



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Joonas Jaakkola

# Betonin lujuuden vaikutus hiilidioksidipäästöihin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriyö

27.8.2021

Tekijä Otsikko	Joonas Jaakkola Betonin lujuuden vaikutus hiilidioksidipäästöihin
Sivumäärä Aika	84 sivua + 0 liitettä 27.8.2021
Tutkinto	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Korjausrakentaminen
Ohjaajat	Osastopäällikkö Katja Suovo Projektipäällikkö Jarno Pausio Yliopettaja Hannu Hakkarainen
<p>Tämä opinnäytetyö jakautuu kahteen selkeään kokonaisuuteen, jotka ovat kirjallisuutta referoiva osuus ja opinnäytetyön tutkiva osuus. Taustatietoa ja kirjallista referointia sisältävä betonin hiilijalanjälkeen sekä rakenteiden mitoittamiseen syventyvä osuus tukee ja luo pohjaa opinnäytetyön tutkivaan osuuteen.</p> <p>Tutkimuksen kannalta merkittävää on ymmärtää sementin vaikutus betonin lujuuteen, sillä sementillä on betonin raaka-aineista ehdottomasti suurin hiilijalanjälki. Sementin suhteellinen osuus betonimassassa lisääntyy betonin lujuutta kasvatettaessa, tästä aiheutuen betonin lujuuden kasvaessa myös sen hiilijalanjälki kasvaa.</p> <p>Tutkimuksessa tarkastellaan imaginääristen, mutta mahdollisimman hyvin tyypillistä betonirunkoista asuinkerrostaloa kuvaavien kuormitustapausten avulla, kuinka betonin lujuuden muuttaminen käyttäen tyypillisiä betonilaatuja vaikuttaa rakenteiden hiilijalanjälkeen. Tutkimuksen tarkastelemat betonirakenteet ovat seiniä, pilareita tai anturoita, jotka ovat toteutustavaltaan paikallavalurakenteita.</p> <p>Tutkimuksessa tarkastellaan kolmessa eri kuormitustapauksessa, neljää tyypillistä asuinkerrostalon rakenneta, joiden betonin lujuutta varioidaan kolmella eri lujuudella. Mitoituksen tuloksena saadut raudoittemäärät huomioidaan ja rakenteille lasketaan hiilijalanjälki kaikissa edellä mainituissa tapauksissa.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena todettiin, että tyypillisen betonirunkoisen asuinkerrostalon rakenteiden paksuudet ovat niiden kuormitukseen nähden suuret rakenteellisen toiminnan, palotilanteen sekä esimerkiksi akustisten vaatimusten vuoksi. Tästä aiheutuen rakenteet kantavat asuinkerrostalon käyttötarkoituksessa niille kohdistuvat kuormat hyvin pienellä raudoittemäärällä, vaikka betonin lujuutta tyypillisestä arvostaan pienennettäisiin.</p> <p>Tutkimus osoittaa, että betonin lujuutta voitaisiin pienentää rakenteiden kantavuuden näkökulmasta ja näin saavuttaa parannusta rakenteiden hiilijalanjäljessä. Merkittävää on, että tämä muutos voitaisiin toteuttaa olemassa olevin materiaalein ja menetelmin.</p>	
Avainsanat	Betoni, betonin lujuus, hiilijalanjälki

Author Title	Joonas Jaakkola Concrete's compressive strengths effect on carbon footprint
Number of Pages Date	84 pages + 0 appendices 27 August 2021
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Building Renovation
Supervisors	Katja Suovo, Department Manager Jarno Pausio, Project Manager Hannu Hakkarainen, Senior lecturer
<p>This thesis consists of two main parts. The first section of the thesis contains vital information about the design of concrete structures and the environmental effects of concrete. The second part of the thesis includes a study about the relationship between concrete's compressive strength and the greenhouse gas emissions released in manufacturing concrete.</p> <p>To understand the keynote of this study, one must first understand the basics of manufacturing concrete. Concrete's key ingredient, the binder in the mixture, is cement. Adding more cement in the mix leads to more compression capacity; however, at the same time, manufacturing cement is releasing a large number of greenhouse gasses.</p> <p>The study examines could concrete's compressive strength be varied in search of savings in emissions released. The subject of the research is typical residential concrete high-rise buildings. The loading cases for design are arbitrarily selected yet keen on being as specific as possible.</p> <p>Structures under review are concrete walls, columns, or footings. There are three different loading settings for all structures, and at the same time, concrete's compressive strength is being varied in all situations. Afterwards, design results lead to a carbon footprint.</p> <p>As a result of the study, it was discovered that typical dimensions of residential high-rise building structures are determined mainly by factors other than load-bearing capacity. These factors can be named the structure's capabilities to handle the fire situation, perform acoustically well enough, and fill the structural requirements, like acting as a support surface for other structures.</p> <p>The study shows that considering structures' load-bearing capacity, typical residential high-rise buildings structures can be manufactured using concrete with lower compressive strength without creating a great need for adding more reinforcement in the structure. Utilizing this concept could positively reduce emissions of greenhouse gasses in the high-rise residential building's construction process.</p>	
Keywords	Concrete, concrete compressive strength, carbon footprint

## Sisällys

Lyhenteet, määritelmät ja merkinnät

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimuksen tausta	5
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	6
1.3	Tutkimuksen rajaukset	7
1.4	Aineisto, rakenne ja tutkimusmenetelmät	8
2	Kirjallisuus tutkimuksen taustalla	9
2.1	Aiempi tutkimus tämän tutkimuksen taustalla	9
2.1.1	Elina Lahdensivun kandidaattityö	9
2.1.2	Aiheeseen liittyvä tutkimus ja ohjeistus	12
2.2	Rakentaminen päästöjen aiheuttajana	14
2.2.1	Rakennusalan ympäristövaikutukset ja tulevaisuuden lainsäädäntö	14
2.2.2	Asuinkerrostalon päästöjen jakautuminen rakenneosille	17
2.3	Betonin valmistuksessa syntyvät päästöt	20
2.3.1	Betonin valmistuksen perusteet	20
2.3.2	Betonin komponenttien osuudet teräsbetonin päästöistä	23
2.3.3	Betonin lujuuden vaikutus betonituotannon päästöihin	25
2.4	Ympäristövaikutusten laskennan perusteet	28
2.4.1	Päästöjen laskeminen ekvivalenttina hiilidioksidipäästönä	28
2.5	Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä	30
2.5.1	Rakennuksen elinkaaren vaiheet ja osatehtävät	31
2.5.2	Arviointimenetelmän rakenne ja toiminta	33
2.5.3	Arviointimenetelmän pilotointi ja tämänhetkinen tilanne	37
2.6	Betonirakenteiden säilyvyysuunnittelu	39
2.6.1	Suunnittelukäyttöikä	39
2.6.2	Betonirakenteiden rasitusluokat	41
2.6.3	Halkeilu, saumat ja kunnossapito	46

	2
2.7 Muut betonirakenteiden suunnittelua ohjaavat tekijät	47
2.7.1 Paloturvallisuus	47
2.7.2 Akustiikka	49
2.7.3 Rakenteellinen toiminta	51
2.8 Rakennesuunnittelijan valinnat betonirakenteen suunnittelussa	53
3 Tutkimuksen esimerkkitapaukset ja -rakenteet	55
3.1 Tarkasteltavat rakenteet ja käytetyt mitoitusmenetelmät	56
3.2 Rakenteiden kuormitustilanteet ja mitoituskuormat	58
3.2.1 Kantava väliseinä	58
3.2.2 Kantavan ulkoseinän sisäkuori	60
3.2.3 Parvekepilari	62
3.2.4 Pilariantura	64
4 Rakenteiden mitoitus ja hiilijalanjälkilaskenta	65
4.1 Kantava väliseinä	66
4.2 Kantavan ulkoseinän sisäkuori	67
4.3 Parvekepilari	69
4.4 Pilariantura	70
5 Tulosten tarkastelu	72
6 Virhearvio	74
7 Pohdinta	75
Lähteet	79

## Lyhenteet, määritelmät ja merkinnät

CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi. Tässä tutkimuksessa sanalla hiilidioksidi viitataan usein kaikkiin kasvihuonekaasuihin, joiden yhteisvaikutus on muutettu ekvivalentiksi hiilidioksidipäästökseksi. Hiilidioksidin lisäksi merkittävimpiä ilmaston lämpenemiseen vaikuttavia kasvihuonekaasuja ovat metaani CH <sub>4</sub> ja dityppioksidi N <sub>2</sub> O. [1, 2]
CO <sub>2</sub> -ekv	Hiilidioksidiekvivalentti. Arvo kuvaa eri kasvihuonekaasupäästöjen yhteenlaskettua ilmastoa lämmittävää vaikutusta. Eri kasvihuonekaasuilla on toisistaan eroava ilmastoa lämmittävä vaikutus (GWP). Kasvihuonekaasujen vaikutusta suhteutetaan hiilidioksidin ilmastoa lämmittävään vaikutukseen. [1]
Elinkaari	Kuvastaa tuotteen kaikkia vaiheita raaka-aineista sen kierrätykseen tai loppukäsittelyyn saakka. [3, s.238]
FEM-laskenta	Lyhenne FEM koostuu englanninkielisistä sanoista Finite Element Method. Kyseessä on siis elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä. Tässä tutkimuksessa FEM-laskennalla viitataan tietokoneavusteiseen elementtimenetelmää hyödyntävään laskentaan. [4]
GWP	Global Warming Potential. Kuvaa tietyn kasvihuonekaasun ilmaston lämmittämisen potentiaalia. Muiden kasvihuonekaasujen GWP suhteutetaan hiilidioksidin GWP-arvoon. Hiilidioksidin suhdeluvuksi verrattaessa muihin kaasuihin, on siis asetettu arvo 1,0. [1]

Hiilijalanjälki	Kuvaa yksittäisen rajattavissa olevan kokonaisuuden aiheuttamaa ilmastokuormaa. Ilmastokuorma aiheutuu kasvihuonekaasujen päästöistä ilmakehään. Hiilijalanjälki ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenttina. Yksikkö on CO <sub>2</sub> e. [1]
Hiilinegatiivinen	Tarkoittaa toimintaa, jossa ilmakehästä poistetaan enemmän kasvihuonekaasuja kuin sinne päästetään [5, s.10].
Hiilineutraali	Tarkoittaa toimintaa, joka ei kuormita ympäristöä. Tietylle kokonaisuudelle voidaan määrittää hiilijalanjälki. Mikäli hiilijalanjälki on positiivinen, voidaan päästöjä kompensoida esimerkiksi ostamalla päästövähennysyksiköitä markkinoilta. [1]
Hiilikädenjälki	Kuvaa tietyistä ratkaisusta saatavaa ilmastohyötyä sen elinkaaren aikana. Hiilikädenjälkeä voidaan käyttää esimerkiksi kuvaamaan palvelun tai tuotteen ilmastohyötyjä. Yksikkönä toimii hiilidioksidiekvivalentti. [1]
kgCO <sub>2</sub> e	Yksikkö, jota käytetään hiilijalanjälkilaskennassa. Kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus on muutettu vastaamaan yhden hiilidioksidikilon aiheuttamia päästöjä (GWP kertoimien avulla). [1]
Käyttöikä	Kuvastaa kuinka kauan tuotteen on kestävä käytössä suunnitellusti huollettuna. Käyttöikä ilmaistaan vuosissa. [3, s.238]
ROTI	ROTI on lyhenne sanoista rakennetun omaisuuden tila. Suomen rakennusinsinöörien liiton RIL ry:n koordinoiman hankkeen tuloksena on julkaistu joka toinen vuosi ROTI raportti vuodesta 2007 lähtien. ROTI arvioi rakennetun omaisuuden tilaa sekä kehitystä. [6]

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä tutkimus toteutettiin Ramboll Finland Oy:lle, kiinteistöjen ja rakentamisen toimialalle. Ramboll on kansainvälinen suunnittelu- ja konsulttialan yritys. Yritys on säätiöomisteinen ja työllistää globaalisti 16 000 henkilöä (2021). Suomessa yritys toimii maanlaajuisesti työllistään 2500 asiantuntijaa (2021). Ramboll tarjoaa ratkaisuja kaupunkien, infrastruktuurin, liikenteen sekä ympäristön suunnitteluun. Lisäksi Ramboll toimii laajalajaisesti rakennusten suunnittelijana, rakennuttamisessa sekä rakennusten ylläpidossa. [7]

Kiertotalous, ympäristö ja kasvihuoneilmiön hidastaminen ovat nousseet lähiaikoina suureen rooliin rakennusalan kehityshankkeissa. On selvää, että tarvitsemme uutta tietoa ja innovaatiota tehdäksemme muutosta parempaan.

