutokset poikkileikkauksessa tai betonin reseptissä edellyttävät uusia testejä. Nämä testit ovat esimerkiksi leikkaustaivutuskokeita lähellä tukea pistekuormalla. Parma tuottaa Suomessa kokeita jatkuvasti tuotteilleen, sillä heillä on oma testausasema. Viralliset kokeet on suoritettava 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille.

Consolis Parma on lanseerannut markkinoille vihreän ontelolaatan, jonka hiilidioksidipäästöt ovat 40 prosenttia tavallista ontelolaattaa pienemmät. Muutos perustuu ympäristöystävällisempään valmistustekniikkaan, joka tarkoittaa raaka-aineiden tehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää käyttöä. Tavoitteena on ollut tuotekehityksen ja valmistustekniikan muovaamisen avulla vähentää päästöjä, joten päästökompensaatiot eivät olleet vaihtoehtona ympäristön kuormitusta vähentäessä. Parman perinteisen ontelolaatan hiilidioksidiekvivalenttiluku on $65 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}_2$ ja uuden vihreän ontelolaatan $37 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}_2$.

Uusien tuotteiden kohdalla tulevaisuus on aina avoinna. Haastateltava nimeää tulevaisuuden kysymyksiksi muun muassa kustannukset suhteessa markkinan vastaanottoon,

valmistusprosessikierron sujuvuus ja nopeus sekä tuotteen käyttövolyymi. Tuotteen valmistaja vastaa markkinoiden kysyntään, mutta toistaiseksi on vaikea arvata markkinoiden innostus tälle tuotteelle.

Parmalla on halu ja kapasiteetti tuottaa vihreää ontelolaattaa suurempiakin määriä, ilman että tämä vaikuttaa muuhun tuotantoon. Yritys on investoinut uusiin laitteisiin ja koneisiin, joka helpottaa materiaali osa-alueen kehitystä. Uusilla koneilla varianssi on pienempi, joka osaltaan edistää luotettavaa kehitystyötä.

Kehitystyö vaikuttaa osaltaan myös raaka-aineisiin, joka on yksi muuttuva kustannuserä tuotteiden valmistuksessa. Haastateltava henkilö vakuuttaa, että tätäkin osa-aluetta on pohdittu. Parma on alan iso toimija, jolloin heillä on kokonsa myötä paremmat mahdollisuudet varmistaa raaka-aineen saatavuus ja kustannusten stabiilius. Yhteistyö pohjoismaiden välillä on mahdollista ja järkevää tiettyyn pisteeseen asti.

4.6 Suunnitteluratkaisuiden vaikutukset hiilijalanjälkeen

Haastatteluun pyydettiin Sitowise Oy:n rakennesuunnittelijaa. Vähähiilinen rakentaminen tapahtuu materiaalityöimittäjien ja urakoitsijoiden lisäksi eri suunnittelijoiden työpöydällä. Haastatteluun valittiin rakennesuunnittelija, sillä eri välipohjaratkaisut ja niihin vaikuttavat tekijät linkittyvät hänen ammattitaitoonsa.

Ensimmäinen kysymys liittyi rakennesuunnittelun vaihtoehtoihin hankkeiden hiilipäästöjen vähentämiseksi. Haastateltavan henkilön mukaan vaihtoehtoja on paljon. Isoin ongelma on suunnittelijoiden tietotaito ja kiinnostus aiheesta. Harva suunnittelija ottaa millään tavalla huomioon työssään hiilijalanjälkeä eli se ei ole yksi suunnittelun lähtökohta.

Tilaa voi asettaa kuitenkin tämän yhdeksi suunnittelun lähtökohdaksi. Jos suunnittelija haluaa miellyttää rakentajaa, pyritään suunnittelussa mahdollisimman helppoihin lopputuloksiin. Esimerkiksi paikallavalurakenteessa saatetaan laittaa enemmän rautaa, jos ne ovat toistuvia. Tällöin niitä on helppo asentaa, kun kuvia ei tarvitse katsoa koko ajan ja ei tule virheitä. Elementeissä suositaan normaalirauδοituksia, jolloin ei tarvitse laskea paljoa. Pohjakerrokset tarkastetaan laskien ja muut saadaan ns. hihavakioilla.

Haastateltavan mukaan suunnittelijoille ei makseta muusta kuin tästä perustyöstä. Suunnittelupalkkioissa ei olla otettu huomioon, että he optimoisivat hiilijalanjälkeä. Esimerkiksi perustuksia pystyttäisiin optimoimaan. Paalumäärän kriittisellä tarkastelulla tai anturoiden teräsmäärillä voitaisiin vaikuttaa hiilijalanjälkeen. Anturoiden teräsmäärä verrattuna betonin määrään vaikuttaa enemmän hiilijalanjälkeen haastateltavan omien laskelmien mukaan.

Yksi tekijä on rakennejärjestelmävalinta, jotta pystytään käyttämään mahdollisimman paljon muuta kuin betonia. Esimerkiksi kevyiden julkisivujen rakentaminen puulla ja betonisten sisäkuorten poisjättäminen. Toinen vaihtoehto on talon jäykistäminen esimerkiksi käyttämällä CLT- massiiviväliseiniä betoniseiniä lisäksi.

Normaalisti ympäristöministeriön laskennassa ei oteta huomioon hiilikädenjälkeä, mutta kokonaislinkaarilaskennassa tämä otetaan huomioon. Tällöin puu voittaa aina betonin, vaikka käytettäisiin vihreää betonia tai vihreää terästä. Melkein kaikki tuotteet ovat uusia ja niistä tiedetään toistaiseksi melko vähän. Yhteenvedona suunnittelijalla on siis paljon vaihtoehtoja ottaa hiilijalanjälki huomioon.

Haastateltava kertoo myös aikataulullisista haasteista. Vaiheistus on myös yksi ongelma. Normaalisti, kun rakennesuunnittelija liitetään mukaan kohteeseen, niin runkojärjestelmä on jo päätetty. Arkkitehti on myös päättänyt julkisivumateriaalin. Myös rakennuksen massoittelulla voidaan vaikuttaa hiilijalanjälkeen. Julkisivun suunta, ikkunakoot ja varjostukset vaikuttavat lämmitysenergian määrään, joka vaikuttaa osaltaan kohteen hiilijalanjälkeen. Käytännössä rakennesuunnittelijan mahdollisuus vaikuttaa hankkeen hiilijalanjälkeen vaatii hänen osallistamistansa aikaisemmassa vaiheessa.

Rakennesuunnittelija voi määrittellä arkkitehdille muutamia reunaehtoja, jos halutaan pienempi hiilijalanjälki. Samalla pyritään vaikuttamaan materiaalivalinnoilla ja yhdessä pohdimalla esimerkiksi vihreän betonin käyttöä. Arkkitehdin suunnittelemat ratkaisut saattavat edellyttää raskaita teräsrakenteita, jotka osaltaan vaikuttaa paljon hiilijalanjälkeen. Hiilijalanjälki tulisi siis ottaa myös suunnittelussa huomioon mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Normaalisti, kun rakennesuunnittelijat liittyvät hankkeeseen, odotetaan heiltä urakkakuvia ja arkkitehtikuvat ovat jo valmiita.

Haastateltava pyrkii omissa yhteistöissään laittamaan jo hankevaiheessa ns. jalkaa oven väliin ja tarjoamaan alustavaa suunnittelua. Tämä on myös tilaajan etu, kun runkojärjestelmä on optimoitu ja kalliit paikat on heille esitelty. Yleisesti tiedetään, että jos joudutaan tekemään paljon erikoissuunnittelua, niin siitä tulee myös kallista. Jokin asia voi näyttää helpolta, mutta esimerkiksi liikuntasaumot tai tukirakenteet saattavat helposti unohtua ja nämä nostavat kustannuksia.

Toinen kysymys liittyi betonin määrän vähentämiseen erilaisissa rakenteissa. Ensimmäinen keino haastateltavan mukaan on betonirakenteiden korvaaminen puurakenteilla. Tämä on täysin mahdollista, kysymys on vain tahdosta. Muutos vaatii rakentajalta enemmän tietotaitoa. Tietotaito kuitenkin lisääntyy, kun niitä aletaan tekemään enemmän. Myös suunnittelijalta vaaditaan enemmän, jotta hän osaa yhdistää kahta erilaista materiaalia ja detaljeja vaaditaan tavallista enemmän. Suomen rakennusmääräykset ajavat

äänen- ja palomääräysten vuoksi rakenteet tietyn paksuisiksi betonin osalta. Tällöin mahdollisuuksia betonin vähentämiseen on melko vähän.

Yksi mahdollisuus on myös elementtien 3D-tulostus. Haastateltava kertoo suomalaisesta yrityksestä nimeltään Hyperion Robotics. 3D tulostusta voidaan hyödyntää esimerkiksi pilarirakenteissa, joissa ei ole ääni- ja palovaatimuksia. Näin on pystytty pudottamaan betonin määrän puoleen, kun betonia on tulostettu vain niihin kohtiin, jossa sitä tarvitaan.

Haastateltava kertoo myös erilaisista ontelorakenteista, jotka ovat yksi mahdollisuus betonin menekin vähentämiseksi. Ontelolaatoista pystyy tekemään seiniä, joita kutsutaan ontelopalkeiksi. On olemassa erilaisia ontelorakenteita, joissa massan määrä on pienempi. Nämä rakenteet ovat palovaatimusten osalta toimivia, mutta ääneneristävyydessä tulee ottaa enemmän asioita huomioon. Koska nämä eivät ole normaalisti käytettäviä rakenteita, on aina olemassa riski, että miten elementit onnistuvat. Myöskään käytökokemusta ei vielä juurikaan ole näiden osalta. Pientuotannossa käytetään paljon erilaisia materiaali- ja rakenneratkaisuja. Näissä ääni- ja palovaatimukset ovat huomattavasti helpommat, jolloin vaihtoehtoja on enemmän. Toimistorakenteissa pystyy vapaammin käyttämään erinäisiä ratkaisuja, mutta palomääräykset ovat vielä asuintalojakin tiukemmat.

Yksi tarkasteltava osa-alue on haastateltavan mukaan julkisivut. Tavallisessa rakentamisessa talot ovat suhteellisen pitkiä ja väliseinät ovat kantavia, jolloin kantamattoman julkisivun osuus on suuri. Näiden betonirakenteiden korvaaminen muilla ratkaisuilla vähentäisi huomattavasti betonin määrää. Tämä onkin haastateltavan mielestä ensimmäinen vaihtoehto, jonka avulla betonia voitaisiin vähentää.

Tiilijulkisivun korvaaminen puujulkisivulla, vaikka sen joutuu korjaamaan 20-30 vuoden kuluttua. Tämä ratkaisu on silti huomattavasti vähähiilisempi ratkaisu kuin tiilijulkisivu. Tavallisen tiilen hiilijalanjälki neliometriä kohden on $33 \text{ kgCO}_2\text{e}$ ja puujulkisivun koolaus sekä verhouslauta on $1,7 \text{ kgCO}_2\text{e}$.

Yksi mahdollisuus on myös aurinkopaneelijulkisivut. Tämä on käytännössä ilmainen julkisivu. Investointikustannuksiltaan kallein ratkaisu, mutta julkisivu maksaa itsensä takaisin. Julkisivun hiilijalanjälki nollaantuu energiatuotannon myötä.

Puurakentaminen nousi haastattelussa esille useampaan otteeseen, joten seuraavassa kysymyksessä pureuduttiin puurakentamisen mahdollisuuksiin. Rakennesuunnittelijalta kysyttiin mahdollisesta esteestä yhdistää puu- ja betonirakenteita samassa asuinkerrostalossa. Haastateltava kertoo, että estettä ei ole. Usein kysymys on kustannustehokkuu-

desta. Betonielementtejä tehdään niin paljon ja tehtaot ovat kehittyneitä. Betonielementtien neliöhinnat eivät ole järin suuria. Kukaan ei oikeastaan tiedä normaalihintaa CLT-elementille tai vastaavalle, koska niitä tehdään paljon vähemmän.

Matalassa rakentamisessa pystyy käyttämään puuväliseiniä kantavina rakenteina, vaikka tehtäisiin ontelolaatoilla välipohjat. Puuväliseinien leimapaine kestää kuorman. Tämä on kuitenkin rakennustapa, jota ei olla totuttu tekemään. Haastateltava mainitsee riskitekijöitä, kuten kosteus. Betonielementit tuodaan märkinä työmaalle, jolloin niiden pitää kuivua vielä työmaalla. Betonin kuivuminen vasten puuta ei ole hyvä ratkaisu. Toisaalta puu pitää palosuojata. Yhteenvetona siis täysin mahdollinen rakenne, mutta on olemassa vielä muutamia ratkaistavissa olevia ongelmia. Ratkaisuja voitaisiin saada esimerkiksi pilottikohteilla.

Haastateltava tiivistää, että ei ole pakollista muuttaa rakennuksen runkoa, mutta materiaalivalinnat, kevyet julkisivut, mahdollisesti kevyiden väliseinien rakentaminen muulla kuin teräsraangoilla ja kipsilevyillä. Kevyissä väliseinissäkin voidaan hyödyntää puuta, myös kylpyhuoneissa. Tämä vaatii parempaa huomioimista esimerkiksi vedeneritysten ja detaljien kanssa sekä betonin kuivuminen paikallavaletuissa kaatolattioissa.

Diplomityön yksi osa erilaisten rakenteiden vertailu. Suunnittelijalta kysyttiin rakenteiden paksuuksista ja mahdollisuuksista optimoida rakennepaksuuksia materiaalimenekin vähentämiseksi. Haastateltava kertoo, että erilaisia paikallavaluvälipohjia ja niiden paksuuksia on varsin helppo tutkia. Tämä on rakennesuunnittelijalta muutaman tunnin mientä tapauskohtaisesti. Myös yritys voi tilata suunnittelijalta kaksi eri vaihtoehtoa ja laskea itse varsin helposti One Click LCA:lla niiden eroavaisuus hiilidioksidipäästöjen kannalta. Näitä ei vain ole aiemmin edes kysytty.

Suunnittelijat pystyisivät myös suunnittelemaan vähähiilisempiä ratkaisuja, jos heillä olisi siihen aikaa. Käytännössä toimeksiannot, jotka ovat tavallisia suunnittelukohteita, niin suunnittelupalkkioihin ei ole laskettu muuta kuin kuvien tekeminen. Suunnittelijoille pitäisi siis varata aikaa ja rahaa rakenteiden optimointia varten.

Jos halutaan tehdä betonilla, niin palo- ja ääniteknisesti asuntojen välisen seinän on oltava vähintään 18 senttimetriä paksu täyttääkseen vaatimukset. Betonia ei palomääräysten puolesta tarvitsisi olla niin paljoa, vaan äänitekniset vaatimukset ovat tiukemmat. Ratkaisut perustuvat taulukkomitoitukseen, jotka ovat valmiiksi laskettuja arvoja. Haastateltava uskoo, että näissäkin vakio mitoissa olisi paljon parannettavaa. Tämä vaatisi vakioarvoille uuden tarkastelun.