Rambollin perusarvot heijastavat voimakasta sitoutumista kestävän kehityksen periaatteisiin [7]. On siis luonnollista, että yrityksen tilaamien tutkimusten, kuten opinnäytetöiden aiheet, voivat olla kestävän kehityksen periaatteita edistäviä. Tämä tutkimus syventää tietämystä betonin lujuuden valinnan ympäristövaikutuksista ja näin ollen edistää osaltaan Rambollin tavoitteita luoda yhteiskuntaa kestävästi kehitettäviä ratkaisuja.

Tämän tutkimuksen keskeisin tutkimuskysymys nousi esiin Rambollille aiemmin toteutetun kandidaattityön herättämästä jatkokysymyksestä. Kyseinen kandidaattityö on Tampereen yliopistossa Elina Lahdensivun vuonna 2019 Ramboll Finland Oy:lle laatima tutkimus *Hiilijalanjäljen arviointi aikaisessa suunnittelussa ja siihen vaikuttaminen*. [8] Tutkimuksessa Lahdensivu tarkasteli tyypillisen betonirunkoisen uudisrakennus asuinkerrostalon rakenteisiin sitoutunutta hiilijalanjälkeä. Tutkimuksen yhtenä päätelmänä havaittiin, että betonin lujuudella on suuri merkitys rakennuksen betonirakenteiden hiilijalanjälkeen. Lujempi betoni aiheuttaa sen sisältämän suuren sementtimäärän vuoksi enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin lujuudeltaan heikompi betoni. [8, s.15-16] Tästä heräsi jatkokysymys, johon tällä tutkimuksella pyritään löytämään vastauksia. Kysymys yksinkertaisuudessaan on: voidaanko betonin lujuutta pienentämällä pienentää rakenteiden hiilijalanjälkeä?



## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tavoitteena tutkimuksessa on selvittää, voidaanko betonin lujuutta pienentämällä kantavissa betonirakenteissa vähentää rakennuksen hiilijalanjälkeä. Parhaimmillaan tutkimuksella voidaan luoda käytännön menetelmiä rakennesuunnittelijalle vaikuttaa betonirunkoisen rakennuksen hiilijalanjälkeen. Tavoitteeksi voidaan mainita myös asian keskeisen tiedon ja olemassa olevan tutkimuksen tuomista jäsennehtynä opinnäytetyöhön. Tavoitteena on, että opinnäytetyön lukija saa ymmärryksen tärkeimmistä ympäristövaikutusten laskentaan sovellettavista menetelmistä, nykyhetken tilanteesta sekä tulevaisuuden askeleista hiilineutraalisuuden tavoittelussa.

Opinnäytetyön uutta tietoa luovassa, tutkivassa osuudessa, aluksi yksinkertaiselta kuulostava tutkimusongelma on pintaa syvemältä hyvin monisyinen. Betonin lujuuden pienentäminen kantavissa rakenteissa voi aiheuttaa muutoksia rakenteisiin tai niiden raudoitteisiin. Mikäli rakenteiden dimensioita tulee kasvattaa betonin lujuuden pienentyessä, betonin menekki kasvaa ja jokainen kulutettu betonikuutio kasvattaa hiilijalanjälkeä. Kun betonia kuluu aiempaa enemmän kasvavat myös pystykuormat, tämä voi vaikuttaa edelleen rakenteiden mitoituskuormiin ja esimerkiksi perustusratkaisuihin.

Vastaavasti mahdollinen raudoitemäärän lisääntyminen rakenteissa heikomman lujuuden omaavan betonin aiheuttamana lisää raudoitteiden aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. Kokonaisvaikutuksen arviointi ilman tarkkaa tutkimusta on parhaimmillaankin vain arvaus.

Kuten havaitaan, betonin lujuuden pienentäminen kantavissa rakenteissa ei ole ongelmatonta. Betonin lujuuden pienentäminen saattaa aiheuttaa muutoksiin rakenteiden dimensioissa tai niiden raudoitteissa. Tutkimuksen tavoitteena onkin suorittaa tietynlaista optimointia ja selvittää, onko betonin lujuuden pienentäminen betonirunkoisen rakennuksen kantavissa rakenteissa kokonaisvaikutukseltaan ympäristövaikutusten kannalta edullinen? Tähän kysymykseen pyritään vastaamaan opinnäytetyön tutkivassa osuudessa, jonka tavoitteena on olla myös tieteellisen periaatteen mukaan hyvin toistettavissa. Entä mitä ongelmia ja rajoitteita lujuuden pienentämiselle ilmenee? Tähän kysymykseen puolestaan pyritään vastaamaan opinnäytetyön kirjallisuutta referoivassa osuudessa.

### 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimus rajataan käsittelemään rakenteiden mitoitusta ja ympäristövaikutuksia. Rajauksen ulkopuolelle asetetaan kustannusvaikutukset. Kustannusvaikutukset huomioidaan suunnittelua ja valintoja ohjaavana tekijänä, kuitenkin tarkempaa kustannuslaskentaa tai vertailua ei suoriteta osana tutkimusta.

Tutkimuksessa tarkastellaan nimenomaisesti rakennuksen teräsbetonirunkoa. Tutkimuksessa käytettävät materiaalien päästötiedot sisältävät arvion materiaalin loppusijoituksesta tai kierrätyksestä. Kuitenkaan rakentamisvaihe, mahdolliset työmaatilat tai esimerkiksi rakennustelineet eivät sisälly tähän tutkimukseen.

Tutkimuksessa tarkastelua suoritetaan imaginääriselle uudisrakennukselle, luonteeltaan varsin mielivaltaisesti valikoiduissa kuormitustilanteissa. Kuormien laskennassa noudatetaan Eurokoodia. Tutkimuksen rakenteet sekä kuormitustilanteet on luotu yhdessä Ramboll Finland Oy:n asiantuntijoiden kanssa vastaamaan mahdollisimman hyvin tyyppillistä teräsbetonirunkoista asuinkerrostaloa.

Tarkasteltavat rakenteet rajataan kantaviin teräsbetonisiin pystyrakenteisiin. Käytännössä näitä rakenteita ovat seinät, pilarit sekä perusrakenteet. Todetaan, että vaakarakenteiden, kuten ontelolaattojen tuotanto on vahvasti vakioitunutta tuotantoa, jonka kehittäminen on syytä rajata tutkimuksesta tarkasteltavan kokonaisuuden ulkopuolelle.

Tutkimuksessa materiaalivalinnat rajataan koskemaan betonin lujuutta. Tarkoituksena on selvittää nimenomaisesti betonin lujuuden vaikutusta hiilidioksidipäästöihin; tästä syystä rajataan vertailusta pois tyyppillisistä betonilaaduista poikkeavat betonilaadut, kuten ympäristöystävälliset erikoistuotteet. Pääsyyinä tähän rajaukseen voidaan mainita tyyppillisiä betonilaatuja ympäristöystävällisempien betonituotteiden kovettumisaikojen mahdollinen vaihtelu. Tutkimus toteutetaan muutoinkin perusratkaisuiksi vakiintuneilla betoneilla ja raudoitemateriaaleilla. Materiaalien hiilijalanjälkiarvot huomioivat materiaalin tuotannossa syntyvien päästöjen lisäksi sen muun elinkaaren.

Perustusten tarkastelu on merkittävässä osassa tutkimuksessa. Tarkastelussa ei varioida rakennuksen sijoitus maastoa, tai maan kantavuutta.

## 1.4 Aineisto, rakenne ja tutkimusmenetelmät

Tutkimus on rakenteeltaan hybridimalli kirjallisen referoinnin ja uutta luovan tutkimuksen välillä. Näkökulma tutkimuksessa on vahvasti rakennusten suunnittelussa, lisäksi tutkimus on vahvasti materiaalitekkinen sekä rakennetekkinen. Tutkimus toteutetaan, jotta rakennussuunnitteluun saataisiin konkreettisia keinoja vaikuttaa betonirunkoisen rakennuksen ympäristövaikutuksiin.

Aineistona kirjallisuustutkimuksessa käytetään rakentamisen päästölaskentaan liittyviä tietolähteitä ja betonin valmistamiseen sekä suunnitteluun keskittyviä kirjallisia lähteitä. Mitoitustutkimuksen aineistona käytetään tutkimusta varten luotuja imaginäärisiä mitoitustapauksia, joiden perusteella mitoitustilanteiden kuormat lasketaan Eurokoodin mukaisesti.

Kuormien laskentaan käytetään FEM-laskentaohjelmaa, johon muodostetaan eri rakenteiden kuormitustilanteille kolmiulotteiset laskentamallit. Varsinainen mitoitus toteutetaan Excel-laskentapohjilla. Tutkimuksessa palotilannetta tarkastellaan Eurokoodin mukaisilla taulukkomitointimenetelmillä. Tarkempaa palotilanteen mitoitusta ei toteuteta. Tarkemmin mitoituksesta sekä tutkimuksessa käytetyistä laskentapohjista kerrotaan luvussa 3.1 Tarkasteltavat rakenteet ja käytetyt mitointimenetelmät.

Tutkimuksessa käytetään kvantitatiivisia sekä kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Tutkimuksessa edellä mainittuja tutkimusmenetelmiä käytetään toisiaan täydentävinä. Kvalitatiivista tutkimusta ovat tutkimuksen osuudet, joissa esitellään olemassa olevaa tutkimusta ja tietoa. Lisäksi tuodaan yhteen asian kannalta merkityksellinen tieto.

Kvantitatiivinen osuus tutkimuksesta koostuu mitoituksesta sekä rakenteiden tarkastelusta. Tulosten tarkastelun lisäksi tehtävät johtopäätökset sekä pohdinta tuottavat uutta tietoa.

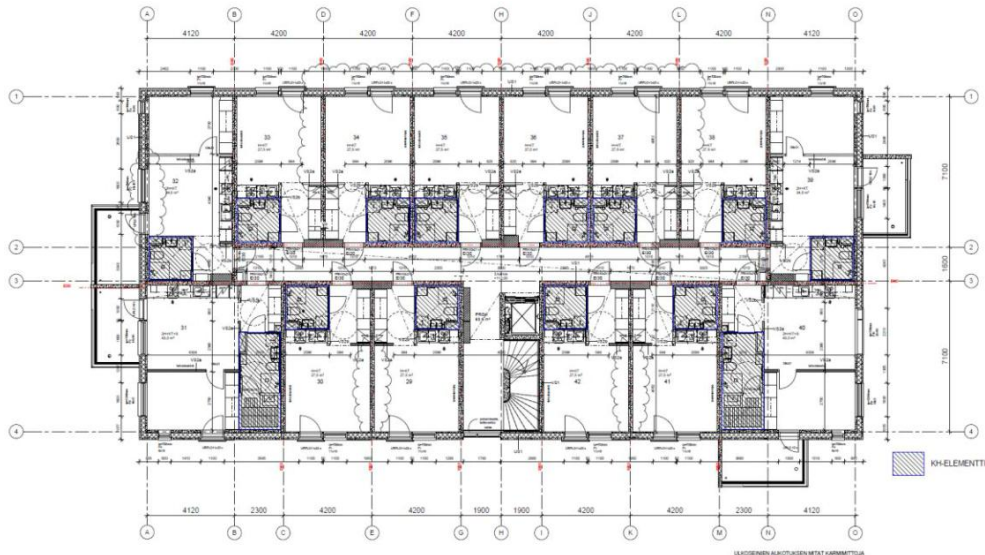
## 2 Kirjallisuus tutkimuksen taustalla

### 2.1 Aiempi tutkimus tämän tutkimuksen taustalla

#### 2.1.1 Elina Lahdensivun kandidaattityö

Tämän tutkimuksen tutkimusongelma nousi esiin Elina Lahdensivun vuonna 2019 julkaisemasta Tampereen yliopistolle tehdystä kandidaattityöstä *Hiilijalanjäljen arviointi aikaisessa suunnittelussa ja siihen vaikuttaminen*. Työn tilaajana toimi Ramboll Finland Oy, kuten tämänkin tutkimuksen tilaajana. Tässä luvussa käsitellään Lahdensivun kandidaattityön keskeistä sisältöä ja asioita, jotka johtivat tämän tutkimuksen aloittamiseen. Lahdensivun tutkimuksen esittely alustaa hyvin tämän tutkimuksen taustaa.

Kandidaattityössään Lahdensivu pyrki selvittämään, voiko rakennuksen hiilijalanjälkeä arvioida luotettavasti aikaisessa suunnittelussa. Kyseessä on rakentamisen suunnitteluvaihe, jossa rakennusmateriaaleja ei ole vielä päätetty. [8, s.1] Lahdensivu käytti tutkimuksessaan kahta hiilijalanjäljen laskentamenetelmää ja vertaili näitä menetelmiä keskenään. Laskentojen esimerkkitapauksena Lahdensivu käytti tyyppillistä suomalaista asuinkerrostaloa. Rakennus oli uudisrakennus. Tarkasteltavassa rakennuksessa oli seitsemän kerrosta ja kellari. Rakennuksen ulkoseinät olivat sandwich-elementtejä ja välipohjarakenteina toimivat ontelolaatat sekä paikallavaletut laatat. Kuvassa 1 sivulla 10 esitetään ote Lahdensivun kandidaattityöstä, kyseessä on Lahdensivun tutkimuksessa esimerkkitapauksena käyttämän rakennuksen pohjapiirustus. [8, s.10]



Kuva 1. Lahdensivun tutkimuksen esimerkkitapauksena käytetyn rakennuksen asuinkerroksen pohjapiirustus. Rakennuksessa oli seitsemän kerrosta ja kellari. [8, s.9]

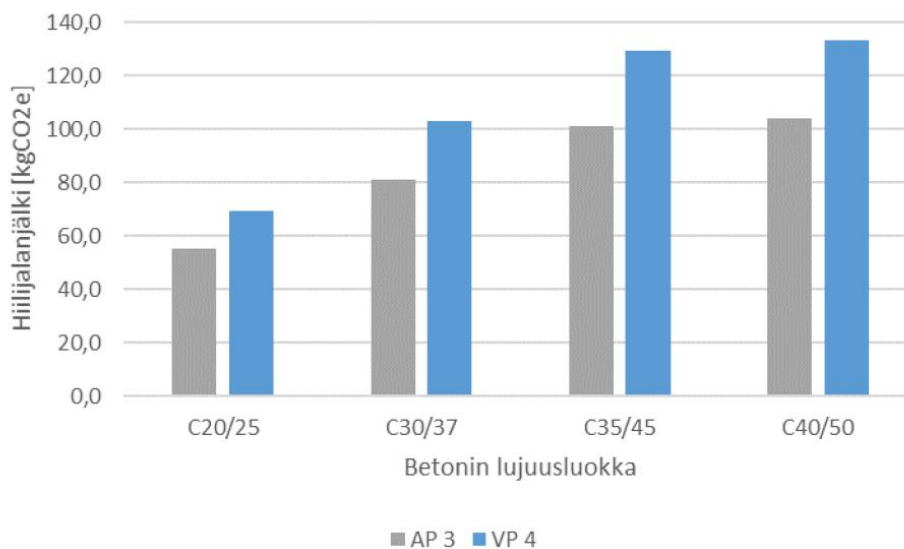
Laskentamenetelminä Lahdensivu käytti rakennetyyppien hiilijalanjälkeen perustuvaa laskentamenetelmää sekä toisena menetelmänä One Click LCA -ohjelmalla toteutettavaa hiilijalanjäljen laskentaa. One Click LCA -ohjelmalla toteutettu laskenta noudatti ympäristöministeriön *Rakennusten vähähiilisyyden arviointimenetelmä* -ohjetta [9]. Rakennetyyppien hiilijalanjälki oli määritetty tilaajayrityksen toimesta ja tämä tieto toimi lähtötietona rakennetyyppihin perustuvalle hiilijalanjälkilaskennalle. [8, s.7-9]

Tutkimuksen tuloksena havaittiin, että aikaisen suunnitteluvaiheen hiilijalanjälki vastaa hyvin todellista hiilijalanjälkeä, kunhan todelliset rakennetyypit ovat tiedossa laskentaa tehtäessä. Tutkimuksessa todettiin kuitenkin, että yrityksen rakennekirjasto ei ole vielä valmis, vaan kaipaa osin laajennusta, jotta saavutetaan parempi täsmällisyys. [8, s.19]

Tutkimuksen osuutena etsittiin myös keinoja, joilla rakennesuunnittelija voisi vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen. Tässä yhteydessä betonin lujuutta rakenteissa varioitiin. Betonin lujuusluokan muutos aiheutti laskennassa jopa hiilijalanjäljen kaksinkertaistumisen. Havaittu suuri muutos hiilijalanjäljessä synnytti jatkokysymyksen, voisiko betonin lujuutta pienentämällä rakennuksen hiilijalanjälkeä pienentää? [8, s.14-17]

Lahdensivun tutkimuksen osana toteutettiin tarkastelu, jossa muutettiin betonin lujuutta valituissa kahdessa vaakarakenteessa. Kyseiset rakenteet ovat Lahdensivun tutkimuksen alapohjarakenne 3 ja välipohjarakenne 4. Tutkimus osoittaa, että betonin lujuuden kasvaessa rakenteen hiilijalanjälki kasvaa. Huomioitavaa on kuitenkin, että ero luokkien C20/25 ja C30/37 välillä on huomattavasti suurempi kuin siirryttäessä C35/45-lujuudesta, C40/50-lujuuteen. Tätä asiaa selventää kuvassa 2 esitettävä Lahdensivun laatima diagrammi rakenteiden hiilijalanjäljestä eri betonin lujuuksilla. Huomioitavaa on kuitenkin, että tässä tarkastelussa rakennetta ei muokattu muuten, paitsi muuttaen kyseisten vaakarakenteiden betonin lujuutta. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi rakenteeseen betonin lujuuden muutoksesta mahdollisesti aiheutuvaa lisäraudoitusta ei ole tarkasteltu.

Merkittävänä huomio Lahdensivun tutkimuksessa on, että vaihdettaessa betonin lujuus C20/25 lujuusluokasta, luokkaan C30/37, tulee hiilijalanjälki kertoa suhdeluvulla 1,56. Lujemmilla betoneilla vastaava muutos ei aiheuta yhtä suurta suhteellista eroa.



Kuva 2. Lahdensivun tutkimuksen sisältämä tarkastelu, jossa vaakarakenteiden betonin lujuutta varioitiin ja rakenteille laskettiin hiilijalanjälki. Heikommilla betonin lujuuksilla muutos aiheuttaa suuremman suhteellisen eron hiilijalanjälkeen kuin vastaava muutos lujemmilla betonin lujuuksilla. [8, s.16]

Betonin vesi-sideaine -suhde vaikuttaa betonin lujuuteen. Sideaineen, eli sementin määrällä on suuri merkitys betonin hiilidioksidipäästöihin. Mitä pienempi betonin lujuus on, sitä vähemmän sen tuottamiseen tulee käyttää sementtiä. [8, s.14-15]

Lahdensivun mukaan siirryttäessä C35/45 betonista lujuusluokan C40/50 betoniin ovat lisääntyneet hiilidioksidipäästöt lähes merkityksettömän suuruisia. Huomioitavaa on, että myös sementin laadulla voidaan saavuttaa päästövähennyksiä. [8, s.16]

### 2.1.2 Aiheeseen liittyvä tutkimus ja ohjeistus

Kansainvälisesti tärkein ilmastopolitiikan tavoitteiden määrittäjä on Yhdistyneet Kansakunnat (YK). Kasvihuoneilmiön kansainvälisen laajamittaisen huomioon alkupisteenä voidaan pitää Rio de Janeirossa järjestettyä YK:n vuoden 1992 ympäristö- ja kehityskonferenssia. Tuolloin päätettiin ensimmäistä kertaa kansainvälisestä ilmastonmuutosta koskevasta puitesopimuksesta. Sopimus astui voimaan vuonna 1994. Tällä hetkellä kansainvälistä ilmastopolitiikkaa ohjaa vuonna 2016 voimaan astunut Pariisin ilmastopöytäkirja. Molemmat edellä mainituista sopimuksista ovat Suomen ratifioimia. Näiden sopimusten pohjalta sopimukset ratifioineet osapuolet ovat sitoutuneet saavuttamaan omat päästövähennystavoitteensa. Päästövähennysten tavoittelu on kiihdyttänyt vähähiilisyyden kehitystä myös rakentamisessa. [10]

Euroopan unionin komissio on kehittänyt rakennusten resurssitehokkuudelle yhteisiä mittareita koko EU-alueelle, eli luomaan yhteisen kielen ja käsitteistön kommunikaation tueksi. Komission tuotos on nimeltään Level(s). Level(s) perustuu nykyhetken uusimpaan tieteeseen ja se on toteutettu EU:n jäsenmaiden kestävän rakentamisen ammattilaisten kanssa. [11]

Level(s) tukee rakennushankkeen eri osapuolia. Sitä voivat käyttää esimerkiksi rakennusalan suunnittelijat, rakennusliikkeet, kiinteistöhuolto, rakennusten käyttäjät sekä kiinteistösijoittajat. Voidaan kuitenkin todeta, että Level(s) saavuttaa laajamittaisesti rakennusalan maiden omien vähähiilisyyteen tähtäävien ohjeistusten kautta, sillä se toimii perustana yksittäisten valtioiden luomille järjestelmille. Suomessa Level(s)-menetelmän periaatteet ohjaavat vähähiilisen rakentamisen arviointi- ja raportointimenetelmien kehitystä. Suomen vähähiilisyyden arviointimenetelmää käsitellään tarkemmin luvussa 2.5 Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. [11], [12]

Tultaessa tarkemmin betoniin koko rakennusalaan ohjaavasta kehityksestä, voidaan yhtenä merkittävänä aiheen tietoa kokoavana teoksena mainita Claude Aïtcin ja Sidney Mindessin kirjoittama teos *Sustainability of concrete (2011)* [13]. Kirjassaan Aïtcin ja Mindess mainitsivat betonin käyttämisestä aiheuttamien päästöjen vähentämiseksi seuraavia keinoja [13, s.5]:

- suurempilujuisten betonien käyttäminen
- rakennesuunnittelun- ja suunnittelunormien parantaminen
- betonin käyttöikänsä pidentäminen
- sementin korvaaminen muilla side-aineilla
- täyteaineiden käyttäminen betonissa
- sementin tuottamisen tehostaminen
- jättemateriaalin käyttäminen polttoaineina
- jättemateriaalin käyttäminen betonin valmistuksessa
- vapautuvan hiilidioksidin talteenotto
- sementtiuunin pölyn hyödyntäminen
- vedenkäytön vähentäminen