Haastateltava kertoo, että yksi mahdollisuus väliseinien kaventamisessa on ääneneristävyyden korvaaminen jollakin toisella materiaalilla. Esimerkiksi jokin kierrätysmateriaali

voisi sopia äänenvaimennukseen. Mahdollisuuksia on myös luonnonmukaisissa materiaaleissa. Järviruo'olla on erittäin hyvät ääneneristävyyssominaisuudet. Toistaiseksi näiden kokeilu on vielä pientä.

Yksi ratkaisu on kaavoituksen mukana tulevat raja-arvot, jolloin ratkaisut olisi niin sanotusti pakotettua. Rakentamisen tahtia ei tarvitse hidastaa, mutta käytetään suunnitteluun muutama kuukausi enemmän aikaa. Haastateltava painottaa, että laadukkaalla yhteistyöllä suunnitteluun käytetty aika ei edes kasvaisi.

Osapuolten aikainen mukaan ottaminen ja suunnittelun johtaminen ikään kuin yhteistyöprosessina edesauttaisi vähähiilisempää rakentamista. Yhteiset tavoitteet ja kaikille yhtäläinen mahdollisuus vaikuttaa alusta asti suunnitteluun ovat avainasemassa. Rakenne- ja LVI-suunnittelun suurimpia haasteita voitaisiin ratkoa arkkitehdin kanssa jo hankevaiheessa. Hiilijalanjälkilaskentaa pystyy suorittamaan jo pelkästään arkkitehdin yhdellä pohjalla.

Haastateltava on itse luonut yrityksensä käyttöön prosessin, jolla pystyy arvioimaan(?) hiilijalanjälkeä eri runkovaihtoehdoille ennen kuin hankkeesta on edes kuvia. Aikaisessa suunnittelun vaiheessa tämä on ainut mahdollisuus vaikuttaa hankkeen hiilijalanjälkeen. Myös suunnitteluohjeilla voidaan vaikuttaa, mutta isoin mahdollisuus on eri suunnittelijoiden saumattoman yhteistyön parissa.

Viimeinen kysymys pohjautui vähähiilisen rakentamisen tulevaisuuteen ja innovaatioihin. Kaksi asiaa, joihin haastateltava uskoo, ovat työmaiden työn osuuden pieneneminen ja 3D-tulostus. Työmaat toimisivat ikään kuin kokoonpanolinjastoina, joissa tapahtuu vain asennus ja osat on valmistettu tehtaassa mahdollisimman hyvin ja tehokkaasti. Toinen tulevaisuuden mielenkiinnon kohde on 3D-tulostus työmaalla. Tulostuksessa on paljon potentiaalia, koska tällä valmistustavalla pystytään parametrisesti optimoimaan rakenteet ja vähentämään betonin sekä teräksen määrää. Onteloita voidaan jättää rakenteiden sellaisiin osiin, joihin ei kohdistu kuormaa. Kun katsotaan tämänhetkisten kantavien rakenteiden energiavuokaavioita, niin voidaan nähdä, että koko rakenne ei ole koskaan kuormitettu.

Haastateltava mainitsee myös parametrisen suunnittelun mahdollistaman rakenteiden, joka optimoiminen on yksi suunnittelun haara. Esimerkiksi 2D-suunnitelmista luodut 3D-suunnitelmat ja niiden mallintaminen. 3D-muodossa muokkaaminen on helpompaa ja esimerkiksi osien poistaminen tai paksuuden lisääminen on mahdollista. Samalla luotu malli saadaan One Click LCA:han laskettavaksi, koska malli pitää sisällään tuotetiedot.

Yhden päivän aikana voi luoda 20 eri mallia ja laskea näiden kasvihuonepäästöt. Nopeutettu optimointi tuottaa lisää vaihtoehtoja suunnitteluun. Tämä on vielä toistaiseksi alkuvaiheessa, mutta lisääntyy.

5. KASVIHUONEPÄÄSTÖJEN SIMULOINTI

Diplomityö rajattiin käsittelemään vaakasuuntaisia betonirakenteita. Ontelolaattarakenteista simuloinnissa tarkastellaan perinteisiä ja 43 % päästövähennyksen saavuttaneita ontelolaattoja. Paikalla valettavan välipohjalaatan osalta simuloinnissa käsitellään tavallisella sekä vähähiilisemmällä betonilla valettavaa rakennetta. Osassa laskelmissa on huomioitu myös deltapalkin muuttaminen vähähiilisemmäksi tuotteeksi. Käsiteltävät ratkaisut on kuvailtu tarkemmin kappaleessa 3.5 käsiteltävät rakenneosat ja tuotteet.

5.1 Simulointi One Click LCA-ohjelman avulla

One Click LCA-ohjelma on Bionovan omistama ja ylläpitämä rakennusten kasvihuonepäästöjen laskentaan kehitetty ohjelma. Kohdeyritys on valinnut ohjelman käyttöön koko konserniin, jolloin ohjelmaa on luonnollista käyttää myös tässä diplomityössä. Lisäksi ympäristöministeriö on ohjelman julkinen käyttäjä ja laskenta pohjautuukin ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyuden arviointiin. Käytössä on versio 30.8.2019.

Ohjelman tuottama laskelma antaa paljon dataa hankkeen vaikuttavuudesta. Laaja-alainen kuva hankkeen hiilipäästöistä koko elinkaaren ajalta ja siihen suurimmalla osuudella vaikuttavat materiaalit ovat tärkeimpiä tuloksia. Ohjelma jakaa tuloksia lukemattomiin kaavioihin ja kuvaajiin, jolloin saatu data on helposti esitettävässä muodossa.

Laskenta perustuu tietokantaan, joka sisältää tällä hetkellä yli 90 000 eri tietolähdettä. Tietokanta perustuu laatuun ja luotettavuuteen, sillä päästökseen tietokantaan on faktojen läpäistävä kymmenenvaiheinen tarkastusprosessi. Yksi merkittävin tietolähde on EPD-ympäristöselosteet, joita käsiteltiin tarkemmin tämän työn luvussa 2.2. Ohjelma sisältää myös EPD-selosteita, joita ei ole julkaistu yleisimmissä tietokannoissa, mutta ovat standardien mukaisia. Yksi laskentaohjelman ominaisuus on maakohtaiset keskimääräiset tiedot tuotteesta, joita voidaan hyödyntää silloin kun lopullinen käytettävä tuote ei ole vielä selvillä. Samalla ohjelma mahdollistaa tulosten paikallistamisen alueille, joissa ei ole kattavaa paikallista tietokantaa. Tällöin kompensatiomenetelmällä tuote saadaan vastaamaan esimerkiksi Suomen olosuhteiden vaatimuksia, jotta laskentatulokset olisi mahdollisimman todenmukainen (One Click LCA 2020).

Päästötietokannassa on rakennusmateriaalien lisäksi huomioitu energiankulutus ja työmaatoiminta halutulla ajanjaksolla erilaisilla taulukkoarvoilla. Taulukkoarvoja on luotu työmaakuljetuksille A4 ja uudisrakennuksen työmaatoiminnalle A5. Työmaakuljetuksille

on laskettu päästöarvo $10,20 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$, joka perustuu keskimääräiseen kuljetusetäisyyteen Suomessa. Työmaatoiminnot A5 päästövaikutus on taulukkoarvona $27,30 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$, perustuen energian ja polttonesteiden kulutukseen. Taulukkoarvot on esitetty Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmän julkaisussa, liitteessä 3. Elinkaaren lopussa oleville korjauksille, purkutyön kuljetuksille ja jätteenkäsittelylle on esitetty myös omat taulukkoarvot, joita ei kuitenkaan huomioida tässä työssä. (Ympäristöministeriö 2019)

Rakennushankkeen päästöjen laskentaa voidaan suorittaa eri vaiheissa, jolloin laskelman tarkkuuden taso vaihtelee. Ensimmäinen laskelma tehdään jo suunnitteluvaiheessa, vaikka keskeneräisten suunnitelmien vuoksi joudutaan tekemään monia yleistyksiä. Tulevaisuudessa tämän vaiheen laskennan merkitys tulee nousemaan. Valmistuneen projektin todelliset päästöt voidaan laskea hankkeen valmistuttua, kun käytetyt materiaalit ja määrät ovat selvillä. Tässä työssä lasketaan teoreettisen kohteen päästöjä betonisia rakenneosia muutellen. Teoreettisesta kohteesta saadaan tarkkoja määriä ja tuotteita, joita hyödynnetään laskennassa.

Kohde jaetaan kolmeen eri osa-alueeseen, joita arvioidaan. Yksi on tontin täyttö ja rakenteet, toinen arvioitava osa on rakennuksen kantavat ja täydentävät rakenteet. Talotekniikan merkittävimmät osa-alueet on kolmas arvioitava kohde. Mallinnus alkaa projektin luomisella ja perustietojen kirjaamisella. Olennaisimmat tiedot ovat bruttoala, käyttöikä ja arviointijakson pituus. Samalla valitaan menetelmäksi Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisuuden arviointi.

Ohjelma käyttää oletusarvoja materiaalien LCA-laskentaan, joita voi itse myös halutessaan säätää. Valitaan rakennusmateriaalien käyttöiän oletusarvoksi tekninen käyttöikä, joka on sama kaikille saman tyyppisille materiaaleille. Arvioitavia osia ovat sähkön, polttoaineiden ja lämmön kulutus. Myös kaukolämmön määrä arvioidaan, jos hanke on osa kaukolämpöverkkoa. Jos kohteessa on ulkopuolinen energianlähde, kuten aurinkokennot, arvioidaan energian määrä laskentaan. Ohjelma myös antaa keskiarvokulutuksia oman arvioinnin tueksi. Laskennassa käytettävät perustiedot ja oletukset on esitetty taulukoissa 2 ja 3.

Tämän työn kannalta tärkein laskennan osuus on rakennusmateriaalit. Materiaalit jaetaan viiteen eri osaan, jotka ovat: 1. perustukset ja maanalaiset rakenteet, 2. pystyrakenteet ja julkisivu, 3. vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit, 5. alue- ja piharakentaminen ja 6. rakennuksen talotekniikka. Numero 4. muut rakenteet ja materiaalit sisältää rakennuksen sisäpuolisia rakenteita, jotka eivät sisälly tähän työhön. Materiaaleja voidaan syöttää

esimerkiksi yksiköissä m^2 , m^3 , jm tai kg . Ohjelma kertoo tuotteen aiheuttaman kuormituksen suureella $kg\ CO_2e/m^2/a$ eli kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia lämmitettyä nettoalaa kohden vuoden aikana.

Työmaatoimintoja ei ole mahdollista syöttää tarkkoina lukuina. Siivous, erilaiset mittaukset sekä erilliset työkoneet ei ole mukana arvioinnissa. Myös telineet ja suojaukset, muotit ja väliaikaset rakenteet ovat laskennan ulkopuolella. Työmaalla kulutettu energia sisältää laskentaan, mutta työmaatilat eivät. (Ympäristöministeriö 2019)

5.2 Simuloitava kohde

Laskettava kohde on kohdeyrityksen yksi toteutettava kohde Vantaan Leinelään. Tässä työssä käytetään jatkossa termiä mallikohde, kun puhutaan laskennassa käytettävästä kohteesta. Todellinen kohde antaa yritykselle enemmän ja paremmin hyödynnettävää dataa. Laskettava kohde on myös hyvin tavallinen, jolloin laskenta ei muodostu liian haastavaksi.

Rakennuksen suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta. Rakenneosien käyttöiät on määritelty BY 47:n mukaan. Perutusten käyttöikä 100 vuotta, kantava runko 100 vuotta ja ulkoseinät 50 vuotta. Betonielementtien saumauksen käyttöikä vaihtelee 5-15 vuoteen.

Mallikohde sisältää kaksi kellaritonta 5-kerroksista asuinkerrostaloa. Tontille on suunniteltu myös kylmä pihavarasto, joka jätetään laskennan ulkopuolelle. Välipohjat ovat suunniteltu 370mm paksuilla ontelolaatoilla ja märkätilojen kohdalla on tekniikkalaatta. Ulkoseinien betonielementit ovat sandwich-elementtejä. Julkisivut ovat eristerapattua pintaa, paksuudeltaan 6-10 millimetriä. Lisäksi ensimmäisessä kerroksessa maalattua betonipintaa. Diplomityö on rajattu koskemaan vain tiettyjä rakenneosia, jolloin osa sisäpuolisista rakennusosista jätetään huomioimatta laskennassa. Kasvihuonepäästöihin vaikuttavat perusarvot, kuten sähkönkulutus, alat ja tilavuudet saadaan kuitenkin mallikohteesta. Taulukossa 2 on esitetty laskennan lähtöarvoja.

Taulukko 2. Mallikohteen perustietoja

Bruttoala	4396 brm^2
Hyötyala	3068 hym^2
Asuntojen lukumäärä	63
Asuinpinta-ala	3068 asm^2
Rakennuskuutiot	14 480 rm^3

Rakennusala	879,2 m ²
Tontin ala	4207 urm ²

Työssä ei tarkastella rakennuksen koko elinkaaren aikaisia kasvihuonepäästöjä, jossa energiamuodon valinnalla on iso merkitys. Mallikohde kytketään kaukolämpöverkkoon, joka voidaan tehdä eri vaiheissa hanketta. Tämä ja ulkoiset olosuhteet, esimerkiksi kovat pakkaset vaikuttavat osaltaan työmaa-aikaisen energian kulutukseen ja näiden päästöjen suuruuteen. Taulukossa 3 on esitetty mallikohteen energiankulutus, joka on saatu kohteen energiatodistuksesta.

Taulukko 3. *Mallikohteen energiankulutus*

Lämmitetty nettoala	3798,9 m ²
Sähkönkulutus (verkosta) vuosittain	152,862 MWh
Kaukolämmön kulutus vuosittain	281,572 MWh

5.3 Laskennassa tehdyt oletukset ja valinnat

Laskennassa joudutaan tekemään oletuksia ja vaihtoehtoisia ratkaisuja, sillä käytettyjä rakenneosia -ja tuotteita ei löydy ohjelman tuotekirjastosta. Mallikohde kohde toteutetaan kylpyhuone-elementeillä, mutta laskentaohjelma ei toistaiseksi tunne kylpyhuone-elementtejä. Kylpyhuone-elementtien lattia- ja laattamäärät saatiin elementtivalmistajalta, jotka syötettiin ohjelmaan. Lisäksi kylpyhuoneiden vedeneriste, kuusipaneelikatto ja pintabetonointi lisättiin omina riveinään. WC-istuimet ja WC:n lavaari lisättiin yksittäisinä resursseina laskentaohjelmaan.

Mallikohde toteutetaan ontelolaatoilla ala-, väli- ja yläpohjassa. Betoniraudoitusta käytetään tällöin perustuksissa ja elementtien pysty- sekä vaakasaumajuotoksissa. Kohteen väestönsuoja on paikalla valettava rakenne, joten merkittävä osa työmaan raudoituksesta kohdistuu väestönsuojaan. Lisäksi ontelolaatasto sisältää paikalla valettavan osan, joka on raudoitettava. Kaikki raudoitus on syötetty laskentaohjelmaan Celsa Steelin betoniraudoitetta, jonka lokalisaatio on paikallinen. Työmaalle tuotava valmisbetoni syötettiin päästölaskentaan normaalilla lujuudella, josta 10 prosenttia on kierrätetty. Syötetty valmisbetoni sisältää 240 kg sementtiä yhtä kuutiometriä kohden. Suurimmat me-

nekit valmisbetonille ontelolaattakohteessa on perustukset ja väestönsuoja. Myös pysty-
saumabetoni on syötetty päästölaskentaan valmisbetonina, lujuudella C27/30. Poikkeuk-
sena tästä on kaksi erilaista vaihtoehtoa välipohjissa käytettävälle valmisbetonille. Tässä
tarkasteltiin sekä betonia, jossa 0 % kierrätetty sekä betonia, jossa 10 % kierrätysaste.

Paikalla valettavat osat kuten perustukset ja väestönsuoja vaatii muottikalustoa. Lasken-
nassa ei ole huomioitu muottikalustoa, sillä Ympäristöministeriön laskentaohjeen mu-
kaan väliaikaisia materiaaleja ei huomioida. Muottikaluston määrän ja työstämisessä
syntyvän hukan arviointi on myös haastavaa. Kalustoa voidaan käyttää monessa va-
lussa huolellisen purun ja ylläpidon avulla, joten tämän osuus kohteen rakennusvaiheen
päästöistä on pieni.

Kuorilaatalle ei ole olemassa täysin vastaavaa tuotetta ohjelmassa, joten ne syötettiin
ohjelmaan ontelolaattoina. Muut ontelolaatat syötettiin Parman ontelolaattoina, sillä to-
dellisessa kohteessa käytetään näitä. Erikoislaatat, kuten palo- ja kololaatat syötettiin
tavallisina ontelolaattoina.

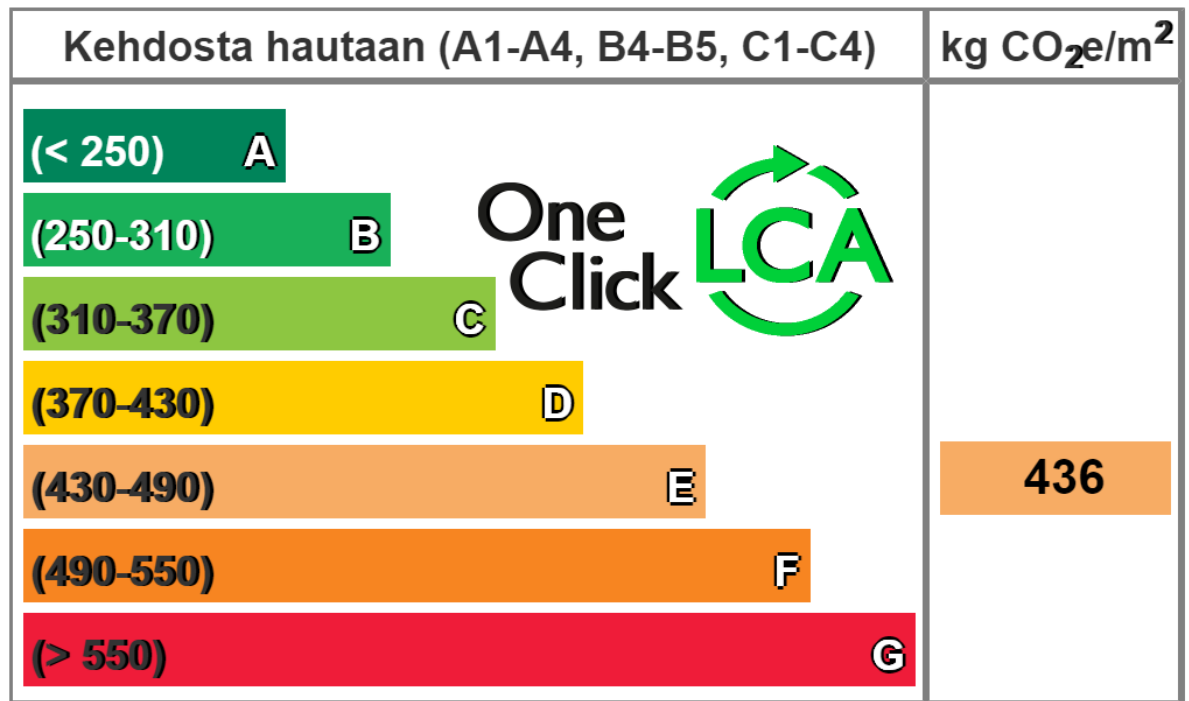
Vahvennetun rappauksen paksuudeksi arvioitiin 10mm, jonka laskentaohjelma antoi ole-
tuksena. Smyygirappaus muunnettiin juoksumetreistä neliöiksi, jolloin todellinen rap-
pausmäärä voi olla hieman eri. Ulkomaalaus on huomioitu päästölaskennassa, mutta
sisäpuoliset tasoite- ja maalaustyöt on jätetty laskennan ulkopuolelle. Julkisivujen pienet
osat, kuten raitisilmäsäleiköt ja luukut ei ole laskennassa mukana, kun taas parvekelasi-
tukset laskettiin 6 millimetrin paksuisilla lasilla.

Yleisten tilojen osalta laskennassa on huomioitu vain betoniportaot, alakatot, sisämetal-
liovet ja muovimatot. Asuntojen osalta laskettiin yllä mainittujen lisäksi kiintokalusteet,
puuikkunat ja -ovet, kerrostaso- ja parvekeovet, plaanotasoite sekä lautaparketti. Yleis-
ten tilojen talovarusteet, kuten matto- ja polkupyörätelineet sekä verkkokomerot eivät
olleet työn kannalta olennaisia. Väliseinärankojen juoksumetrimäärä muunnettiin kilo-
grammoiksi ohjelmaan valmistajan antamalla tiedoilla. Metallinen 2,72 metriä pitkä väli-
seinäranka painaa noin 1 kg. Laskennan ulkopuolelle jätettiin suihkutuki, pesuallastuki
ja kaappituki väliseinien yhteydessä.

Kohteen maanrakennustöiden osuus on verrattain pieni, sillä kohteen maanrakennustöi-
hin ei vaadittu paalutusta. Kohteen murske-, sora- ja sepelitäytöt on syötetty yksittäisinä
riveinä. Lisäksi pintamaan poisto on oma rivinsä, jossa pintamaan määrä on laskettu
poistettavan 0,2 metrin syvyydeltä. Raivausta ja maankaivuuta ei laskettu kohteen pääs-
töihin. Jätevesi- ja sadevesiviemäreitä sekä kaivoja ei huomioitu laskennassa. Louhin-
nan määrän epävarmuuden vuoksi myöskään louhintaa ei laskettu kohteen päästöihin.

5.4 Laskelman tulokset

Ensimmäinen kasvihuonepäästöjen laskentakierros suoritettiin mallikohteelle suunnitelmien ja määrälaskennan mukaan. Materiaalien hiilijalanjälki koko elinkaaren aikana on havainnollistettu kuvassa 4. Hiilijalanjälki voidaan jakaa elinkaaren eri vaiheille. Tuotevaiheen A1-A3 osuus on 78 %, tuoteosien vaihto B4-B5 osuus on 16% ja ulkoiset vaikutukset 6 %.



Kuva 4. Mallikohteen koko elinkaaren päästösumma.

Diplomityö rajattiin tarkastelemaan rakennuksen alkuvaiheen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä. Mallikohteen elinkaarenaikaisista materiaalien aiheuttamista kasvihuonepäästöistä 41,5 % syntyy raaka-aineen hankinnasta ja sen kuljetuksesta valmistukseen sekä itse tuotteen valmistuksesta. Taulukossa 4 on esitetty mallikohteen ilmaston vaikutuksen suuruus rakennuksen eri vaiheissa.

Taulukko 4. *Mallikohteen kasvihuonepäästöjen jakautuminen elinkaaren eri vaiheissa*

Vaihe	Ilmaston lämpeneminen [kg CO ₂ e/m ² /a]
A1-A3 Valmistus	6,84
A1-A5 Päästövaikutukset ennen käyttöä	7,78

B3-B4, B6	8,04
Päästövaikutukset käytön aikana	
C	0,67
Päästövaikutukset käytön jälkeen	
Yhteensä	16,49

Taulukossa 5 on esitetty näiden päästöjen jakautuminen rakenteittain. Suurin osuus on vaakaranteilla 42 prosentin osuudella. Pystyrakenteilla ja julkisivulla on myös suhteellisen suuri osuus, 25 prosenttia. Mallikohteen välipohja on suunniteltu ja siten myös laskettu 370 millimetriä paksuilla ontelolaatoilla. Päästölaskennassa on käytetty Parman ontelolaattoja, sillä laskettava kohde on toteutettu näillä ja laskelmasta haluttiin mahdollisimman todenmukainen. Vaakarakenteisiin lukeutuu myös ala- ja yläpohja, jotka on kohteessa toteutettu ontelolaatoilla. Vesikatto ja sen rakenteet sisältyvät vaakaranteisiin. Pystyrakenteiden ja julkisivun osuus 25 on suhteellisen suuri, joka selittyy muun muassa kantavilla betonielementtiseinillä ja julkisivurappauksella. Talotekniikka syötettiin Ympäristömenetelmän mukaisesti kuuden eri komponentin avulla. Näissä huomioidaan rakennuksen lämmitetty nettoala $3789,9 m^2$ ja järjestelmän käyttöikä. Ilmavaihtojärjestelmän, patteriverkoston, sähköasennusten ja kaapelointien, vesijohtojärjestelmän sekä viemäriputkiston käyttöikäksi määritettiin 50 vuotta. Lämmönjakokeskuksen, hissien ja ilmanvaihto- sekä LTO-koneen käyttöikäksi asetettiin 25 vuotta.

Taulukko 5. Mallikohteen tuotevaiheen päästöjen jakautuminen rakenteittain

Rakenne	Osuus [%]
Perustukset ja maanalaiset rakenteet	6
Pystyrakenteet ja julkisivu	25
Vaakarakenteet: pohjat, katot ja palkit	42
Muut rakenteet ja materiaalit	16
Alue- ja piharakentaminen	3
Rakennuksen talotekniikka	8

Kohteen kymmenen vaikuttavinta materiaalia on esitetty taulukossa 6. Eri betonituotteiden suuri osuus toimi yhtenä työn lähtökohtana, joten tulos oli odotettavissa. Leca kevytsoraa käytettiin kohteen väestönsuojan ja tasakaton eristyksessä. Betoniraudoituksen 2,1 prosentin osuus on suhteellisen pieni. Raudoitusta käytettiin vain ontelolaattojen saumoissa, anturoissa, paikalla valetussa väestönsuojassa ja asuntojen kylpyhuoneiden pintabetonoinnissa. Kymmenen eniten vaikuttavan materiaalin yhteenlaskettu prosentuaalinen osuus on 70,4.

Taulukko 6. *Kymmenen merkittävintä ilmaston lämpenemiseen vaikuttavinta materiaalia*

Resurssi	Vaikutus kehdolta portille (A1-A3) [tCO ₂ e]	Prosentuaalinen osuus [%]
Ontelolaatta	251	19,3
Valmisbetoni, normaali lujuus C20/25	140	10,8
Valmisbetoni, normaali lujuus C30/37	130	10,0
Betonielementtiseinä, eristämätön	126	9,7
Leca kevytsora	85	6,6
Betonielementtiseinä, esijännitetty kansilaatta	66	5,1
Ikkuna, kolminkertainen lasi, puualumiinikehys	38	2,9
Betoniraudoitus, yleinen	28	2,1
Ilmanvaihtojärjestelmä	26	2,0
Patteriverkosto	25	1,9

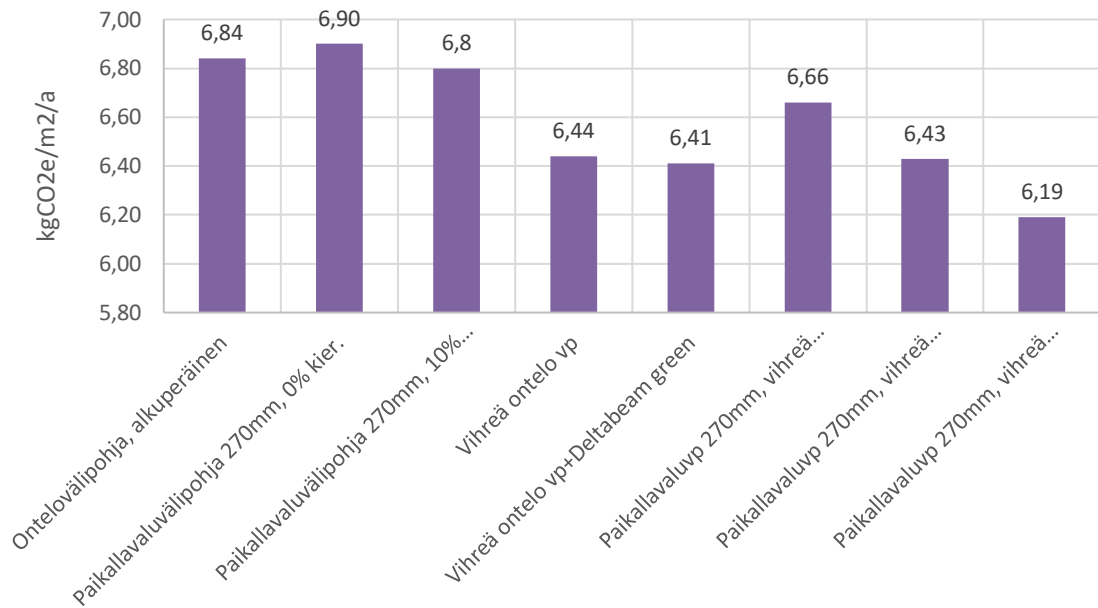
Valmisbetonin suurta osuutta selittää muun muassa perustusten betonointi, johon kuluu 218 kuutiota. Väestönsuojaan kuluu laskennallisesti noin 70 kuutiota betonia. Yksi suurimpia valmisbetonin menekkejä on ontelolaattojen saumajuotokset, jotka koostuvat sekä pysty- että vaakasaumajuotoksista.

5.5 Vaihtoehtoiset ratkaisut

Vertailuissa mallikohteen kaikki välipohjat vaihdetaan toiseen ratkaisuun. Vaihtoehtoisiksi ratkaisuiksi päätettiin Parma Oy:n julkaisema vihreä ontelolaatta, paikalla valettava massiivivälipohja sekä paikallavalettava massiivivälipohja Ruduksen vihreästä betonista. Vihreä ontelolaatta on ominaisuuksiltaan kuin tavallinen ontelolaatta, joten rakenepaksuus on sama kuin alkuperäinen 370 millimetriä. Vihreällä ontelolaatalla on 43 % pienemmät päästöt, kuin tavallisella. Laskentahetkellä vihreä ontelolaatta ei vielä ollut One Click LCA:n kirjastossa, joten laskennassa ontelolaattamääriä vähennettiin 43 prosenttia.