Osa päästöjä vähentävistä keinoista on toisia keinoja tehokkaampia. Aïtcinin ja Mindessin mukaan todennäköisesti merkittävin keino vähentää betonirakenteen päästöjä on sen käyttöikänsä pidentäminen. Tärkeää on kuitenkin useiden keinojen yhtäaikaista hyödyntämistä, jolla voidaan saada aikaan suuria vaikutuksia aiheutuviin päästöihin. Edellä mainituilla toimilla voidaan myös saavuttaa taloudellista hyötyä. [13, s.5-8]

Tämän tutkimuksen kannalta on erityisen mielenkiintoista, että Aïtcin ja Mindess mainitsevat, että korkealujuusbetonin käyttäminen normaalilujuisen betonin sijaan voi vähentää merkittävästi päästöjä. Esimerkkinä nostetaan esiin pilari, jonka normaali puristuslujuudeltaan 25 MPa lujuinen betoni korvataan korkealujuisella 75 MPa betonilla. Tässä esimerkissä pilarin dimensioita voidaan muuttaa pienemmäksi, jonka seurauksena tarvittavan kiviaineksen määrä vähenee yhteen kolmasosaan ja käytetyn sementin määrä puolittuu. Pilari on edelleen kykenevä kantamaan saman pystykuorman. Aïtcin ja Mindessin mukaan taivutetussakin pilarissa materiaalia säästyy noin 25...30 prosenttia. On selvää, että näin merkittävä materiaalisäästö tarkoittaa myös päästöjen vähenemistä. [13, s.8]



## 2.2 Rakentaminen päästöjen aiheuttajana

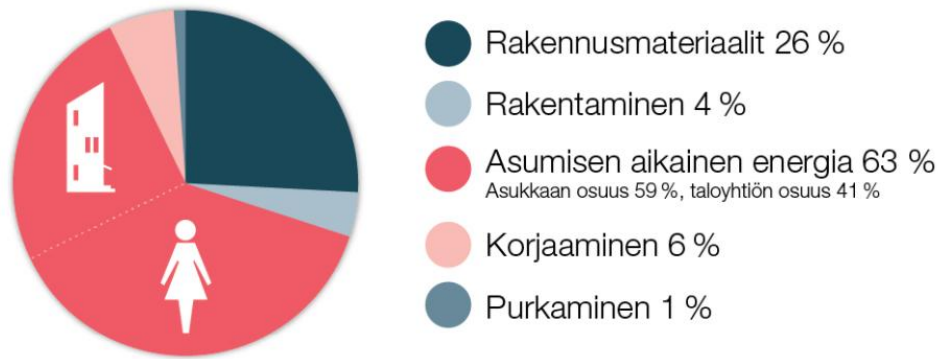
### 2.2.1 Rakennusalan ympäristövaikutukset ja tulevaisuuden lainsäädäntö

Rakentaminen sekä rakennusten käyttö aiheuttaa suuren osuuden koko ihmiskunnan päästöistä. Koko maailman laajuisesti, 40...50 % maapallon raaka-aineista painoprosentteina mitattuna käytetään rakentamiseen. Euroopassa rakentaminen kuluttaa kaikista teollisuusaloista eniten raaka-aineita, sen osuus on noin 50 % kaikesta raaka-ainemenekistä. Vastaavasti rakentaminen ja purkaminen synnyttää jätteistä 40...50 %. Materiaalien kierrättämisessä ja kiertotaloudessa on havaittavissa suuria mahdollisuuksia. [14, s.4-7], [16, s.5]

Kiinteistö- ja rakennusala, eli tarkemmin, rakennettu omaisuus, on suuruudeltaan noin 83 % Suomen kansallisvarallisuudesta. Tästä 45 %-osuus on rakennuksia ja loput noin 38 % infrastruktuuria. Tämän suuren kokonaisuuden nykytilaa on luotu arvioimaan puolueeton asiantuntijoiden arvio rakennetun ympäristön tilasta, arvion nimi on ROTI. ROTI on julkaistu ensimmäisen kerran vuonna 2007 ja tämän jälkeen se on ilmestynyt joka toinen vuosi. Vuoden 2021 arviossa on mukana yli 120 kiinteistö- ja rakennusalan asiantuntijaa. [15, s.3-4]

*ROTI 2021 -raportin* [15] mukaan Suomessa kiinteistö- ja rakennusala käyttää 35 % kaikesta maassa kulutettavasta energiasta, aiheuttaen 30 % suomen hiilidioksidipäästöistä. Asuinrakennuksella käytetystä energiasta valtaosa kuluu asumisen aikaiseen energiankulutukseen. Asumisaikainen energiankulutus aiheuttaa suuruudeltaan noin 63 % asuinrakennuksen koko elinkaaren hiilidioksidipäästöistä. [15, s.4] Kuva 3 sivulla 15 selvittää, millä osuuksilla eri toiminnot aiheuttavat tyypillisen asuintalon hiilijalanjäljen Suomessa [17].

## Asuintalon hiilijalanjälki Suomessa



Kuva 3. Asuintalon hiilijalanjälki Suomessa. Asumisen aikainen energiankulutus on merkittävässä osassa, lisäksi rakennusmateriaalien osuus hiilijalanjäljessä korostuu. [17]

On selvää, että rakentaminen on suuressa roolissa siirryttäessä kohti ympäristötavoitteita. Nykyisen hallitusohjelman (2019) tavoitteena on, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta. Yhtenä edellytyksenä hallitusohjelmassa mainitaan rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen. [16]

Ympäristöministeriö on maininnut tavoitteekseen, että rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä tullaan ohjaamaan lainsäädännöllä 2020-luvun puoleenväliin mennessä. Ympäristöministeriö mainitsee rakennusmateriaalien olevan erityisesti tavoitteiden keskiössä, sillä niiden osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä on merkittävä. Rakennusten laskennallinen energiatehokkuus paranee koko ajan ja tästä syystä rakennusmateriaalien suhteellinen osuus rakennuksen kasvihuonepäästöistä on kasvava. [18]

Ympäristöministeriön teettämien selvitysten pohjalta, julkaistiin ympäristöministeriön toimesta kolmivaiheinen tiekartta rakennusten elinkaaren hiilidioksidipäästöjen ohjaukseen. Tavoitteena on ottaa käyttöön vuonna 2025 uusia säädöksiä, jotka kuitenkin koskevat enimmäisissä määrin vain uudisrakentamista. Nopeaa kehitystä hidastaa edellytys kiinteistö- ja rakentamisalan osaamisen kehittämisessä sekä vaadittava tietomallinnuksen kaltaisten menetelmien ja työkalujen kehitys. Ympäristöministeriö kuitenkin toteaa, että suurilta osin jo nyt tarvittavat standardit ja välineet tiekartan toteuttamiseksi ovat olemassa. [18]

Hiilijalanjäljen pienentämiseksi tulee ensin voida arvioida hiilijalanjälki. Tulevien lakien ja säädösten ohella ympäristöministeriö tekee työtä kehittääkseen menetelmiä rakentamisen hiilijalanjäljen arviointiin. Ympäristöministeriön valmisteleman rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmän avulla on tarkoitus helpottaa rakentamisen ilmastovaikutusten laskemista. Ensimmäinen versio siirtyi rakennushankkeiden testattavaksi koekäyttöön syyskuussa 2019. Arviointimenetelmän pohjana on Euroopan komission Level(s)-menetelmä sekä EN-standardit. [18], [19]

Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmien ohella ympäristöministeriö ylläpitää rakentamisen päästötietokantaa. Päästötietokanta on tietokanta, jossa on puolueetonta dataa rakennustuotteiden ilmastovaikutuksista. Palvelu on kaikille avoin ja maksuton ja sen on tarkoitus edistää kasvihuonepäästöjen laskentaa sekä vähähiilisten rakennusten suunnittelua. [18]

Rakennusalalle asetettujen ympäristötavoitteiden saavuttaminen ei ole ongelmattonta. On kuitenkin huomattava, että käynnissä on lukuisia toimenpiteitä, joilla kohti ilmastotavoitteita edetään. Voidaan todeta, että tie kohti hiilineutraalisuutta tai parhaimmillaan hiilinegatiivisuutta on monen tekijän summa. Pienenkin rakentamisen osan kehittäminen vie suurta kokonaisuutta kohti koko rakennusalan yhteisiä ilmastotavoitteita.

## 2.2.2 Asuinkerrostalon päästöjen jakautuminen rakenneosille

Tässä luvussa esitellään tyypillisen asuinkerrostalon rakenteiden aiheuttamien päästöjen suhdetta toisiinsa nähden. On selvää, että tarkat lukemat vaihtelevat yksilöllisesti kohteen mukaan. Tekstiosion tarkoitus on kuitenkin luoda lukijalle käsitys siitä, missä suuruusluokissa eri rakenneosien välillä liikutaan puhuttaessa kasvihuonepäästöistä. Asian havainnollistamiseksi esitellään eräs ympäristöministeriön julkaisema raportti ja sen sisältämä tapaustutkimus aiheesta.

Vuonna 2013 ympäristöministeriön julkaisema raportti *Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – Selvitys rakennusmateriaalien vaikutuksesta rakentamisen kasvihuonepäästöihin, tiivistelmäraportti* [20] on dokumentti, joka selventämään tyypillisen asuinkerrostalon eri rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöjen suhteita toisiinsa nähden. Raportissa esitellään parametrinen tapaustutkimus, jossa lasketaan rakennusmateriaalien koko elinkaaren aikana aiheuttamien kasvihuonepäästöjen määrä [20, s.11].

Edellä mainitussa ympäristöministeriön raportissa esitetty tapaustutkimus tarkastelee tyypillistä asuinkerrostaloa, jossa on 6 asuinkerrosta ja kellari. Kyseessä on betonielementtikerrostalo. Asuntoja rakennuksessa on 28 kappaletta ja bruttoala rakennuksessa on 3056 brm<sup>2</sup>. Rakennus on valmistunut vuonna 2011. Kuvassa 4 esitetään havainnekuva tapaustutkimuksen esimerkkitapauksesta. [20, s.11]



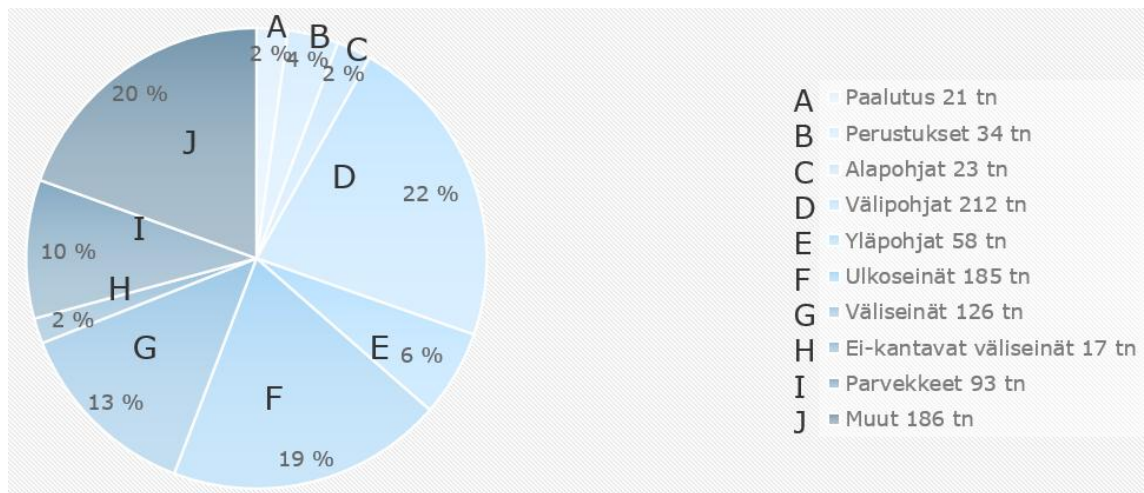
Kuva 4. Havainnekuva ympäristöministeriön tapaustutkimuksessa esimerkkitapauksena käyttämästä kerrostalosta. Rakennus on valmistunut vuonna 2011 ja se on valikoitunut tutkimukseen, koska rakennusta on pidetty ajalleen tyypillisenä uudisrakennus asuinkerrostalona. Alkuperäisen kuvan lähteeksi on merkitty Skanska. [20, s.12]