Paikalla valettavana välipohjana käytettiin kohdeyrityksen tuotteistamaa 270 millimetriä paksua laattaa. One Click LCA:ssa on käytössä yleinen Suomessa tuotettu valmisbetoni, joka ei ole yksittäisen toimittajan toisinkuin ontelolaatta. Kohdeyrityksen laskennan avulla ontelolaatoista on muokattu massiivilaattavälipohjia. Raudoitusmäärä laskettiin vakiolla $20 \text{ kg}/\text{m}^2$ ja betoni vakiolla $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Neliömäärinä käytettiin ontelolaattojen neliöitä. Käytettävää betonia voidaan varioida eri puristuslujuuksilla, raekoilla ja notkeudella. Valmisbetoniksi päätettiin C30/37, raekoolla 16 ja notkeudella S3. Tavallisen betonin vaihtoehtoista tarkasteltiin kahta eri laatua. Erona näissä on kierrätettyjen sideainneiden osuus sementissä, 0 ja 10 prosenttia. Tarkasteluun otettiin myös tapaukset, joissa valettava betoni on vihreää betonia. Vaihtoehtoina ovat betonilaadut, joissa päästövähennys tavalliseen betoniin on 20%, 40% tai 60%. Vihreän betonin tapauksissa käytettiin 0 prosentin kierrätysosuutta sementissä. Laskentaohjelma ei tunne vihreän betonin laatuja, joten tapaukset syötettiin vähentämällä betonin määrää 20, 40 ja 60 prosenttia.

Kuvassa 5 on esitetty eri ratkaisuiden vaikutus ympäristön lämpenemiseen tuotevaiheessa. Ontelolaattarakenteisessa välipohjassa on yhdeksän deltapalkkia, profiileiltaan D26-300, D26-400 ja D37-400. Paikallavalettavassa tapauksessa nämä on poistettu päästölaskennasta. Päästölaskennasta on poistettu myös saumaraudoitus ja -betonointi sekä kylpyhuoneiden pintabetonointi paikallavalettavan välipohjalaatan tapauksessa.

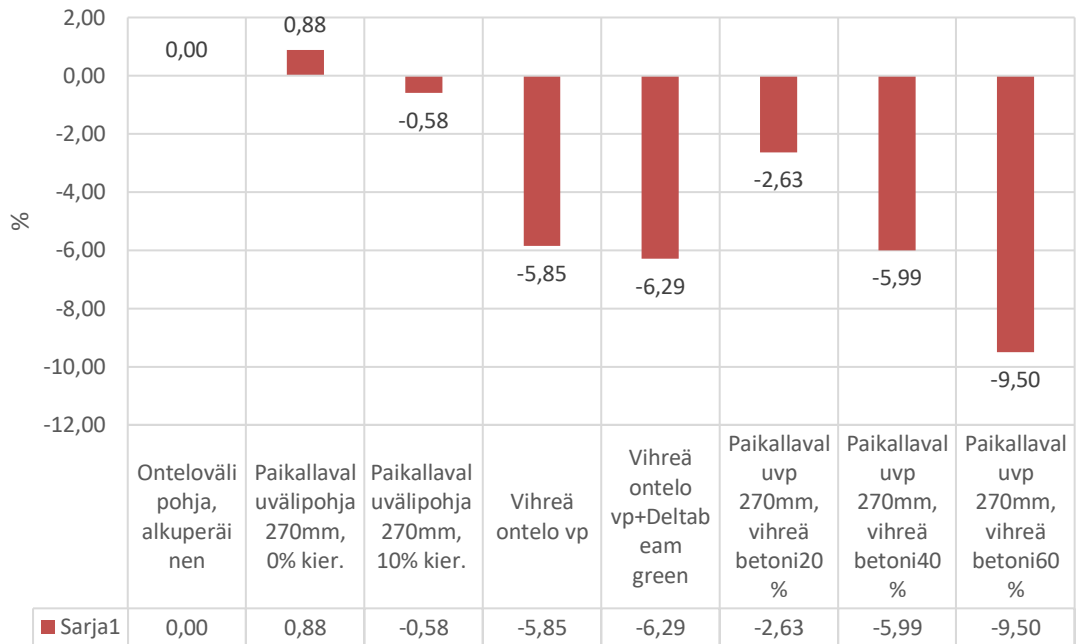


Kuva 5. Eri välipohjaratkaisuiden kasvihuonepäästöt tuotevaiheessa A1-A3.

Mallikohteen vaikutus ilmastoon on 6,84 kgCO₂e/m²/a. Ero paikallavalettavaan välipohjaan on 0,06 kgCO₂e/m²/a, kun tarkastellaan tapausta, jossa sideaineiden kierrätysosuus sementissä on 0 prosenttia. Prosentuaalinen ero on 0,88. Vastaava ero mallikohteen ja 10 prosentin kierrätysosuudella on 0,04 kgCO₂e/m²/a. Prosentuaalisesti ero on 0,58.

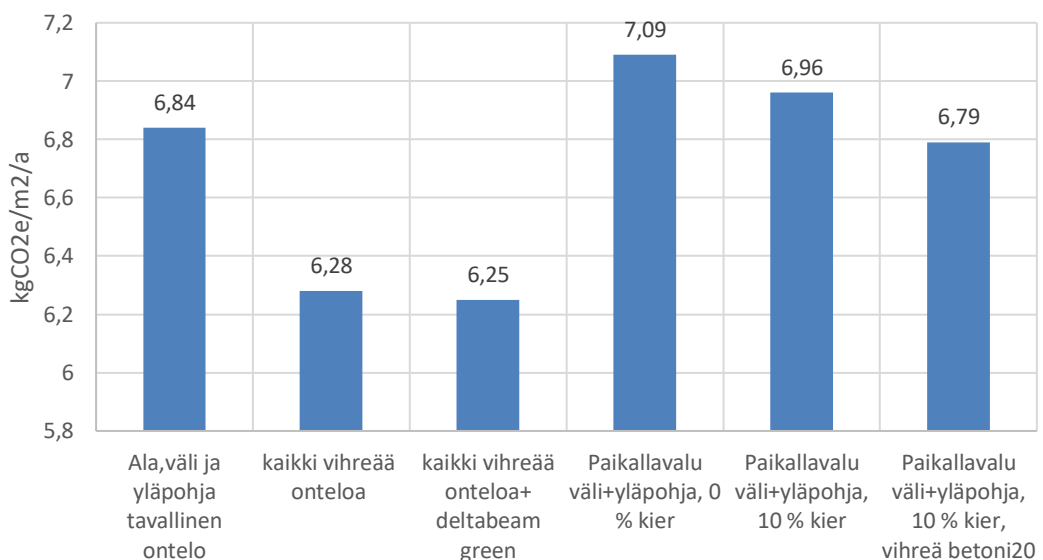
Alkuperäisen ja vihreän ontelon ero on 5,8 %. Päästövaikutuksissa ennen käyttöä huomioidaan valmistuksen lisäksi kuljetus työmaalle, rakennustuotteiden työmaahävikki ja uudisrakennustyömaan toiminnot taulukkoarvoina. Tavallisella ja vihreällä ontelolla on suuri ero juuri valmistusvaiheessa, joka näkyy moduulissa A1-A3 valmistus. Muut huomioon otettavat toiminnot ovat samat. Deltapalkin ja vihreän deltapalkin ero on 0,03 kgCO₂e/m². Suurempi ero näiden välille muodostuu kustannuksissa.

Tuloksista huomataan, että vihreä betoni 20:llä valettavan välipohjan vaikutus ilmastoon on 0,22 kgCO₂e/m² suurempi kuin vastaava rakenneosaa vihreillä onteloilla tehtäessä. Vihreä betoni 20:n ero tavallisella C30/37 betonilla valettavaan välipohjaan on 3,47 prosenttia. Vastaava ero vihreällä betoni 40:llä ja tavallisella betonilla on 6,8 prosenttia. Tarkastelussa oli myös vihreä betoni 60, jonka käyttö työmaalla on toistaiseksi haastavaa erittäin hitaan lujuudenkehityksen vuoksi.



Kuva 6. Välipohjaratkaisuiden päästöerot prosentuaalisesti tuotevaiheessa.

Päästöeroja välipohjaratkaisujen välillä on havainnollistettu kuvassa 6. Nollakohtana on alkuperäinen ontelolaattaratkaisu. Kuvasta nähdään paikallavalettavien välipohjien prosentuaalinen päästöjen kasvu verrattuna ontelokratkaisuun. Negatiiviset palkit kuvaavat, kuinka monta prosenttia välipohjaratkaisun kasvihuonepäästöt ovat pienemmät ennen käyttöä kuin alkuperäisellä ratkaisulla.



Kuva 7. Päästöerot ratkaisuille, joissa ympärille edullisempia tuotteita on käytetty välipohjan lisäksi myös ala- ja yläpohjissa (tuotevaihe A1-A3).

Mallikohteen ala- ja yläpohja toteutetaan myös tavallisilla ontelolaatoilla. Vaihtoehtoisessa ratkaisussa myös ala- ja yläpohjassa on hyödynnetty vihreää ontelolaattaa. Tämä pudottaa rakennuksen kasvihuonepäästöjä tuotevaiheessa 8,2 prosenttia. Jos vihreisiin onteloihin yhdistetään vihreät deltapalkit, on muutos päästöissä 8,6 prosenttia.

Tavallisesti paikallavalettavassa kohteessa välipohjien lisäksi myös yläpohja rakennettaisiin paikalla tehtävänä rakenteena. Usein alapohja on helpoin toteuttaa ontelolaattarakaisulla. Mallikohdetta tarkasteltiin tällaisella ratkaisulla, jossa alapohjajalatat toteutetaan ontelolaatoilla ja muut vaakarakenteet paikalla valettavilla laatoilla. Tällaisen ratkaisun kasvihuonepäästöt 0 % kierrätetyllä sementin sidosaineilla on 3,7 prosenttia suuremmat kuin alkuperäisellä ontelolaattarakaisulla. Vastaava luku 10 % kierrätetyillä sementin sidosaineilla on 1,8 %. Kuvassa 7 on esitetty myös ratkaisu, jossa paikalla valettavat rakenteet toteutettiin vihreä betoni 20:llä. Tämän ratkaisun ympäristövaikutus on 0,7 prosenttia pienempi kuin alkuperäisen ontelolaattakohteen.

6. AIKATAULU

6.1 Tahtituotanto

Tahtituotanto ja lean-ajattelu jalkautui rakennusorganisaatioihin 1990-luvulla (Pekuri, Herrala 2013). Toimintamallin kehittäjä on Taiichi Ohno, joka loi toimintamallin Toyotan autotuotannon käyttöön. Ajattelumallin lähtökohtana toimii idea jatkuvasta parantamisesta, jolloin tuotanto saadaan kulkemaan kuin juna. Tällöin työ, joka ei tuota lisäarvoa eli hukka, poistuu esimerkiksi rakennustyömaalta. (Liker 2004)

Tuottavuuden kasvu on yksi yhteiskunnan tärkeimmistä kehityskohteista. Rakennusala koetaan tavallisesti matalan tuottavuuden alaksi, johon on muun muassa lean-ajattelun kautta haettu ratkaisua. Jatkuvan parantamisen kautta pyritään hukan minimoimisen lisäksi myös laadun parantamiseen. (Womack & Jones 1996) Samalla rakennusyritys on huomannut kustannussäästön, joka saavutetaan lyhemmällä läpimenoajalla.

Tahtituotannon jalkauttaminen työmaiden aikatauluihin on edelleen haastavaa. Haasteena ovat esimerkiksi urakoitsijoiden ja työnjohtajien asenteet, häiriöherkkyys ja hankkeiden erilaisuus. Aliurakoitsijoiden sitoutuminen tahtituotantoon on ollut vaikeaa. Usein uudistukset koetaan vain haitaksi ja uudelle toimintamallille ei anneta mahdollisuutta. Samalla huonot kokemukset sekä itseltä että yhteistyökumppaneilta vaikuttavat osaltaan suhtautumiseen tahtituotantoa kohtaan.

		VIIKKO 48										VIIKKO 49																
		Torstai 19.11.2020		Perjantai 20.11.2020		Maanantai 23.11.2020		Tiistai 24.11.2020		Keskiviikko 25.11.2020		Torstai 26.11.2020		Perjantai 27.11.2020		Maanantai 30.11.2020		Tiistai 1.12.2020		Keskiviikko 2.12.2020		Torstai 3.12.2020		Perjantai 4.12.2020				
Nro	Tahti	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00	7:00	11:00			
2. Kerros märkätilat	A1	PH	Pintakupari					Paneelikatot																				
	A2	PH+S	Pintakupari						Alakatot, sauna ja kph														SU kalustus, siikoniit					
	A3	PH		Pintakupari					Paneelikatot																	SU kalustus, siikoniit		
	A4	PH			Pintakupari					Paneelikatot																	SU kalustus, siikoniit	
	A5	PH				Pintakupari					Paneelikatot																	
3. KRS / KUIVAT	A6	3HKT 68m ²										Plaanit- ja välilyvet																
	A7	2HKT+S 52,5m ²											Plaanit- ja välilyvet															
	A8	1HKT+AIK 33,5 m ²												Plaanit- ja välilyvet														
	A9	2HKT 44m ²		Parketti											Plaanit- ja välilyvet													
	A10	4HKT+S 95m ²			Parketti											Plaanit- ja välilyvet												
3. Kerros märkätilat	A6	PH						Pintakupari						Paneelikatot														
	A7	PH+S						Pintakupari																				
	A8	PH								Pintakupari																		
	A9	PH										Pintakupari																
	A10	PH+S	SAUNA									Pintakupari																

Kuva 8. Tahtituotantoaikataulu kohdeyrityksen todellisessa kohteessa.

Tahtituotantoa kuvataan usein junana, jonka vaunu on esimerkiksi yksi työvaihe. Juna liikkuu tasaisella syklillä eteenpäin, jolloin työvaihe toisensa jälkeen seuraa samassa tahdissa. Kohde jaetaan sopivan kokoihin lohkoihin, esimerkiksi asunnoittain, riippuen kohteen luonteesta. Kuvassa 8 on havainnollistettu tahtituotantoaikataulun rakennetta.

Aikataulu tahtituotannossa on usein suunniteltu päivälleen, jolloin pienikin häiriö muokkaa tätä. Häiriöt voivat olla esimerkiksi materiaalin saatavuus, sairastapaus tai olosuhteiden aiheuttama muutos. Kaikki näistä eivät ole ennakoitavissa tai estettävissä. Häiriön aiheuttama muutos on haastava kuroa kiinni, mutta aikataulun muuttaminen jokaisen häiriön kohdalla ei ole järkevää.

Paikallavalettavan rakenteen kiertopituudella on aikataulusta riippumatta suuri merkitys. Muottikierto pyritään saamaan aina viiteen päivään, sillä betonin lujuudenkehitys tahdistaa aikataulua. Kappaleessa 5.2 on tarkasteltu betonin lujuudenkehitystä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Kun muottikierto on maanantaista perjantaihin, pystytään viikonloppu hyödyntämään betonin kuivumisessa ja lujuudenkehityksessä.

Käytännön tasolla tämä tarkoittaa elementtiasennukselle kolmea päivää, jolloin elementtien asennus tapahtuu maanantaista keskiviikkoon. Samalla tapahtuu myös edellisen holvivalun muotin purku. Muotin rakennus, raudoitus ja LVS-työt vievät myös kolme päivää, tiistaista torstaihin. Betonoinnille on varattu yksi päivä eli perjantai.