Edellä mainitussa tapaustutkimuksessa rakenneosien massalle on annettu vaihteluväli. Vaihteluväli selittyy sillä, että tutkimuksessa on arvioitu vaihtoehtoisia rakenteita ja materiaaleja. Tutkimuksessa todetaan kuitenkin, että vaihteluvälien ääripäät eivät edusta tyypillisiä rakenteita. Laskennassa on huomioitu materiaalien ja tuotteiden valmistus sekä esimerkiksi kuljetukset työmaalle ja työmaalla syntyvä hukka. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin 50 ja 100 vuoden aikana käytettävien korjausmateriaalien tarve. Kuvassa 5 esitetään taulukoituina rakennuksen arvioitu kokonaismassa ja hiilijalanjälki rakennusosittain. [20, s.12]

	Massa Perustapaus (tn)	Vaihteluväli, min... max, (tn)	CO <sub>2</sub> -ekv Perustapaus (tn)	Vaihteluväli min... max (tn)
Maa-ainekset	252	0... 1508	1	0... 7
Paalutus	146	0... 518	21	0... 75
Perustukset	292	164... 460	34	19... 54
Alapohjat	286	232... 407	23	21... 45
Erillinen, kantava rakennusrunko	0	60... 0	0	21... 0
Ulkoseinät	664	302... 1028	185	83... 267
Väliseinät	624	213... 624	126	59... 126
Välipohjat	1143	529... 1611	212	121... 256
Yläpohjat	204	51... 358	58	24... 82
Parvekkeet	461	130... 461	93	35... 93
Hormit	78	9... 78	16	4... 16
Portaat	6	1... 6	1	0... 1
Ei-kantavat väliseinät	48	39... 77	17	14... 30
Ikkunat, ovet, lasitukset	30	23... 38	54	42... 69
Kalusteet, varusteet, pintamateriaalit	99	75... 125	65	49... 82
Rakenteisiin kiinnittämättömät materiaalimäärät	35	26... 44	18	13... 22
Talotekniset järjestelmät	22	14... 29	31	23... 38
Korjaukset, 50 vuoden elinkaari	322	238... 408	281	211... 354
Korjaukset, 100 vuoden elinkaari	886	604... 1291	713	489... 918
Yhteensä, 50 vuoden elinkaari	4712	2106... 7780	1235	741... 1617
Yhteensä, 100 vuoden elinkaari	5276	2472... 8663	1667	1020... 2181

Kuva 5. Vuonna 2013 julkaistun *Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – Selvitys rakennusmateriaalien vaikutuksesta rakentamisen kasvihuonepäästöihin, tiivistelmäraportti* -julkaisussa esitetyn tapaustutkimuksen laskennan tuloksia. Kuvassa esitetään taulukoituina vuonna 2011 valmistuneen tyypillisen asuinkerrostalon eri rakenneosien hiilidioksidiekvivalentteja päästöjä. Tapaustutkimuksessa tarkasteltiin erilaisia rakenne- ja materiaalivaihtoehtoja, jonka aiheuttamana tuloksia on taulukoitu vaihteluvälillä. Taulukon maininta: "perustapaus" edustaa kuitenkin parhaiten tyypillistä rakennetta. [20, s.14]

Kuten kuvasta 5 sivulla 18 havaitaan, on rakenneosien hiilidioksidipäästöihin kohdistuvaa tapaustutkimusta haastava tehdä varioiden ratkaisuja ja samanaikaisesti yleispätevästi. Tehdessä laskelmia tulee tehdä olettamia, joiden vaikutus on lopputuloksen kannalta merkittävä. Tuloksista voidaan kuitenkin luoda rakenneosille hiilidioksidipäästöjen suuruusluokkia sekä tarkastella eri rakenneosien välisiä päästöeroja. Kuvassa 6 esitetään tämän tutkimuksen kannalta merkittävimpien rakenneosien hiilidioksidipäästöjen osuudet rakennuksen kokonaispäästöistä. Kuvan diagrammissa ei ole huomioitu tapaustutkimuksessa arvioituja 50 tai 100 vuoden käyttöiän vaatimia korjauksia. Diagrammissa luokkaan muut (J) luokitellaan kuvassa 5 sivulla 18 esitetyt rakenteet, joita ei ole mainittu yksilöllisesti ryhmissä A-I. Näitä rakenteita ovat: maa-ainekset, hormit, portaat, ikkunat, ovet, lasitukset, kalusteet, varusteet, pintamateriaalit, rakenteisiin kiinnittämättömät materiaalmäärät sekä tekniset järjestelmät.



Kuva 6. Kuvassa on *Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – Selvitys rakennusmateriaalien vaikutuksesta rakentamisen kasvihuonepäästöihin, tiivistelmäraportti* -julkaisun [20] perusteella muodostettu ympyrädiagrammi, joka kuvastaa eri rakennusosien aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen suhdetta toisiinsa nähden. Kuva Joonas Jaakkola.

Kuvasta 6 voidaan havaita, että tyypillisessä betonielementti -asuinkeuhkorakennuksessa merkittäviä päästöjä aiheuttavia rakenneosia ovat vaakarakenteet, eli alapohja, välipohjat ja yläpohja. Kuitenkin myös seinien ja perustusten osuus päästöjen kokonaisuudesta on suuri. Tapaustutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että kehittämällä ratkaisuja vähentää perustusten sekä pystyrakenteiden hiilidioksidipäästöjä, voidaan saavuttaa merkittävää hyötyä koko rakennuksen hiilijalanjäljelle.

## 2.3 Betonin valmistuksessa syntyvät päästöt

### 2.3.1 Betonin valmistuksen perusteet

Betoni on maailman eniten käytetty rakennusmateriaali. Betonia tuotetaan globaalisti vuosittain noin 13 miljardia kuutiometriä. Tämä vastaa noin 2 kuutiometriä jokaista ihmistä kohden. Tämän betonimäärän valmistamiseen käytetään 4,2 miljardia tonnia sementtiä, eli noin puoli tonnia sementtiä yhtä ihmistä kohden. [21], [22]

Betonin pääraaka-aineet ovat sementti, vesi ja kiviaines. Näistä hiilijalanjäljeltään merkittävin osa-aine on sementti, joka toimii betonin sideaineena. Sementtiä kuluu yhteen kuutiometriin betonia noin 200...400 kilogrammaa, eli 8...16 prosenttia betonin painosta. [23]

Sementin raaka-aineina ovat luonnonmineraalit, suurimmissa määrin kalkkikivi. Kalkkikivi on maakuoren yleisin kivilaji ja näin ollen hyvin saatavissa. Betonin valmistuksessa sementti reagoi veden kanssa ja muodostaa lujan mineraalin, niin sanotun sementtikiven. Kalkkikivin muodostuessa betonissa oleva kiviaines sekä rauditus muodostavat yhtenäisen lujan rakenteen. [23]

Sementin valmistuksessa jauhetut raaka-aineet kuumennetaan uunissa noin 1450 celsiusasteen lämpötilaan. Kuumennuksen vaikutuksesta aineiden mineraalit sulavat ja reagoivat keskenään. Reagoinnin vaikutuksesta, kalkkikiven sisältämä hiilidioksidi vapautuu. Kuumennuksen aiheuttamien reaktioiden seurauksena reaktiotuotteena saatu aines, lähinnä kaliumsilikaatit, muodostavat niin sanottuja klinkkerimateriaaleja. Kun nämä jauhetaan, saadaan valmista sementtiä. [23]

Betonille halutaan erilaisia ominaisuuksia sen käyttötarkoituksen mukaisesti. Ominaisuuksia voidaan muokata muuttamalla osa-aineiden määrasuhteita tai lisäämällä betoniin lisäaineita. Betonia värjätään lisäämällä massaan pigmenttejä tai käyttämällä väriä kiviainesta. [23] Vaativat käyttöolosuhteet voivat asettaa erityisvaatimuksia betonimassalle, tästä esimerkkinä toimii kuvassa 7 sivulla 21 esitetty vedenalainen valu [24]. Kuvassa betonia pumpataan veden alle, kun samanaikaisesti veden alla toimii sukeltaja, joka viestii betonipumpun käyttäjälle, minne päin betonin pumppausletkua siirretään.

Vedenalainen betoninvalaminen on mahdollista, sillä betonin kovettumisreaktion aiheuttaa betonimassan sisältämän veden ja sementin kemiallinen reaktio [23].



Kuva 7. Helsingissä Sompasaassa vuonna 2018 otetussa kuvassa tehdään vedenalaista valua. [24]

Betonin runkoaineena toimii kiviaines. Betonin tilavuudesta noin 70 prosenttia on erikoista kiviainesta. Normaalisti käytetyn kiviaineen raekoko vaihtelee välillä 0,02...16 mm. Betonin valmistuksessa käytettävä vesi tulee olla riittävän puhdasta. Erityisesti sokerit tekevät vedestä käyttökelvotonta, sillä sokerit hidastavat tai estävät kokonaan betonin kovettumisen. [23]

Raaka-aineista sekoitettu betoni valetaan muotteihin, joissa se kovettuu. Raudoitetuissa rakenteissa muoteissa on valmiiksi tarvittavat raudotteet. Betonimassa tiivistetään muottiin. Tärkeää on suunnitella valu niin, että betonin kovettumisreaktion aiheuttama lämpö ei nosta betonin lämpötilaa liian korkeaksi. Vastaavasti kylmissä olosuhteissa valua saattaa joutua lämmittämään. Tyypillisesti valun jälkeen tehdään jälkihoitotoimenpiteitä, joilla estetään liian nopea betonin pinnan kuivuminen, jonka seurauksena voisi aiheutua etenkin halkeilua. [23], [25]



Betonia käytetään paikallavalurakenteissa sekä elementtitehtailla valmisosien valmistuksessa. Kun valmista betonimassaa tilataan työmaalle paikallavalurakenteisiin valettavaksi, puhutaan valmisbetonista. Betonielementit ovat puolestaan valmisosia, joita valmistavat elementtitehtaat. Nämä betonielementit ovat kovettuneita betonituotteita, jotka asennetaan työmaalla paikalleen. [23]

Kuvassa 8 esitetään vuonna 2014 Vaasan lähetyillä Torkkolassa otettu kuva. Kuvassa on yksi kuudestatoista tuulivoimalan anturasta. Valmis tuulivoimala kohoaa jopa 140 metrin korkeuteen ja vaatii näin ollen massiiviset perusrakenteet. Torkkolan kuudentoista tuulivoimalan perustuksiin tarvittiin miljoona kiloa raudoitetta ja yli kymmentuhatta kuutiota betonia. Tämä esimerkki osoittaa, että myös uusiutuvan energian tuotanto vaatii sen rakennusvaiheessa suuren määrän raudoitetta sekä betonia. [26]



Kuva 8. Kuvassa näkyvät tuulivoimalan perustuksen raudoitteet ennen betonin valamista. [26]

Onnistuneen betonityön taustalla on merkittävänä tekijänä oikean betonimassan valinta. Betonimassan valinta käyttötarkoitukseensa parhaiten sopivaksi onnistuu parhaiten

rakennesuunnittelijan, työmaan ja valmisbetonin toimittajan yhteistyönä. Rakennesuunnittelija määrittää rakenteisiin betonille lujuus- ja rakenneluokan, rasitusluokan, raudoitteita suojaavan betonipeitten paksuuden, toleranssit sekä pintaluokat. Näiden tietojen sekä työmaaorganisaation mahdollisesti esittämien asioiden pohjalta, betonin valmistaja voi muokata valmisbetonista parhaiten kohteeseen sopivan. [23], [27]

### 2.3.2 Betonin komponenttien osuudet teräsbetonin päästöistä

*Betonitekniikan oppikirjan by 201 2004* [28] mukaan, kuutio tavanomaisesti raudoitettua teräsbetonia koostuu suunnilleen seuraavista aineista [28, s.28]:

- sementtiä 270 kg
- raudoitusta 80 kg
- kiviainesta 1850 kg
- vettä 190 kg
- ilmaa 20 litraa

Lisäksi betoni voi sisältää seosaineita, lisäaineita sekä kuituja [29, s.28].

Normaalissa teräsbetonissa kiviainesta ja vettä on yli 80 prosenttia. Veden sekä kiviaineen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat varsin pieniä. Betonin päästöistä valtaosa koostuu kin betoniin käytettävän sementin valmistuksesta. Sementin osuus betonin aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä on yleensä 60...80 prosenttia. [29, s.47]

Kuvassa 9 sivulla 24 esitetään Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämän *Rakentamisen päästötietokannan* -esittämiä päästötietoja eri betonilaaduille ja materiaaleille. Tietoja on täydennetty ympäristöministeriön julkaiseman *Rakennusten hiilijalanjäljen arviointityökäulun* materiaaliluettelon taulukkoarvoilla. Taulukossa materiaalin hiilijalanjälki ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenttina.

Materiaali	Hiilijalanjälki, yksikkö: kgCO <sub>2</sub> e/kg
Raudoite, normaali*	0,474
Raudoite, normaali	0,670
Raudoite, ruostumaton	4,600
Valmisbetoni C8/10	0,074
Valmisbetoni C12/15	0,090
Valmisbetoni C16/20	0,103
Valmisbetoni C20/25	0,119
Valmisbetoni C25/30	0,120
Valmisbetoni C30/37	0,140
Valmisbetoni C35 (portland)*	0,146
Valmisbetoni C35 (seossementti)*	0,127
Valmisbetoni C40/50	0,150
Valmisbetoni C50 (portland)*	0,175
Valmisbetoni C60/75	0,190
Valmisbetoni C80 (portland)*	0,210

Kuva 9. Kuvan esittämät tiedot perustuvat Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämään Rakentamisen päästötietokanta -internetsivustoon [30]. Tietoja on täydennetty ympäristöministeriön julkaiseman rakennusten hiilijalanjäljen arviointityökalun [31] materiaaliluettelon sisältämin arvoihin. (Tähdellä merkityt tiedot ovat peräisin hiilijalanjäljen arviointityökalun materiaaliluettelosta). Kuva Joonas Jaakkola.

Yleisesti raudoituksen osuus teräsbetonin päästöistä on noin 10...25 prosenttia. Näin ollen voidaan todeta, että 90...75 prosenttia teräsbetonin päästöistä aiheutuu muista komponenteista kuin raudoitteista. [32, s.47]

Betonin hiilijalanjälkeä voidaan havainnollistaa vertaamalla sitä arkipäiväisiin aiheuttamiimme päästöihin. Yksi kuutio raudoittamatonta betonia painaa noin 2400 kg; mikäli tämä betoni olisi laadultaan Portland-sementillä valmistettu valmisbetonia, jonka lujuus on C35, aiheutuisi siitä 351 kgCO<sub>2</sub>e hiilijalanjälki. Samansuuruisen hiilijalanjäljen aiheuttaa noin 2500 kilometriä yksityisautoilua tai 70:nen tyypillisen sähkösaunan lämmitys. [28, s.28], [33]

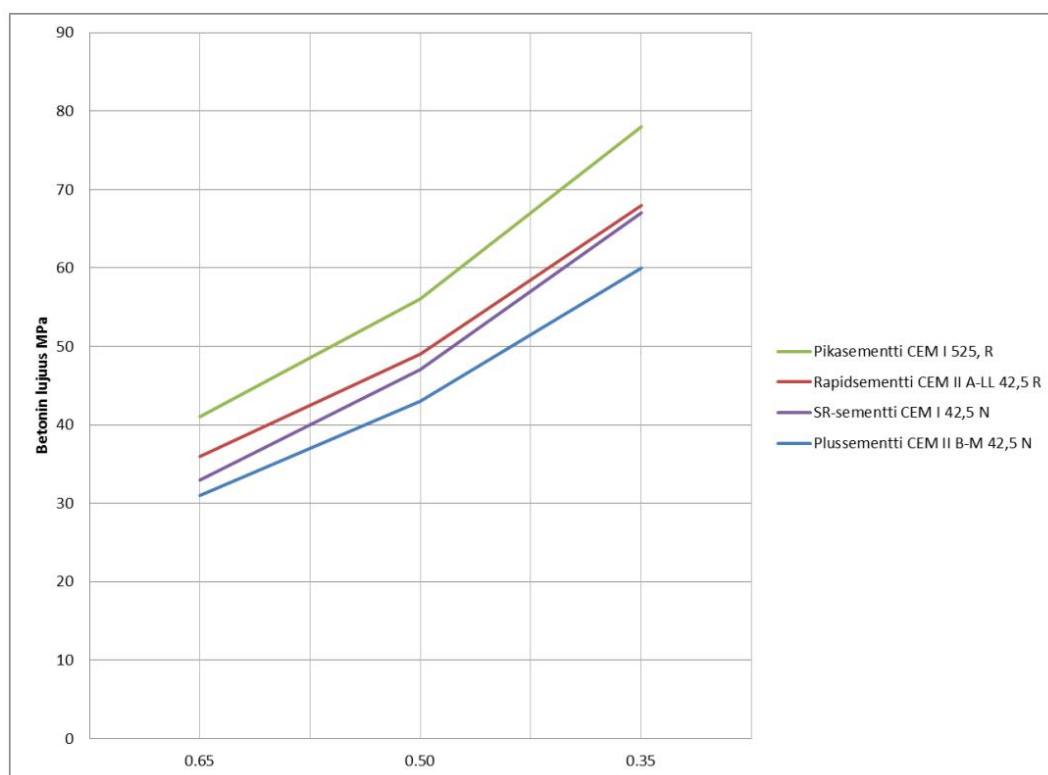
Kierrätyksellä on suuri merkitys raaka-aineiden aiheuttamiin päästöihin. Suomessa betonin kierrätysaste on ollut jatkuvassa kasvussa ja se on nykyään yli 80 prosenttia. Kierrätys tapahtuu markkinaehtoisesti, eikä sitä tarvitse erikseen tukea yhteiskunnallisesti. Jätebetonia hyödynnetään tienrakennukseen sekä uuden betonin valmistukseen. [34]

Vastaavasti maailmanlaajuisesti yli 80% kaikesta teräsromusta palautuu takaisin terästehtaille. Pohjoismainen betoniterästuotanto on vuodesta 1994 lähtien ollut kokonaan romupohjaista. [35]

### 2.3.3 Betonin lujuuden vaikutus betonituotannon päästöihin

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka suuri merkitys betonin lujuusluokalla on betonin tuotannon aiheuttamiin kasvihuonepäästöihin. Tämä luku syventää ennestään luvussa: 2.1 Elina Lahdensivun kandidaattityö esiteltyä aihetta.

Betonin lujuusluokka vaikuttaa betonin vesi-sideaine -suhteeseen. Betonin lujuuden kasvattaminen kasvattaa tarvittavaa sementin määrää ja aiheuttaa näin ollen valmistusvaiheessa enemmän päästöjä. [8, s.14-15] Kuvassa 10 esitetään 28 vuorokautta kovettuneen betonin lujuutta eri vesi-sementti -suhteilla. Kuvaajassa on esitetty lujuuksia myös eri sementtilaaduille. [36, s.26]



Kuva 10. Betonin vesi-sementtisuhteen vaikutus 28 vuorokautta kuivuneen betonin puristuslujuuteen. Suurentamalla sementin määrää saadaan aikaan lujempaa betonia. [36, s.26]

Sementin tuotanto on yksi maailman suurimmista kasvihuonepäästöjen aiheuttajista. Sen osuus koko maailman hiilidioksidipäästöistä on noin viisi prosenttia. Suomessa sementtiteollisuus on kuitenkin selvästi EU:n keskiarvoa puhtaampaa. Puhtaampi sementintuotto on saavutettu käyttämällä kierrätyspolttoaineita sementin valmistuksessa tarvittavan lämpötilan saavuttamiseksi. [20]

Betonin lujuusluokkia on useita. Lujuus merkitään eurokoodin mukaisesti niin, että ensimmäinen luku kirjaimen C (englanniksi cylinder) jälkeen tarkoittaa standardilieriöstä mitatun puristuslujuuden ominaisarvoa ja toinen lukema tarkoittaa 150 millimetrin kuutiosta määritettyä puristuslujuuden ominaisarvoa. Lukema kuvaa puristuslujuuden suuruutta megapascalina. Yleisesti betonin puristuslujuus tarkoittaa 28 vuorokautta kovettuneen betonin lujuutta. [37, s.64]

Alin lujuusluokka betonille on C12/15 ja ylin C90/105. Tavanomaisessa talonrakennuksessa käytössä ovat lujuusluokat C20/25, C30/37, C35/45, C40/50, C45,55 ja C50/60. Kun betonin lujuus on C55/67 tai suurempi, on kyseessä korkealujuusbetoni. [37, s.64] Kuvassa 11 esitetään standardin SFS 7022: 2019 pohjalta laadittu taulukko, jossa esitetään vähimmäisementsimäärät eri betonin lujuusluokille [38]. Vähimmäisementsimäärä vaihtelee rasitusluokan sekä tarvittavan betonilujuuden mukaan. Vaihteluväli, tyypillisillä betonilujuuksilla on 160...360 kg/m<sup>3</sup>. [37, s.90]

Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta (SFS7022:2019).

KOOSTUMUS JA OMINAISUUDET	RASITUSLUOKAT																		
	Ei rasitusta	KARBONISOITUMISEN AIHEUTTAMA KORROOSIO					KLORIDIEN AIHEUTTAMA KORROOSIO						JÄÄDYTYS-SULATUS-RASITUS				KEMIALLISESTI AGGRESSIIVISET AINEET		
							MERIVESI			KLORIDIT MUUSTA KUIN MERIVEDESTÄ									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
SUURIN V/S SUHDE		0,90	0,80	0,60	0,60	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,60	0,50	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40	
VÄHIMMÄISLUJUUSLUOKKA	C12/15	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50	
VÄHIMMÄISEMENTSIMÄÄRÄ [KG/M <sup>3</sup> ]		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330	
ILMAMÄÄRÄ [%]												4,0	5,0	4,0	5,0				

Kuva 11. Kuvassa esitettävässä taulukossa ovat betonin rasitusluokkien raja-arvot maksimi vesisementsuhteelle, minimi sementsimäärälle, lujuusluokalle ja ilmamäärälle. Taulukon tiedot perustuvat standardiin SFS 7022:2019. [38]

Sementtityypillä on käytetyn sementin määrän lisäksi merkitystä betonin valmistuksen aiheuttamille päästöille. Pääsementtilajit ovat CEM I Portlandsementti, CEM II Portlandseossementti, CEM III masuunikuonasementti, CEM IV Pozzolaaniseimentti ja CEM V seossementti. Kuvassa 12 esitettävässä taulukossa on Finnsementti Oy:n ilmoittamia hiilidioksidiekvivalentteja päästöarvoja eri sementtituotteille. [36]

Sementin tuotenimi	kg CO2-ekv
<b>Plussementti</b>	
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	
Normaalisti kovettuva portlandsementti	627,34
<b>Rapidsementti</b>	
CEM II/A-LL 52,5 N	
Nopeasti kovettuva portlandsementti	712,47
<b>Pikaseimentti</b>	
CEM I 52,5 R	
Erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti	716,77
<b>SR-sementti</b>	
CEM I 42,5 N -SR3	
Normaalisti kovettuva sulfaattikestävä portlandsementti	757,99

Kuva 12. Kuvassa esiintyvässä taulukossa on Finnsementti Oy:n sementtituotteiden valmistuksesta aiheutuvia hiilidioksidiekvivalentteja päästöjä. Kyseessä on yrityksen Lappeenrannan tehtaan valmistamat tuotteet. Esitetty päästö kuvastaa 1 tonnin sementin tuotannosta aiheutuvaa 100 vuoden tarkasteluvälin GWP (englanniksi Global Warming Potential) arvoa. [31] Kuva Joonas Jaakkola.