Mallikohteessa paikallavalettavan välipohjalaatan koko on noin 366 m^2 per kerros. RT tietoväylän rakennustöiden menekit 2020 -kortissa on esitetty eri työsaavutuksille laskennallisia menekkejä. Levymuottityö sisältää esivalmistuksen, paikan mittauksen ja muotin pystytyksen. Muotin purulle ja puhdistukselle on erillinen laskettu menekki. (Ratu KI-6035)

Tarkastellaan uudiskohteen levymuottityön työmenekkejä T3. Laatan pystytysmenekki on $0,25 \text{ tth/muotti} - \text{m}^2$ (Ratu KI-6035). Tällöin tunnissa menekki on 4 m^2 . Kahdeksan tunnin työpäivän menekki yhdellä työntekijällä on 32 m^2 . Tällöin 4 työntekijää tekee muottia laskennallisesti kolmessa päivässä 384 m^2 .

6.2 Haasteet betonin kuivumisessa ja lujuudenkehityksessä

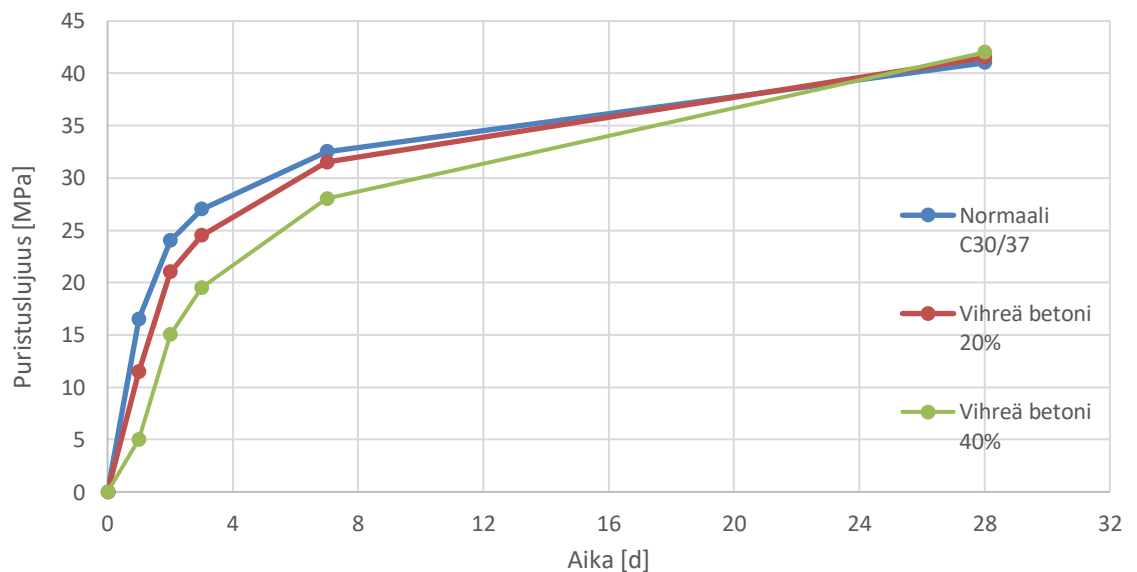
Betonin lujuudenkehitys on riippuvainen monista tekijöistä. Betonilaadun lisäksi ulkoiset olosuhteet kuten lämpötila, vaikuttavat prosessin pituuteen. Betonin kuivumiseen vaikuttavat tekijät ovat betonin laatu, kuivumisolosuhteet ja valettu rakenne. Talvibetonoinnissa olennainen tekijä on jäätymislujuus. Jäätymislujuus on 5 MPa. Jos valettu betoni pääsee jäätymään, muodostuu rakenteeseen jäälinsejä. Nämä muodostavat huokoisen

ja laadultaan heikon betonin, sillä runkoaineen, betonin ja raudoituksen tartuntapinnat muodostuvat heikkolaatuisiksi (Vuorinen 2012).

Muotinpurkulujuus on riippuvainen valettavasta rakenteesta. 270 millimetrin paksuisella paikallavaletulla välipohjalla muotinpurkulujuus saavutetaan, kun 70 % lujuudesta on kehittynyt (by 65 Betoninormit). Diplomityössä käytettiin valmisbetonina C30/37, jolloin muotti voidaan purkaa 26 MPa:n kohdalla. Muita lujuudenkehityksen kannalta tärkeitä termejä ovat jännituslujuus, kuormituslujuus ja lopullinen lujuus. Nämä ovat rakenne- ja tapauskohtaisia, joten ne eivät tutkimuksen kannalta yhtä olennaisia.

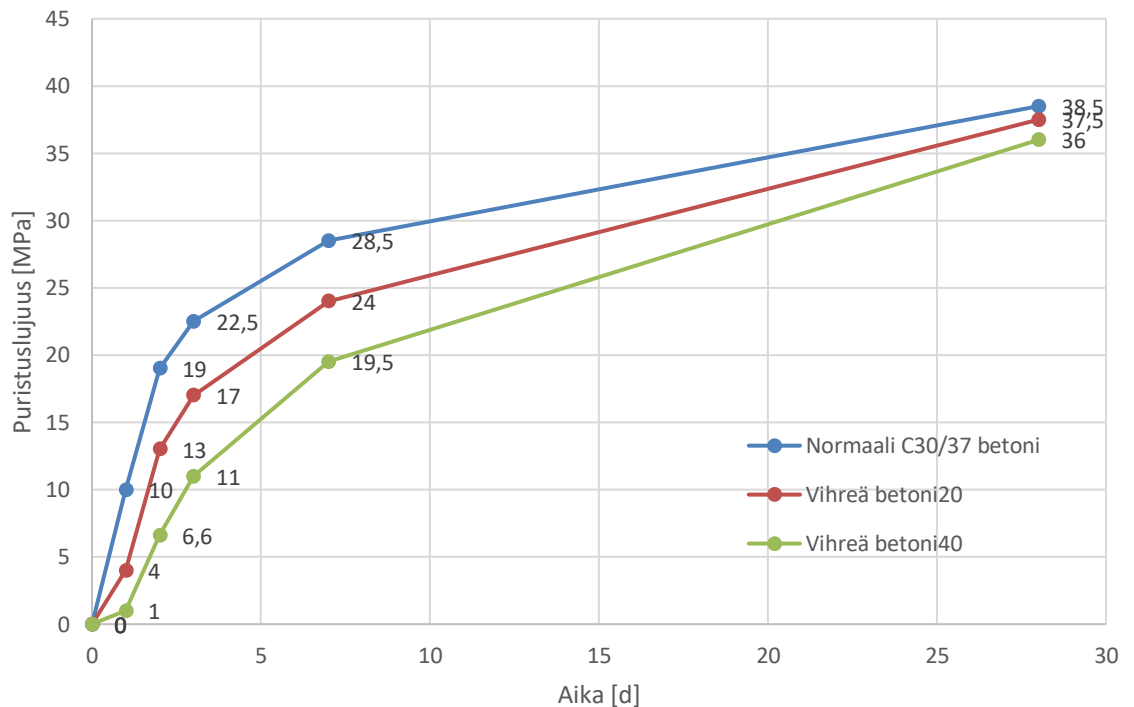
Lujuudenkehitykseen vaikuttavat betonin ja valutapahtuman olosuhteet, betonin vesi/sementti suhde, sementin tyyppi ja mahdolliset lisäaineet sekä betonin ilmamäärä. Jo aiemmin on esitetty sementin määrän vaikutus päästöihin. Sementtityypin valinnalla voidaan vaikuttaa lujuuden kehitykseen. Sementin pääajit jaetaan viiteen osaan: Portland-, Portland seos-, masuunikuona-, pozzolaani- ja seossementti. Näistä on muodostunut sementtituotteita, joiden ominaisuudet eroavat toisistaan. Esimerkiksi pikasementti on ominaisuuksiltaan erittäin nopeasti kovettuva. (Ruokonen 2020)

Rudus Oy mallinsi eri betonilaatujen lujuudenkehitystä diplomityötä varten. Kuvat 9 ja 10 perustuvat näihin mallinnuksesta saatuihin tuloksiin. Kuvassa 9 on esitetty tapaus, jossa mallikohteen välipohjalaatta valetaan päivälämpötilan ollessa korkeimmillaan 20 astetta. Tavallinen C30/37 betoni saavuttaa purkulujuuden kolmen päivän iässä. Vastaava lujuus saavutetaan vihreä betoni 20:llä neljän päivän kuluttua valutapahtumasta. Vihreä betoni 40 vaatii muotinpurkulujuuden saavuttamiseen kuuden päivän odotuksen valusta.



Kuva 9. Lujuudenkehitys päivälämpötilan ollessa korkeimmillaan + 20 °C.

Vastaavasti kuvassa 10 on tarkasteltu mallikohteen paikallavaletun välipohjan lujuudenkehitystä olosuhteissa, jossa päivälämpötila on maksimissaan + 10 astetta. Valettaessa välipohja normaalilla C30/37 betonilla, saavuttaa välipohja muotipurkulujuuden noin viiden päivän kuluttua valutapahtumasta. Kun käytetään näissä olosuhteissa vihreä betoni 20:tä, muotipurku voidaan aloittaa yhdeksän päivän kuluttua. Vastaavasti vihreä betoni 40 vaatii muotipurkulujuuden saavuttamiseen näissä olosuhteissa noin 15 päivää.



Kuva 10. Lujuudenkehitys päivälämpötilan ollessa korkeimmillaan + 10 °C.

Kuvissa 9 ja 10 ei ole huomioitu esimerkiksi tuulen ja sateen vaikutusta lujuudenkehitykseen. Myöskään jälkihoitoa ja muita lujuudenkehitykseen vaikuttavia tekijöitä ei ole mukana tarkastelussa. Betonin jälkihoidon tarkoituksena on estää veden haihtuminen valettavasta rakenteesta. Vaarana on kutistumisen aiheuttama halkeilu ja sementin kovettumisen häiriöt. Jälkihoidon kesto on riippuvainen rakenteesta ja ympäröivistä olosuhteista (Timonen-Nissi 2019).

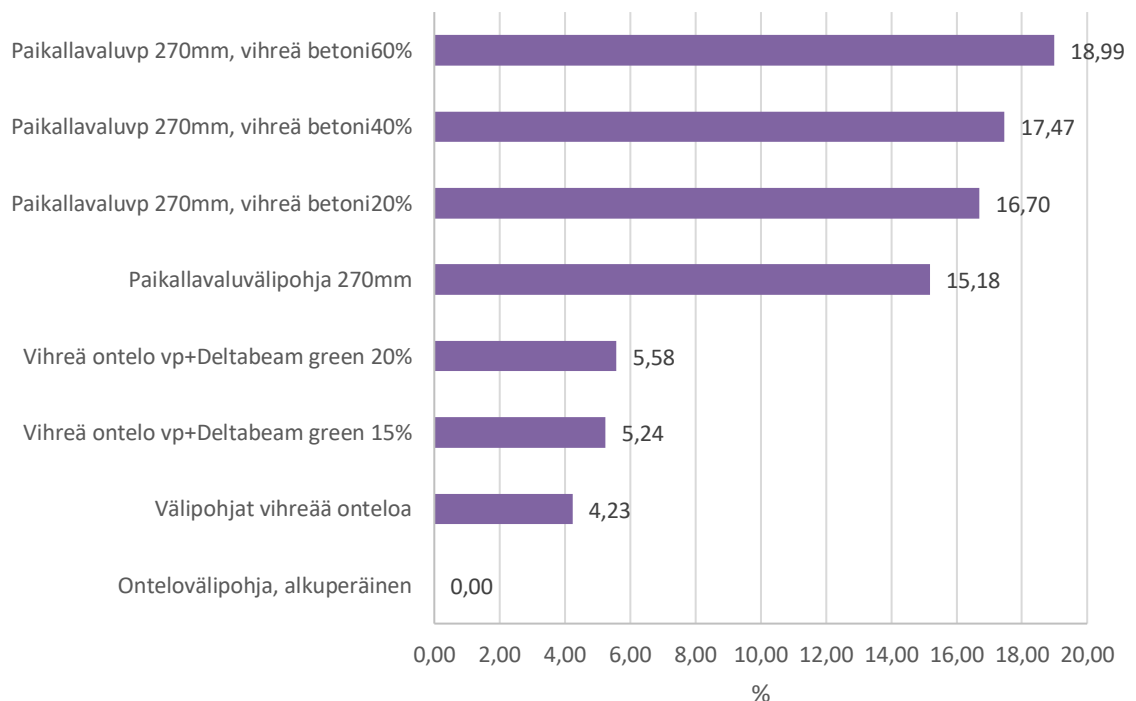
Tavallisten betonireseptien alkulujuuden kehitystä voidaan nopeuttaa kiihdyttimillä. Vihreän betonin kohdalla on syytä olla tarkkana mahdollisten notkistimien käytössä, sillä tuotteen käyttökokemuksia on vielä toistaiseksi vähän. Sementin määrän muutos voi muuttaa myös notkistimien toimintaa. Toinen vaihtoehto nopeammalle lujuudenkehitykselle on betonivalun lämmittäminen. Lämmitys kuluttaa energiaa, jolloin lämmityksen aiheuttamat päästöt nostavat rakenteen päästöjä.

7. KUSTANNUSVAIKUTUS

7.1 Uusien/ympäristöystävällisten materiaalien/tuotteiden kal- leus

Kustannustarkastelun lähtökohtana toimi mallikohteen kustannuslaskelma. Kuvassa 11 tämä on esitetty nollakohtana. Ontelolaattarakaisuiden kustannuksissa on huomioitu laattojen asennus, deltapalkit, paikalla valettava osa sekä saumajuotos töineen ja materiaaleineen. Myös kololaattoihin jälkitehtävät pintabetonilattiat on laskettu kustannuksiin työn ja materiaalien osalta. Hissikuilua, porrashuoneiden laattoja tai portaita ei ole huomioitu kustannuksissa, sillä nämä ovat samat kaikissa tarkasteltavissa ratkaisuissa.

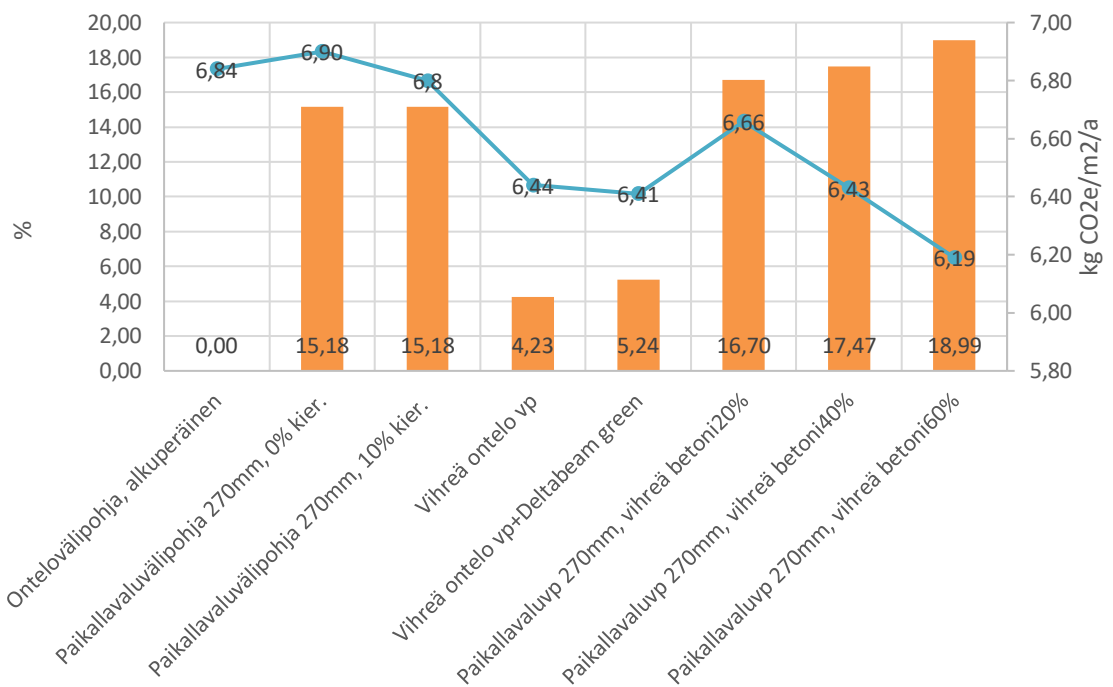
Tarkasteltavat kustannukset perustuvat kohdeyrityksen sopimushintoihin tammikuussa 2021. Välipohjien toteuttaminen vihreillä ontelolaatoilla nostaa välipohjien kokonaiskustannuksia 4,23 prosenttia. Kuvassa 10 on esitetty kaksi erilaista vihreää deltapalkkiratkaisua, 15 ja 20 prosenttia. Tämä johtuu siitä, että vihreän deltapalkin kustannukset vaihtelevat kohteen mukaan 15-20 % verrattuna perinteiseen deltapalkkiin. Mallikohteessa eli nollakohdassa deltapalkit on toteutettu perinteisellä ratkaisulla.



Kuva 11. Eri välipohjaratkaisuiden kustannusvertailua.

Paikalla valettavan välipohjan kustannuksissa on huomioitu betonointi ja rauditus materiaalin ja työn osalta. Lisäksi järjestelmämuotin ja jälkityön aiheuttamat kustannukset on laskettu kokonaiskustannuksiin paikalla valettavan rakenteen osalta. Kuvassa 12 ei ole huomioitu esimerkiksi hidastuneen puristuslujuuden aiheuttamia kustannuksia. Välipohjalaatan jälkituenta ei ole mukana kustannuksissa.

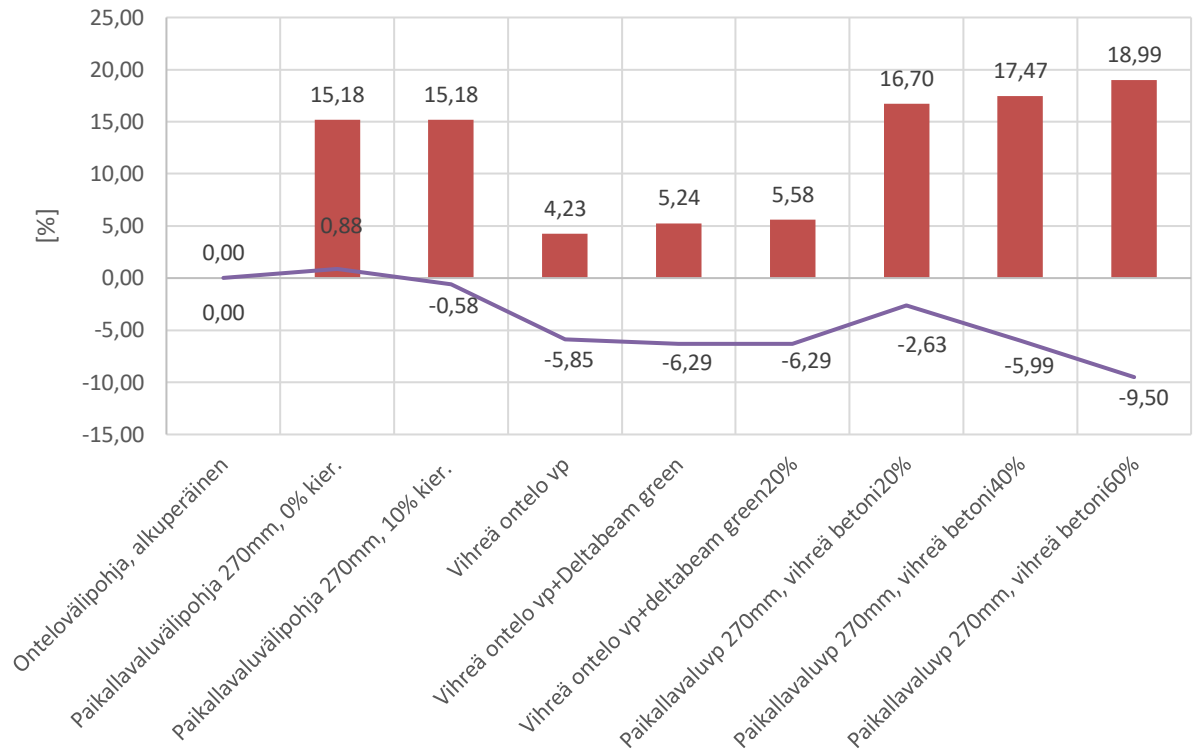
Kuvassa 12 on esitetty eri välipohjaratkaisuiden päästöt yhdistettynä kustannuksiin. Palikit kuvaavat ratkaisun kustannuksia, jolloin alkuperäisen ontelolaattarakaisun kustannukset ovat 0,0 ja päästöt 6,84 kgCO₂e/m²/a vaiheessa A1-A3.



Kuva 12. Välipohjaratkaisuiden kustannus- ja päästövertailua A1-A3 valmistusvaiheessa.

Vasemmanpuoleinen akseli kertoo kustannusten prosentuaalisen eron. Paikalla valettu välipohja on 15,18 prosenttia kalliimpi ja sen kasvihuonepäästöt ovat 0,06 yksikköä suuremmat kuin ontelolaattarakenteella.

Vihreillä ontelolaatoilla toteutettava välipohja on 4,23 prosenttia kalliimpi kuin tavallisilla onteloilla vastaava, mutta tuotevaiheen päästöt pienenevät 5,8 prosenttia. Vihreällä betonilla saavutetaan merkittäviä päästövähennyksiä, mutta mallikohteessa ratkaisu olisi huomattavasti kalliimpi kuin ontelorakenne.



Kuva 13. Välikohjaratkaisuiden kustannus- ja päästövertailua prosentuaalisesti A1-A3 valmistusvaiheessa.

Kuvassa 13 on esitetty päästövähennys prosentuaalisesti. Paikalla valettavan välipohjan hiilidioksidipäästöt ovat valmistusvaiheessa 0,88 prosenttia suuremmat kuin ontelolaattarakenteen. Jos ontelolaatat ja deltapalkit vaihdetaan vihreisiin tuotteisiin, päästöt putoavat 6,29 prosenttia. Kustannukset nousevat puolestaan reilu viisi prosenttia.

7.2 Välilliset kustannukset

Talo 2000-hankenimikkeistö jakaa rakennushankkeen kustannuksia erilaisiin pääryhmiin. Työmaatehtävät osuvat pääryhmä kolmeen, hanketehtävät. Nämä on jaettu edelleen pienempiin alaryhmiin, joita ovat muun muassa rakennuttaminen, suunnittelu ja hallinnolliset tehtävät. Työmaatehtävät ja rakentamisen johtotehtävät ovat aikatauluun sidonnaisia kustannuseriä. (Haahtela-kehitys Oy 2000)

Kohdeyrityksen yksi tulevaisuuden tavoite on rakennusajan ja hankkeen kokonaiskeston lyhentäminen. Taulukossa 7 on esitetty työmaatehtäviä, jotka ovat sidoksissa työmaan

kokonaiskeston. Kohdeyrityksen asuinrakennustyömailla on pääsääntöisesti torninosturi, joka on aikasidonnainen. On mahdollista käyttää myös ajoneuvonosturia, joka saapuu työmaalle vain tarpeen vaatiessa.

Taulukko 7. *Lisäkustannuksia aiheuttavat resurssit runkovaiheen pidentyessä*

Resurssi	Välillisten kustannusten jakautuminen resursseittain
Torninosturi+rata	25,6 %
Vastaava mestari	18,8 %
Työnjohtaja	13,1 %
Työmaainsinööri	12,1 %
Työmaatoimistot+pukeutumistilat	3,9 %
Rakennushissi	3,7 %

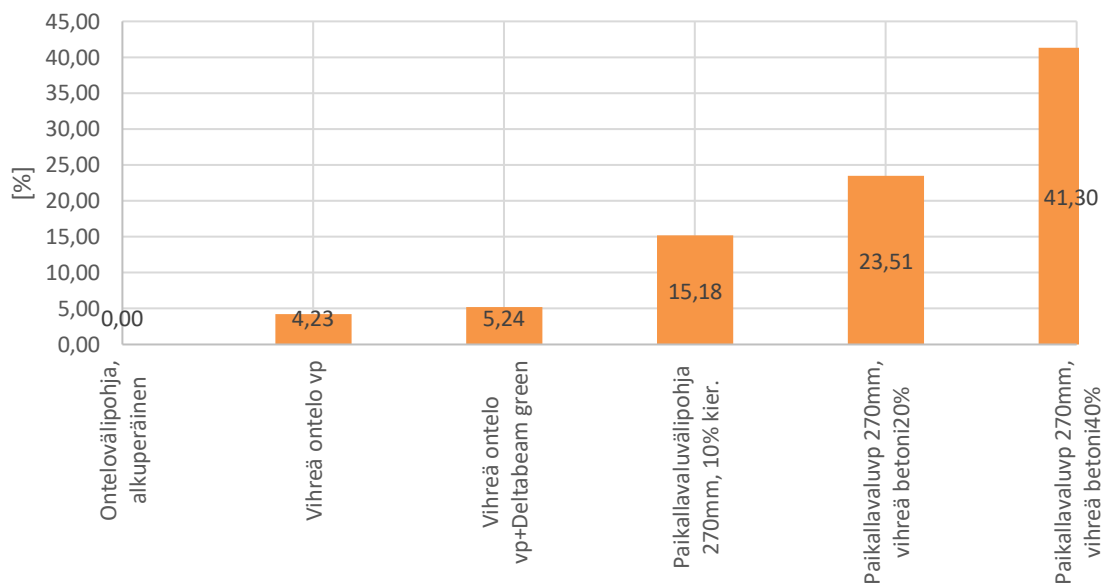
Aikasidonnaiset kustannukset ovat riippuvaisia myös kohteen luonteesta. Toimihenkilöiden määrä ei ole vakio koko hankkeen ajan, sillä valmistelutöissä ei vaadita useaa työnjohtajaa. Samoin työmaatoimiston ja sosiaalitoimien koko vaihtelevat hankkeen edetessä, mutta ne tarvitaan koko työmaan toiminnan ajaksi. Pienempiä aikasidonnaisia kuluja ovat varastot, vartiointi ja puhelin- sekä tietokonekustannukset.

Työmaan keston pitkeytyessä myös siivouskustannukset usein kasvavat. Loppusiivous hoidetaan kahdessa tai kolmessa osassa. Asunnoissa tehtävien viimeistelytöiden pitkeytyminen ja vaiheistaminen lisää siivouksen tarvetta. Taulukossa 5 ei ole huomioita erilaisia vuokria, esimerkiksi kaupungilta vuokrattu alue. Kokonaiskeston pitkeytyminen kasvattaa myös tällaisia kuluja suuremmiksi.

Kohdeyrityksen rakentamat kohteet ovat pääsääntöisesti perustajaurakointikohteita. Rakennettavat tontit ovat sekä omia että vuokratontteja. Pidentynyt rakennusaika ei vaikuta vain työmaatoimintoihin, sillä erilaiset hallinnolliset kulut ovat myös aikasidonnaisia. Rahoituskuluja ovat esimerkiksi vieraan pääoman korkokulut ja arvonalentumiset. Vuokratontista aiheutuvat kulut riippuvat ajan lisäksi tahosta, jolta tontti on vuokrattu.

7.3 Aikataulun vaikutus kustannuksiin

Paikalla valettavat välipohjat ovat kustannuksiltaan 15,18 prosenttia kalliimmat kuin ontelolaattarakenteiset. Ero nousee 16,70 prosenttiin, kun käytettävän betonin päästöt ovat 20 % pienemmät. Kustannusero mallikohteen ja vihreän betoni 40%:n välillä on 17,47 prosenttia. Suurin kustannusero muodostuu mallikohteen ja vihreä betoni 60:llä valettavan välipohjalaatan välille. Tämä on 19 prosenttia ja betonin erittäin hidas lujoudenkehitys lisää välillisiä kustannuksia. Kuvassa 14 on huomioitu myös välilliset kustannukset, joita paikallavalu välipohjan hidastunut lujoudenkehitys aiheuttaa. Nämä kustannukset on esitetty taulukossa 7.



Kuva 14. Välipohjaratkaisuiden kustannusvertailu, jossa on huomioitu myös aikataulu.

Välilliset kustannukset eivät ota huomioon aliurakoiden pituuden kasvamista. Urakoita voidaan sopia monilla eri ehdoilla, joista aikataulu on yksi. Kasvanut urakka-aika sitoo esimerkiksi työntekijöitä pidemmäksi ajaksi, vaikka työn määrä ei kasva. Aikataulu- ja kustannuspuolta on mahdollista toteuttaa erilaisilla vaihtoehdoilla, joissa hankkeen kesto ja työntekijöiden määrät vaihtelevat.

Runkourakka voidaan sopia erilaisiin muuttujiin. Elementtiasennuksessa tavallista on sopia euromääräinen hinta per ”kivi” eli yksi elementti. Hinta voi kustannuksen lisäksi sisältää elementtien alapuolisia valuja tai erilaisia materiaaleja, esimerkiksi vinotuet. Portaille ja kääntökiville voidaan sopia erillinen hinta, sillä asennus on hitaampaa. Paikallavalettavan holvin muottityöt ovat tavallista sopia hinta per neliö. Rauditus voidaan puolestaan sopia esimerkiksi euroa per kilogramma, riippuen raudoitettavasta kohteesta.

Haastatteluissa nousi esiin raudoituksen kehittyminen komponenteiksi. Valmiit komponentit ovat yksi ratkaisu raudoitus työvaiheen tahdistavaan osuuteen. Työn siirtäminen tehtaalle vähentää työmaalla raudoitukseen kuluvaan aikaa. Raudoituskomponentit yhdistettynä vihreään betoniin on yksi tulevaisuuden mahdollisuus, jossa muottikierto ei häiriinny ja viikonloppu voidaan hyödyntää betonivalun kuivumisessa. Tavallinen kerrostalon välipohja on raudoitusteknisesti suhteellisen helppo rakenne, verrattuna esimerkiksi infrarakentamisen rakenteisiin.