Kuvasta 12 voidaan havaita, että sementtituotteiden välillä on eroja suhteessa niiden ympäristövaikutuksiin. Lähivuosina on kehitetty entistä vähemmän ympäristöä kuormittavia betonivaihtoehtoja. Rudus Oy tarjoaa tuotenimeltään Vihreää betoni -nimistä tuotetta, joka suunnitellaan yksilöllisesti kohteeseen. Tällä betonilla voidaan saavuttaa yleisesti 20...50 prosentin ja tapauskohtaisesti jopa suurempi hiilidioksidipäästöjen väheneminen. On kuitenkin huomioitava, että toistaiseksi tämänkaltaisten tuotteiden kovettumisajat, rasituksen kestävyys ja hinta voivat olla laajan käytön hidasteita. [40]

## 2.4 Ympäristövaikutusten laskennan perusteet

Ympäristöministeriön vähähiilisen rakentamisen tiekartan mukaan tavoitteena on, että rakennusten elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ohjataan lainsäädännöllä 2020-luvun puoliväliin mennessä. Tämän tavoitteen toteutumiseksi on oltava käytössä toimivat laskentamenetelmät. Seuraavissa luvuissa käsitellään teoriaa hiilijalanjäljen laskennassa sekä laskentaan kehitettyjä malleja. [18]

Huomioitavaa on, että eri päästötiedoilla tai laskennassa käytetyillä työkaluilla saadut tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Onkin siis erittäin tärkeää, että laskentamenetelmiä kehitetään ja yhtenäistetään. [9, s.13]

### 2.4.1 Päästöjen laskeminen ekvivalenttina hiilidioksidipäästönä

Antropogeenisillä kasvihuonekaasuilla tarkoitetaan kasvihuoneilmiötä voimistavia kaasuja, joiden pitoisuuksiin ilmakehässä ihmisen toiminta oleellisesti vaikuttaa. Vaikka hiilidioksidin epäsuotuisa vaikutus kasvihuoneilmiön voimistamiseen on paljon pienempi kuin monilla muilla kasvihuonekaasuilla, on hiilidioksidipäästöjen määrä paljon muita kaasuja suurempi ja aiheuttaa näin ollen merkittävän osan kokonaisvaikutuksesta. [41]

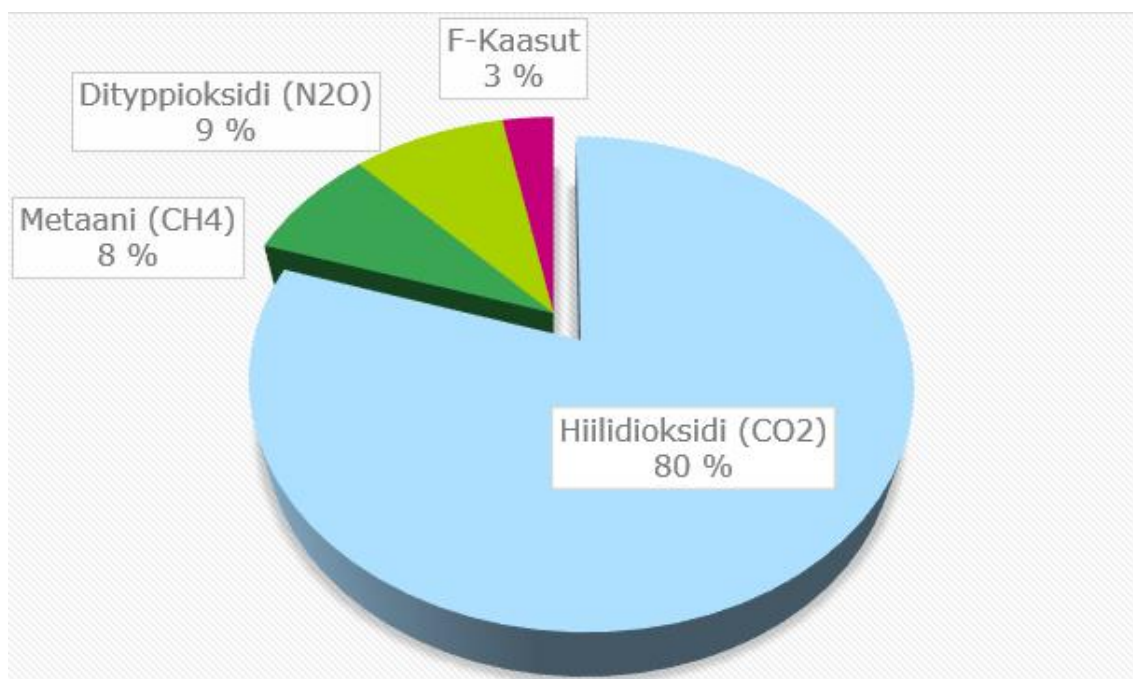
Mielekkään ja tavoitteellisen ilmastopolitiikan luonti edellyttää suhteellisen yksinkertaista menetelmää verrata eri kasvihuonekaasujen ilmaston lämmitysvaikutuksia. Suhteuttamalla eri päästöjen vaikutuksia, voidaan sopia päästövähennystavoitteista päästöille yhtenevästi, eikä jokaiselle kaasulle erikseen. [40, s.3]

Nykyisenä menetelmänä kasvihuonekaasujen ilmaston lämmitysvaikutuksen vertaamisessa käytetään GWP-arvoja (englanniksi Global Warming Potential). GWP-arvojen perusajatus on verrata kaasun lämmityksen voimakkuutta suhteessa hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) lämmitysvaikutukseen. Mitä suurempi GWP-arvo on, sitä voimakkaampi on kaasun ilmakehää lämmittävä vaikutus. Tyypillisesti käytetään GWP<sub>100</sub>-kertoimia, jotka pyrkivät kuvaamaan, kuinka paljon eri kasvihuonekaasut lämmittävät maapalloa 100 vuoden aikana. GWP<sub>100</sub>-kertoimien lisäksi on luotu GWP<sub>20</sub>- ja GWP<sub>500</sub>-kertoimet, joiden vaikutusaika on alaindeksin lukuarvon suuruinen, eli 20 tai 500 vuotta. [40, s.14]

Ihmisen toiminnasta syntyvistä kasvihuonekaasuista merkittävin on hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ). Hiilidioksidin ilmastoa lämmittävä vaikutus on hyvin pieni verrattuna moneen muuhun kasvihuonekaasuun, joiden GWP-arvot voivat olla kymmeniä tai satoja kertoja hiilidioksidia suurempia. Määrältään hiilidioksidia päästetään ilmakehään kuitenkin niin paljon muita kasvihuonekaasuja enemmän, että sen lämmitysvaikutus on suurempi kuin kaikkien muiden kaasujen yhteenlaskettu vaikutus. [40, s.14-15]

Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2019 Suomen hiilidioksidiekvivalenttina ilmaistuista kokonaiskasvihuonepäästöistä 80 prosenttia oli hiilidioksidia, 8 prosenttia metaania, 9 prosenttia dityppioksidia (ilokaasu) ja 3 prosenttia F-kaasuja. Edellä mainittuja lukemia on havainnollistettu lähteen pohjalta laaditussa kuvassa 13. [41]

Kuvan 13 kokonaiskasvihuonekaasupäästöjen laskennassa on käytetty IPCC:n eli hallitusten ilmastopaneelin (englanniksi Intergovernmental Panel on Climate Change) ilmastopimuksen raportointiohjeiden mukaisia  $\text{GWP}_{100}$ -kertoimia. Kertoimina metaania ( $\text{CH}_4$ ) suhteutetaan luvulla 25, dityppioksidia 298 ja F-kaasuja, riippuen kaasusta arvoilla välillä 12...22800. [41]



Kuva 13. Tilastokeskuksen tietoihin perustuvat Suomen antropogeenisten kasvihuonekasupäästöjen suhteelliset osuudet vuonna 2019 hiilidioksidiekvivalenttina ilmaistuna [41]. Kuva Joonas Jaakkola.



GWP-arvot ovat kehittyneet tieteellisen ymmärryksen kehittyessä, voidaan kuitenkin todeta, että GWP-kertoimiin liittyy melko suurta epävarmuutta. Epävarmuus aiheutuu muun muassa kaasujen elinajoista ilmakehässä ja todellisen lämmitysvaikutuksen suuruudesta. IPCC eli hallitustenvälisen ilmastopaneelin vuonna 2001 julkaiseman kolmannen arviointiraportin mukaan epävarmuus on suuruusluokaltaan  $\pm 35$  prosenttia. Tämän jälkeen GWP-arvoja on päivitetty. [40, s.15]

GWP metriikalle on esitetty vaihtoehtoja, niistä merkittävimpanä voidaan mainita vuonna 2005 tieteellisessä kirjallisuudessa esitetty vaihtoehtoinen menetelmä GTP (englanniksi Global Temperature change Potential). GWP tarkastelee lämmitysenergian muutosta tietyn ajanjakson aikana, tälle vaihtoehdona olisi GTP, joka tarkastelee lämpötilan muutosta valitun ajan päästä. GTP-kertomien epätarkkuus on kuitenkin suurempi kuin GWP-kertoimien, johtuen pidemmälle viedyistä laskennasta, jossa on enemmän prosesseja ja parametrejä kuin GWP:n laskennassa. On selvää, että lämpenemisen laskeminen (GTP) vaatii enemmän olettamuksia kuin pelkän lämmitystehon (GWP) laskenta. [40, s.17-18]

## 2.5 Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä

Vuonna 2017 ympäristöministeriö julkaisi vähähiilisen rakentamisen tiekartan. Tiekartassa asetettiin askeleet, joilla pyritään vähentämään rakentamisen ja erityisesti rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä. Tiekartan tarkoituksena on siis edistää Suomen rakennus- ja kiinteistöalaa koskevia ilmastotavoitteita. [18], [40, s.9]

Vuonna 2018 Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy teki ympäristöministeriön vähähiilisen rakentamisen tiekartasta vaikutusarvion. VTT:n vaikutusarvion mukaan vaikuttavimmaksi ohjauskeinoksi todettiin raja-arvo -ohjaukseen perustuva lainsäädäntö. [40, s.9] Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä on kehitetty, jotta on keino mitata rakentamisen ympäristövaikutuksia, sillä on vaikeaa vähentää sellaista mitä ei voi mitata [18]. Kuvassa 14 sivulla 31 esitetään kuvio *Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä* -julkaisusta [42]. Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä käsittelee koko rakennuksen elinkaarta [18].