Kuvaajat eri betonilaatujen lujuudenkehityksestä olivat mallinnuksia. On siis mahdollista, että suotuisissa valuolosuhteissa ja oikealla jälkihoidolla lujuudenkehitys vihreällä betonilla on vastaava kuin tavallisella betonilla. Tällaisessa tapauksessa välillisiä kustannuksia ei synny, joten ainut kustannusten kasvu tapahtuu materiaalin hinnassa.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Johtopäätökset

Toimiala on suuressa muutoksessa, joten tutkimus on vain pieni läpileikkaus tämänhetkisestä tilanteesta. Suunta on oikea, mutta keinot ja tavoite on toistaiseksi monilla tahoilla työnalla. Kaupunkien asettamat päästövaatimukset tai -rajat ovat yksi tulevaisuuden isoista toimialan harppauksista. Kasvihuonepäästöjä voidaan tarkastella monella eri ajanjaksolla ja hankkeen osapuolia kiinnostavat eri vaiheiden päästöt. Rakennusliike on lähtökohtaisesti kiinnostunut rakennusmateriaalien ja -ratkaisuiden tarjoamista vaihtoehdoista, mutta samaan aikaan tutkitaan muun muassa maalämmön hyödyntämistä pitkän aikavälin päästövähennyskeinona.

EPD -ympäristöseloste on yksi osoitus tulevaisuuden vaatimuksista. Tuotteen tai materiaalin vaikutus ympäristöön on oltava julkista sekä luotettavaa. EPD -selosteissa luotettavuus osoitetaan kolmannen osapuolen tarkistuksella, jolloin kaikki osapuolet saavat luotettavan varmistuksen tuotteen ominaisuuksille. Eri tuotteita ja rakenneratkaisuja vertailu helpottaa myös tulevaisuudessa asetettujen päästövaatimusten saavuttamista.

Diplomityössä vertailtiin asuinkerrostalon vaakarakenteita, pääasiassa välipohjia. Tutkimuksen tuloksena ontelolaattavälipohjan hiilidioksidipäästöt ovat 1,9 % pienemmät kuin paikalla valettavan välipohjan, kun betonin kierrätysaste on nolla. Vähähiilillä ontelolaatoilla toteutetun välipohjan kasvihuonepäästöt ovat 5,85 % pienemmät kuin tavallisilla ontelolaatoilla toteutetun välipohjan. Paikalla valettavassa välipohjassa voidaan käyttää betonia, jonka päästövaikutus on 20 % pienempi kuin tavallisen betonin. Jos valmisbetonin päästövähennys on tätä suurempi, on vaikutus aikatauluun huomattavasti suurempi. Nykyinen läpimenoajan lyhennystavoite ei tue näiden käyttöä, joten tutkimuksessa tarkasteltiin pääsääntöisesti vihreä betoni 20 tuotetta. Ympäristölle edullisempaa betonia käytettäessä hiilidioksidipäästöt pienenevät 3,47 % verrattuna tavallisella betonilla valettavaan välipohjaan. Muutos hankkeen hiilijalanjäljessä on 1,5 %.

Kustannuksissa huomioitiin työ, materiaali ja jälkivalut. Paikalla valettavan välipohjan kustannukset nousivat 15,18 % korkeammaksi kuin ontelolaatoilla toteutettavan välipohjarakenteen. Kustannuseroksi tavallisen ja vihreän ontelolaatan välille saatiin 4,23 % vähähiilisen ontelolaatan ollessa kalliimpi tuote.

Perinteinen ontelolaatta ja tavallisella betonilla valettava välipohja voidaan rakentaa aikataulullisesti samassa ajassa. Optimaalinen kierto etenkin paikalla valettavassa raken-

teessa on viiden päivän muottikierto, jolloin viikonloppu voidaan hyödyntää muotinpurkulujuuden kehityksessä. Vähähiilinen ontelolaatta ei vaikuta runkoaikatauluun. Merkittävin aikatauluvaikutus on vähähiilisen betonin käytössä. Muotinpurkulujuus saavutetaan yksi päivä myöhemmin, kun verrataan tavallisella betonilla valettavaan välipohjaan. Vihreä betoni 20 % vaikuttaa yhden lisäpäivän, muut vihreät tuotteet enemmän.

Kasvihuonepäästöjen ja kustannusten valossa ontelolaattarakenne on paikalla valettavaa laattaa parempi vaihtoehto. Vähähiilisestä ontelolaatasta on saatu myös lupaavia käyttökokemuksia pilottihankkeen avulla. Vihreän betonin osalta käyttökokemukset välipohjissa vielä puuttuvat. Mallikohteena toimi suoralinjainen ja yksinkertainen pistetalo, joka on monissa olosuhteissa järkevin toteuttaa ontelolaattarakenteisena. Paikalla valettavaa rakennetta olisi harkittu kohteeseen, jos rakennus olisi sisältänyt esimerkiksi vinoja linjoja.

Uusien tuotteiden kohdalla pilotointia on jatkettava ensimmäisten onnistuneiden kokemusten jälkeen. Kantavissa rakenteissa on oltava äärimmäisen huolellinen, sillä niiden vaihtaminen myöhemmin on haastavaa. Kysynnän ja tarjonnan laki pätee myös uusissa tuotteissa. Volyymin kasvu alentaa tuotantokustannuksia, sillä suurempia määriä on usein halvempi valmistaa kuin pieniä.

8.2 Tutkimuksen arviointi ja merkitys

Kohdeyrityksellä on julkiset tavoitteet hiilijalanjäljen pienentämisestä, joka osaltaan korostaa tutkimuksen merkitystä. Diplomityössä on pyritty vastaamaan kohdeyrityksen tarpeisiin ympäristöä vähemmän kuormittavien tuotteiden ja ratkaisuiden parissa. Lopputuloksena organisaatio saa käyttöönsä eri välipohjaratkaisuiden päästövertailun, jossa on huomioitu myös kustannukset. Tutkimusta tehdessä oli tärkeää pysyä käytännön tasolla, jotta saadut tulokset olisivat sovellettavissa työmaaolosuhteissa. Apuna tässä käytettiin esimerkiksi työmaatoimihenkilöiden kommentteja paikallavalaikataulua luodessa.

Asiantuntijahaastatteluista saatu aineisto kattaa kohdeyritykselle tärkeiden yhteistyökumppaneiden näkemyksiä vähähiilisestä rakentamisesta. Aihe on alalla toistaiseksi melko tuore, joten eri yritykset ovat kehityksessään erilaisissa vaiheissa. Pilottihankkeen myötä nähdään myös yhteistyön merkitys uusien tuotteiden kehitystyön parissa. Ilman ensimmäisiä käyttökokemuksia materiaalitoimittajien on vaikea saada arvokasta tietoa tuotteen toimivuudesta todellisissa olosuhteissa, joita rakennusliike voi heille tarjota.

Tutkimussuunnitelman yhteydessä luodussa tutkimuksen aikataulussa on pysytty suhteellisen hyvin. Teorian kirjoituksen jälkeen suoritettiin asiantuntijahaastattelut ja samaan

aikaan aloitettiin myös päästölaskentaa. Työn tulosten kirjoitus otti ennakoitua kauemmin, samoin työn viimeistely. Työ saatiin valmiiksi kuitenkin kohdeyrityksen kanssa sovitun aikaikkunan sisällä.

Työn lähdemateriaali on pitkälle verkkojulkaisuja. Vallitseva pandemia hankaloittaa kirjaston käyttöä, joten työssä on pyritty hyödyntämään kirjaston verkkomateriaalia. Tämä heikentää teorian lähteiden monipuolisuutta. Tutkimus perustuu pitkälle kohdeyrityksen toiveeseen. Taustalla on aiempia diplomitöitä, joissa on tutkittu päästölaskentaa ja asuin-kerrostalon merkittävimpien materiaalien vaikutusta kasvihuonepäästöihin.

Tutkimuksen rajaamiseen käytettiin erityisen paljon aikaa. Epävarmuutta oli kustannustietojen saatavuudesta sekä aikataulun käsittelyn mahdollisuuksista. Tutkimuksen edessä ilmaantui erilaisia ongelmakohtia, joihin pohdittiin ratkaisua yhdessä kohdeyrityksen ohjaajien kanssa. Ongelmakohdissa pyrittiin löytämään käytännöllinen ratkaisu, jotta saadut tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia.

Diplomityössä saavutettiin asetetut tavoitteet. Kohdeyritys sai käyttöönsä vertailulaskelmia sekä lisätietoa päätöksenteon tueksi. Lähtötiedot materiaaleista, rakennusteknisistä ratkaisuista ja kustannuksista olivat kattavat, joka parantaa tulosten luotettavuutta.

Tutkimuksen merkitystä voidaan arvioida aiheen ajankohtaisuuden avulla. Rakennetun ympäristön osuus kasvihuonepäästöjen aiheuttajana on tunnistettu globaalisti. Tämän ratkaisemiseen vaaditaan radikaaleja tekoja ja laajaa yhteistyötä. Vähähiilisyys on läsnä ihmisten arkisissa valinnoissa ja päätöksissä. Tähän nojaten tutkimuksen aihe koetaan merkittäväksi ja saadut tulokset merkityksellisiksi.

8.3 Tulosten luotettavuus

Diplomityön vertailtaviksi rakenteiksi valittiin kohdeyrityksen käytössä olevia rakenneratkaisuja. Ensimmäiset vähähiiliset ontelolaatat on asennettu virallisella työmaalla ja toimivuus alustavasti todettu, sillä pilottihanke on vielä kesken. Perinteisistä laskennassa käytetyistä ontelolaatoista on voimassa oleva EPD -ympäristöseloste, joten näiden päästövaikutus on kolmannen osapuolen tarkistama.

Päästölaskennassa pystyttiin käyttämään osittain todellisia kohdeyrityksen käytössä olevia tuotteita, esimerkiksi tavallisten ontelolaattojen osalta. Tämä lisää osaltaan laskentatulosten luotettavuutta. Vihreä ontelolaatta ei laskentahetkellä ollut tuotekirjastossa, joten tämä heikentää hieman luotettavuutta.

Laskennassa jouduttiin tekemään oletuksia puutteellisten suunnitelmien tai sopivan tuotteen puuttuessa. Mallikohde on toteutettu kylpyhuone-elementeillä, joita laskentaohjelma ei tunne. Päästölaskennan luotettavuus kasvaa tulevaisuudessa, kun yhä useampi toimittaja hakee tuotteilleen ympäristöselosteita.

Paikalla valettava välipohja mallinnettiin ilman todellisia suunnitelmia ja piirustuksia. Mallinnuksessa hyödynnettiin kohdeyrityksen vakioituja suunnitteluratkaisuja, joista on vakiomäärä terästä ja betonia neliometriä kohden. Päästötulos olisi luotettavampi, jos välipohjarakenne olisi ollut rakennesuunnittelijan suunnittelema tai tarkastama.

Kohteiden yleis- ja runkoaikataulut ovat aina työmaakohtaisia. Aikatauluun vaikuttavia tekijöitä on lukuisia, joihin varautuminen vaatii kokemusta ja riittävää ennakkointia. Välipohjien aikatauluja mallintaessa hyödynnettiin kohdeyrityksen tietotaitoa. Todellisia kokemuksia aikatauluvaikutuksista ei vielä ole, joten arviossa voi näin ollen esiintyä epätarkkuutta. Työssä ei tarkasteltu talviolosuhteissa tapahtuvaa paikalla valua lainkaan, sillä saatuja tuloksia ei olisi koettu luotettavaksi.

Saadut kustannukset perustuvat kohdeyrityksen ja toimittajien yhteisesti sovittuihin hintoihin, joten näitä voidaan pitää suhteellisen luotettavina. Saatuja kustannuksia verrattiin myös kohdeyrityksen laskentatoimen dataan ja kustannukset olivat samassa linjassa heidän tietojen kanssa. Kustannuksissa on aina huomioitava suhdannetilanne, joka näkyy sekä toimittajien hinnoissa että urakoiden kilpailuissa.

Betonin lujuudenkehitystä mallinnettiin olosuhteissa, joissa päivälämpötila korkeimmillaan +10 C ja +20 C. Kyseessä on vain teorialason mallinnus betonin lujuudenkehityksestä, jonka toimintavarmuutta työmaalla on vaikea osoittaa. Työssä tarkasteltiin betonin lujuudenkehitykseen vaikuttavia tekijöitä, joiden perusteella voidaan todeta, että mallinnuksessa on epävarmuustekijöitä. Luotettavuutta vähentää myös vihreän betonin käytännön kokemusten puute.

8.4 Jatkotutkimus

Diplomityö rajattiin käsittelemään betonirunkoisen asuinkerrostalon vaakarakenteita, erityisesti asuntojen välisiä välipohjia. Toimittajayhteistyön kautta kohdeyritys tiesi näiden olevan ensimmäisiä vähähiilisen rakentamisen kehityskohteita. Asiantuntijahaastattelussa materiaalitoimittaja kertoi väliseinien olevan seuraava kehityskohde. Nämä ovat rakenneteknisesti helpompia kuin ontelolaatat, sillä osa väliseinistä on kantamattomia.

Kehitystyö vaatii aikaa ja pääomaa eli rahoitusta, koneita ja muita resursseja. Inhimillinen pääoma eli osaaminen, koulutus ja työvoima on rahoituksen ohella merkittäviä tekijöitä. Jatkotutkimus vaatii, että toimittajan omat testit sujuvat ongelmitta. Tuotteiden on aina

täytettävä terveellisyys- ja turvallisuuden vaatimukset. Lisäksi eri rakenneosille on olemassa erilaiset vaatimukset ja testit, jotka suoritetaan ennen tuotteen pilotointia. Urakoitsilla ei ole vaihtoehtona kuin osoittaa tukensa ja kiinnostuksen vähähiilisiä tuotteita kohtaan sekä odottaa.

Vihreän betonin käyttöä tarkasteltiin työssä vain teoreettisella tasolla. Jatkotutkimuksen kohteena voisi toimia vihreän betonin käyttö työmaalla. Yksi kohde voisi olla esimerkiksi tukimuurit, joilla ei ole vaikutusta asuinkerrostalon runkoaikatauluun. Vihreän betonin haaste on hidas lujuudenkehitys, jolloin lujuudenkehityksen vaiheet työmaalla erilaisilla jälkihoitotoimenpiteillä ovat arvokasta tietoa. Samalla saataisiin kokemuksia sekä aika-auluhaasteisiin, että työmaatoimintojen vaatimuksiin.

Yksi jatkotutkimusidea on rakennesuunnittelijan esittämä betoni- ja puurakentamisen yhdistäminen. Tulevaisuuden rakentaminen vaatii myös täysin uusia ratkaisuja, jos asetetut ilmastotavoitteet halutaan saavuttaa. Haasteena on suunnittelijoiden, materiaalitovittajien ja urakoitsijoiden kokemuksen puute, mutta erilaisilla kokeiluilla ja piloteilla saadaan arvokasta oppia.

LÄHTEET

- Abdulkareem et al. How environmentally sustainable are fibre reinforced alkali-activated concretes? (2019). Journal of Cleaner Production, 231 s.
- Bruce-Hyrkäs, T. (2020). Vähähiilisen rakentamisen sanasto ja hiilineutraalin rakennuksen määritelmä. Saatavissa: https://elinkaarilaskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2020/06/Tytti-Bruce-Hyrkäs_Vähähiilisen-rakentamisen-sanasto-ja-hiilineutraalin-rakennuksen-määritelmä_8.6.2020.pdf
- By 65 Betoninormit 2016. (2016). 3.7.4 Betonityöt. Betoniteollisuus, 164 s.
- Betoniteollisuus ry. (2012). Ontelolaataston suunnitteluohje. Saatavissa: https://parma.fi/userassets/uploads/documents/2018/06/parma_bt_ontelolaatosten_suunnitteluohje.pdf
- Betoniteollisuus ry. (2020). Tietoa betonista. Perustietopaketti. Betoni rakennusmateriaalina. Sementti ja kasvihuonekaasupäästöt. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>
- Bureau of International Recycling, BIR. (2018). World Steel Recycling in Figures 2014-2018. Saatavissa: https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/World-Steel-Recycling-in-Figures-2014-2018.pdf
- Carey J. Simonson et al. (2001). VTT Publications. Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden Structures. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2001/P431.pdf>
- Elinkaarilaskenta. (2020). Vähähiilisen rakentamisen neuvontapalvelu. Saatavissa: <https://elinkaarilaskenta.fi/>
- EPD International AB. (2020). Using EPD. What is an EPD? Saatavissa: <https://www.environdec.com/What-is-an-EPD/>
- Finnsementti Oy. (2020). Palvelut. Ympäristö. Ympäristöraportti 2020. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/ymparisto/ymparistoraportit/>
- Haahtela-kehitys Oy. (2007). TALO-ryhmä. Talo 2000-hankenimikkeistö. Saatavissa: https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5k2lh5ORz/5k2lNsjz/Files/Current-File/Talo_2000_hankenimikkeisto_nettiin_260207.pdf

- Haapio, A. (2013). VTT. Puurakentamisen tulevaisuuden näkymät. Haastattelututkimus. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T141.pdf>
- Heino, P. (2019). Ympäristöministeriö. Tausta-aineistoa puurakentamisen keskusteluun. Saatavissa: https://smy.fi/wp-content/uploads/2019/05/PMA46_Tausta-aineistoa-puurakentamiskeskusteluun.pdf
- Helsingin Kaupunki. (2020). Kehittyvä kerrostalo. Puu- ja betonirakentamisen vertailu. Saatavissa: <https://www.hel.fi/kanslia/kehittyva-kerrostalo-fi/hankkeet/puu-ja-betonirakentamisen-vertailu>
- Junnila, S. (2019). Päästöjen vai kustannusten optimi, vai voiko molemmat saada? Saatavissa: https://www.ril.fi/media/ril-summit-by-junnila_verkkoon.pdf
- LCA Consulting. (2020). Elinkaariarviointi. Saatavissa: <https://lca-consulting.fi/yritykset/elinkaariarviointi/>
- Liker, J. K. The Toyota Way. (2014). 14 Management principles from the world's greatest manufacturer. 1. ed. McGraw-Hill. United State of America
- Oinas, M. (2020). As Oy Tampereen Tohtori kohosi autohallin päältä harjakorkeuteen viikossa. YIT:n sisäisen julkaisu.
- One Click LCA. (2020). Verkkosivut. Saatavissa: <https://www.oneclicklca.com/fi/support/faq-and-guidance/documentation/tietokanta/>
- Parma Oy. (2020). Consolis Parman uutuuslaatta vastaa rakennusalan hiilihaasteeseen. Saatavissa: <https://parma.fi/artikkeli/consolis-parman-uutuuslaatta-vastaa-rakennusalan-hiilihaasteeseen/>
- Pekuri, A. Herrala, M. (2013). Lean-organisaatiota rakentamassa – henkilöstön osallistaminen ja kulttuurinmuutoksen kulmakivet. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK130702.pdf>
- Rakennuslehti. (2016). Puukerrostalo tulee betonitaloa kalliimmaksi – tappiotyöt karkottaneet rakentajia. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2016/11/puukerrostaloa-tulee-betonitaloa-kalliimmaksi-tappioiden-pelko-karkottaa-rakentajia/>
- Rakennuslehti. (2017). Uudet palomääräykset helpottavat puun käyttöä näkyvänä pintana ja korkeissa taloissa. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2017/11/uudet-palomaaraykset-helpottavat-puun-kayttoa-nakyvana-pintana-ja-korkeissa-taloissa/>
- Rakennustietosäätiö RTS. (2020). RTS EPD -ympäristöseloste. Saatavissa: <https://cer.rts.fi/epd-ymparistoseloste/>

- Ratu KI-6035 (2020). RT tietoväylä. Rakennustöiden menekit 2020. Saatavissa: https://kortistot-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/kortit/Ratu%20KI-6035?external_system=Juha&page=1
- Ruokonen, S. (2020). Rakennussementit. Finnsementti. Saatavissa: http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/ruokonen_rakennussementit-betonilaborantti-ja-myllarikurssi-7.1.2020.pdf,7.1.2020
- Ruuska et al. (2013). Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 8/2013. Helsinki. 40 s. Saatavissa: <https://www.ym.fi/download/no-name/%7B1FAF46B2-2649-41ED-B3AA5EA789C9512F%7D/37571>
- Rudus. (2020). Betonin valinta rakenteisiin – olosuhdehallinta. Saatavissa: www.rudus.fi
- Scandinavian Cement Oy. (2020). Yritys. Saatavissa: <https://www.scandinavian-cement.fi/fi/company.html>
- SFS-EN 15978 Sustainability of construction works. (2012). Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method
- SFS-EN 197-1 Sementti. (2012). Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus
- SFS-EN ISO 14025 Ympäristömerkit ja -selosteet. (2010). Tyypin III ympäristöselosteet. Periaatteet ja menettelyt
- SSAB-konserni. (2020a). Kestävä kehitys. Kestävät toiminnot. Ensimmäinen fossiilivapaissa teräksissä HYBRIT-teknologian avulla. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hybrit#OurVideos>
- SSAB-konserni. (2020b). Kestävä kehitys. Kestävät toiminnot. Hiilidioksiditehokkuus. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/hiilidioksiditehokkuus-ssablla>
- SSAB-konserni. (2020c). Kestävä kehitys. Kestävät toiminnot. Materiaalitehokkuus. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/materiaali-tuotannossa>
- Suomi.fi. (2020). Etusivu. Organisaatio. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA. Saatavissa: <https://www.suomi.fi/organisaatio/asumisen-rahoitus-ja-kehittamiskeskus-ara/465dec0e-d173-4b66-b38c-5b2db608f94d>
- Säynäjoki A, Heinonen J, Junnila S. (2011). Carbon footprint assessment of a residential development project. International Journal of Environmental Science and Development. Vol. 2. Issue 2. s. 116–123. Saatavissa: <https://doi.org/10.7763/IJESD.2011.V2.107>.

Teräsrakenneyhdistys. (2020). Teräsrakenneteollisuus. Teräs materiaalina. Terästä ja rautaa. Saatavissa: <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenneteollisuus/teras-materiaalina/terasta-ja-rautaa/>

Timonen-Nissi, H. (2019). Betonin jälkihoito. Saatavissa: <file:///C:/Users/fiupit-kaan2/Downloads/Betoniakatemia%20Betonin%20j%C3%A4lkihoito.pdf>

Tikkanen, J. (2020). Seosaineet. Betonilaborantti ja -mylläri pätevyyskurssi. Saatavissa: <http://www.betonyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/7.1.2020-seosaineet.pdf>

Valtioneuvosto. (2018). IPCC: Ilmasto lämpenee hälyttävällä vauhdilla. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/ipcc-ilmasto-lampenee-halyttavalla-vauhdilla>

Valtioneuvosto. (2019). Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. Pääministeri Marinin hallituksen hallitusohjelma, 3. Strategiset kokonaisuudet: 3.1.1 Asuntopolitiikka. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/asuntopolitiikka>

Vuorinen, P. (2012). Rakentajain kalenteri 2012. Betonointi kylmissä olosuhteissa. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120603.pdf>

Väisänen, P. (2007). Teräsrakenneyhdistys. Teräs, perustietoa arkkitehtipiskelijälle. Saatavissa: http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras_web.pdf

Womack, J.O. ja Jone, D.T. (1996). Lean Thinking: banish waste and create wealth in your corporation, Simon&Shuster

YIT Oyj. (2020). YIT sijoituskohteena. Strategia vuosille 2020-2022. Saatavissa: <https://www.yitgroup.com/fi/sijoittajat/yit-sijoituskohteena/strategia>

Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. (2019). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. 58 s. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelmä.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. (2013). Kulutus ja tuotanto. Tuotesuunnittelu ja tuotteet. Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotosmalli. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus_ja_tuotanto/tuotesuunnittelu_ja_tuotteet/elinkaarivaiointi_jalanjaljet_ja_panostuotosmalli#Hiilijalanjalke

Ympäristöministeriö. (2020a). Puurakentamisen toimenpideohjelma 2016-2022. Julkisen puurakentamisen kansalliset tavoitteet. Saatavissa: <https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Julkisen-puurakentamisen-kansalliset-tavoitteet->

45F5028E_8436_408A_8CD7_510C6C1AD000-161609.pdf/1fc95a52-5c50-4c9b-1f5d-325395658d72/Julkisen-puurakentamisen-kansalliset-tavoitteet-

45F5028E_8436_408A_8CD7_510C6C1AD000-161609.pdf?t=1603259868530

Ympäristöministeriö. (2020b). Valtio sekä Helsingin, Tampereen, Turun ja Oulun kaupunkiseudut solmivat MAL-sopimukset. Kohti hiilineutraaleja kaupunkeja. Saatavissa: <https://ym.fi/-/kohti-hiilineutraaleja-kaupunkeja>

Ympäristöministeriö. (2020c). Vastuualueet. Rakentaminen ja maankäyttö. Vähähiilinen rakentaminen. Saatavissa: <https://ym.fi/vahahiilinen-rakentaminen>

Ympäristöministeriö. (2020d). Vastuualueet. Rakentaminen ja maankäyttö. Vähähiilinen rakentaminen. Puurakentaminen. Saatavissa: <https://ym.fi/puurakentaminen>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Annettu Helsingissä 20.12.2017.

LIITE A: VÄHÄHIILISEN RAKENTAMISEN ASIAN- TUNTIJAHAASTATTELU

Microsoft Teams -haastattelu 10.11.2020 klo 10

Aluksi diplomityön aiheen esittely ja lähtökohtien läpikäynti.

Asiantuntijalta kysyttiin seuraavat kysymykset:

- 1) Mikä on suurin haaste vähähiilisessä rakentamisessa?
- 2) Miten näet vähähiilisen rakentamisen tulevaisuuden?
- 3) Kuinka usein EPD -ympäristöselosteita uusitaan?
- 4) Millaiset mahdollisuudet rakennuksilla on sitoa hiilidioksidia?
- 5) Miten näet vähähiilisen rakentamisen kustannuspuolen?

LIITE B: ASIANTUNTIJAJAHAASTATTELU VALMIS- BETONITOIMITTAJAN KANSSA

Microsoft Teams -haastattelu 17.11.2020 klo 13

Aluksi aiheen ja tutkimuksen tavoitteiden esittely.

Asiantuntijalta kysyttiin seuraavat kysymykset:

- 1) Miten hiilidioksidipäästöt on laskettu?
- 2) Millainen tuote on vihreä betoni?
- 3) Millaisessa kohteissa sitä voidaan hyödyntää?
- 4) Mikä on tulevaisuuden tavoite?

Microsoft Teams -palaveri 28.1.2021 klo 12 lujuudenkehityksen haasteista.

- 1) Millaisia lisäaineita voidaan käyttää?
- 2) Paljonko uusi tuote maksaa?

Asiantuntija mallinsi mallikohteen paikalla valettavan välipohjan lujuudenkehitystä.

Tuloksena saatiin kuvat 9 ja 10.

LIITE C: ASIANTUNTIJAJAHAASTATTELU TERÄS- TOIMITTAJAN KANSSA

Microsoft Teams haastattelu 20.11.2020 klo 14

Haastattelun alussa tutkimusaiheen esittely. Samalla kerrottiin kohdeyrityksen tavoitteista, jotka toimivat yhtenä diplomityön lähtökohtana.

Asiantuntijalta kysyttiin seuraavat kysymykset:

- 1) Mitä Celsa Steel on tehnyt ja mitä on suunnitelmassa tehdä? EPD löytyy, mitä muuta?
- 2) Mikä on yrityksen kierrätysaste? Kierrätyksen mahdollisuudet tulevaisuudessa?
- 3) Suurimmat haasteet vähähiilisyiden kehityksessä? Esimerkiksi hinta, raaka-aine, kapasiteetti tai aikataulu.
- 4) Mitkä ovat yrityksen vaikutusmahdollisuudet valmiiksi suunniteltujen raudoitusten kanssa?
- 5) Miten koet asenteet vähähiilistä rakentamista kohtaan? Onko halu kehittää toimintaa vai onko toimintaa pakko kehittää vähähiilisyiden takia?
- 6) Näkykö vastuullisuus yritykselle tulevissa yhteydenotoissa?
- 7) Onko talonrakentamisen ja infrapuolen välillä eroja?

LIITE D: ASIANTUNTIJAHAASTATTELU ELEMENTTITOIMITTAJAN KANSSA

Microsoft Teams -haastattelu 26.11.2020 klo 8.30

Aluksi tutkimusaiheen ja tavoitteiden esittely. Kohdeyrityksen päästövähennystavoitteet olivat tutut tiiviin yhteistyön seurauksena.

Asiantuntijalta kysyttiin seuraavat kysymykset:

- 1) Miksi kehitystyö aloitettiin ontelolaatoista?
- 2) Mitkä ovat kehitystyön suurimmat haasteet?
- 3) Mikä on EPD- ympäristöselosteiden tilanne?
- 4) Vaatiiko uudet tuotteet erillisiä hyväksymisiä? Esimerkiksi CE-merkinnät.
- 5) Miltä tulevaisuus näyttää? Isoimmat haasteet?

LIITE E: ASIANTUNTIJAHAASTATTELU RAKEN- NESUUNNITTELIJAN KANSSA

Microsoft Teams -haastattelu 7.12.2020 klo 9

Haastattelun aluksi tutkimuksen ja lähtötilanteen esittely. Samalla esiteltiin myös kohdeyrityksen päästötavoitteet, jotka toimivat yhtenä työn lähtökohtana.

Asiantuntijalta kysyttiin seuraavat kysymykset:

- 1) Minkälaisia toimia rakennesuunnittelussa voisi tehdä hankkeiden hiilipäästöjen vähentämiseksi?
- 2) Miten betonin määrää saataisiin rakenteissa vähäisemmäksi?
- 3) Millaiset ovat puurakentamisen mahdollisuudet?
- 4) Käytetäänkö suunnittelussa yleisesti rakenteissa toimivia paksuuksia, vai olisiko näissä mahdollisesti optimoitavaa?
- 5) Minkälaisia innovaatioita hän näkee tulevaisuudessa olevan hiilipäästöjen pienentämiseksi?