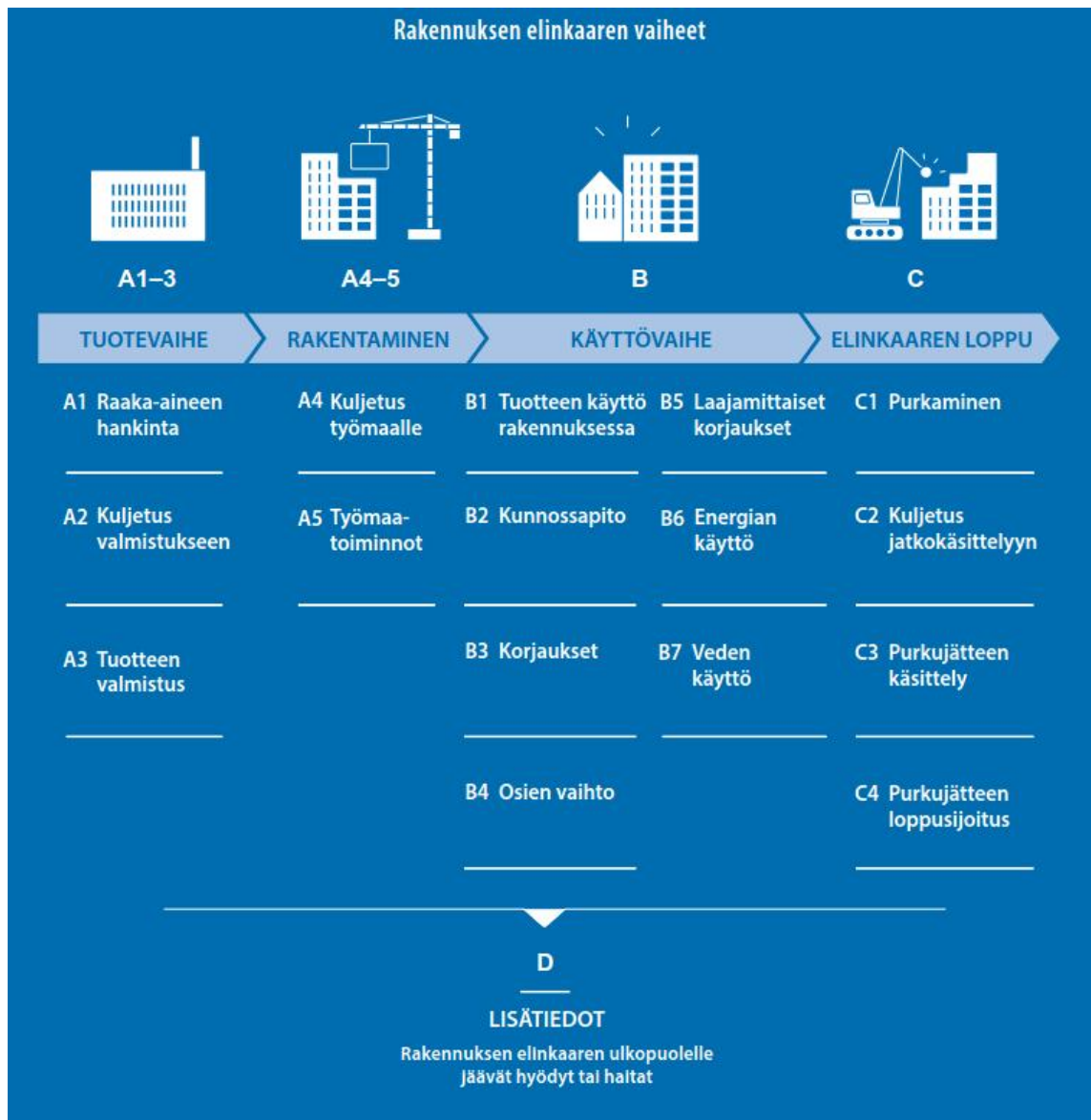


Kuva 14. Kuva *Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä* -julkaisusta. Kuvassa esitetään rakentamisen hiilijalanjälkilaskennassa esiintyvät rakennuksen vaiheet sekä hiilijalanjäljen arvioinnissa vaikuttavat osa-alueet. [42, s.10]

### 2.5.1 Rakennuksen elinkaaren vaiheet ja osatehtävät

Rakennuksen hiilijalanjäljen arvioinnissa on päästöjen, eli hiilijalanjäljen ja mahdollisten hyötyjen, eli hiilikädenjäljen kokonaismäärän lisäksi oleellista havaita, mitkä prosessit ja työvaiheet aiheuttavat päästöt. Lisäksi on tärkeä tunnistaa, missä vaiheessa prosessia päästöt aiheutuvat. [40, s.14]

Selventämään rakennushankkeen koko elinkaaren vaiheita on kehitetty yksittäisistä rakennushankkeen vaihetta kuvaavista moduuleista koostuva rakennuksen elinkaari. Moduuleita on neljä ja ne on nimetty kirjaimin A, B, C ja D. [40, s.14] Kuva 15 sivulla 32 on ote ympäristöministeriön *rakennusten vähähiilisyysarviointimenetelmä* – julkaisusta [42]. Kuva selventää rakennushankkeen elinkaaren vaiheita ja niiden sisältämiä osatehtäviä.



Kuva 15. Ympäristöministeriön *Rakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmä* -julkaisussa rakennuksen elinkaari on jaoteltu vaiheisiin. Vaiheiden sisältämiin osatehtäviin viitataan sanalla moduuli. [42, s.14]

Tunnuksella A merkityt moduuleita on viisi kappaletta. A-tunnus kuvastaa rakennusmateriaalien tuotantovaihetta sekä varsinaista rakentamista. [40, s.14]

Tunnuksella B kuvataan käyttövaiheen aikana syntyvää vaikutusta. B-tunnuksella on jaoteltu seitsemän eri osa-alueita. [40, s.14]

Tunnuksella C käsitellään rakennuksen elinkaaren loppuvaihetta. C-moduuli sisältää rakennuksen purkamisen ja jätteen käsittelyn sekä loppusijoituksen. Tunnusta D käytetään rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävistä ilmastohyödyistä ja -haitoista. [40, s.14]

## 2.5.2 Arviointimenetelmän rakenne ja toiminta

Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä perustuu Euroopan komission laittamaan Level(s)-menetelmään. Pohjana ovat eurooppalaiset kestävästä rakentamisesta koskevat standardit sekä aihealueen tieteellinen tutkimus. Arviointimenetelmää voidaan käyttää kaikkiin rakennuksiin, niin uudis- kuin korjaushankkeissa. Arviointimenetelmä ei kuitenkaan sovellu infrahankkeiden hiilijalanjäljen arviointiin. [40, s.11-12]

Yleisesti vähähiilisyyttä arvioidaan hankkeessa rakennesuunnittelun aikana. Soveltaen voidaan arviointia suorittaa jo ennen rakennesuunnittelua hyödyntäen tilastotietoja vastaavista rakennuskohteista. Tähän menettelyyn ei kuitenkaan menetelmäohjeessa oteta tarkemmin kantaa. Laskentaan tarvitaan rakennustuotteiden ja -prosessien päästötiedot sekä työkalu, jolla laskenta suoritetaan. Päästötietoja varten on kehitetty päästölaskennan rinnalla tietokantaa, joka yhtenäistää ja helpottaa päästölaskentaa. [40, s.12-13]

Arvioinnissa huomioidaan laajamittaisesti koko tontin rakenteet ja talotekniset järjestelmät. Arviointiin ei kuitenkaan sisällytetä rakentamisen aikaisia telineitä tai suojauksia. Arviointi toteutetaan rakennuksen koko elinkaaren ajalle ja sisältää rakennuksen elinkaaren vaiheet: rakennustuotteiden valmistus, kuljetukset, työmaatoiminnot, käyttö, purku ja kierrätys. [40, s.12]

Arviointimenetelmän hiilijalanjäljen elinkaariarviointi etenee seuraavissa vaiheissa [40, s.15-35]:

- Arvioinnin rajaaminen
- Tietojen kerääminen
- Laskenta
- Tarkistus
- Tulosten esittäminen

Onnistuneessa arvioinnissa oleellista on onnistunut kohteen rajaaminen. Pääsääntönä voidaan todeta, että rajaus suoritetaan laajamittaisesti kaikkiin tontilla sijaitseviin rakenteisiin. Tämän jälkeen toteutetaan tietojen kerääminen, tietoa tarvitaan materiaalien sekä prosessien hiilijalanjäljestä. Lisäksi tarvitaan määrätietoja kohteesta. [40, s.15-35]

Kun tarvittavat tiedot on hankittu, suoritetaan laskenta. Laskenta on tärkeää tarkastaa. Laskennan tulokset esitetään ohjeen mukaisesti, jotta ne ovat vertailtavissa muihin kohteisiin, ja jotta elinkaaren eri vaiheiden päästöt saadaan tulkittua. Tietoja kerätessä tarkastellaan useita osuuksia, seuraavassa listassa on lueteltu osuudet, jotka tulee huomioida rakennuksen hiilijalanjäljen arvioinnissa. [40, s.15-35]

Arviointi koostuu osuuksista, joita ovat [40, s.17-32]:

- Materiaalien hiilijalanjälki
- Kuljetusten hiilijalanjälki
- Työmaan hiilijalanjälki
- Energian hiilijalanjälki
- Hiilikädenjälki

Materiaalien hiilijalanjäljen laskentaan tarvitaan kohteen määrätiedot. Määräluettelon pohjalta laaditaan luettelo käytetyistä materiaaleista. Materiaaliluettelo on syytä tuoda tiedot rakennukseen, tontille ja keskeisiin taloteknisiin järjestelmiin suunnitelluista tuotteista. Kun tieto käytettävistä materiaaleista on koottu, tehdään arvio, mikä osuus materiaaleista vaihdetaan rakennuksen elinkaaren aikana. Tämän jälkeen arvioidaan uudelleenkäyttöön, kierrätykseen tai loppusijoitukseen päätyvien materiaalien määrä. Näillä tiedoilla voidaan toteuttaa materiaaleille hiilijalanjälkilaskenta. Laskennan tulokset jaotellaan elinkaaren vaiheiden mukaan. [40, s.16-17]

Kuljetusten hiilijalanjälkilaskenta alkaa arvioimalla rakennustyömaalle kuljetettavien rakennustuotteiden kuljetusetäisyydet. Tämän lisäksi arvioidaan rakennuksen elinkaaren aikana tehtävissä korjauksissa käytettävien materiaalien kuljetusten etäisyydet. Kun rakennuksen rakentamisvaiheen ja käytönaikaisen materiaalien kuljetuksien osuus on arvioitu, arvioidaan vielä elinkaaren lopulla tapahtuvat kuljetukset. Nämä muodostavat kuljetusten kokonaisuuden, jonka perusteella lasketaan hiilijalanjälki elinkaaren eri vaiheille. Laskentaa tarkennetaan esimerkiksi valitsemalla kuljetuksissa käytettävä polttoaine ja

sen mukaan päästökerroin. Lisäksi kuljetuksen täyttöaste asetetaan ohjeen mukaan toistaan eroavaksi kuljetuksen meno- ja paluumatkalla. [40, s.22-24]

Työmaan hiilijalanjäljen laskennassa arvioidaan työmaalla kulutetun energian määrä. Työmaan energian käyttö koostuu yleisesti rakennustöistä, valaistuksesta, kuivatuksesta, lämmityksestä sekä toimisto- ja taukotiloista. Rakennustyömaan toimisto- ja taukotilat huomioidaan laskennassa, vaikka nämä eivät sijaitsisikaan rakennustyömaan kanssa samalla tontilla. Käytetylle energialle lasketaan hiilijalanjälki, huomioiden eri energiamuodot ja polttoaineet kertoimien avulla. Työmaan hiilijalanjäljen laskennassa, kuten muissakin osuuksissa huomioidaan rakennuksen koko elinkaari, eli rakentaminen, korjaukset ja purku. [40, s.26-28]

Energian hiilijalanjäljen laskennassa rakennuksen laskennallinen ostoenergian kulutus kerrotaan eri energiamuotojen päästökertoimilla. Ostoenergiankulutusta laskettaessa, noudatetaan uuden rakennuksen energiatehokkuudesta annetun asetuksen mukaista laskentaa tai erillistä laskentamenetelmää, joka on annettu asetuksessa. [40, s.29]

Hiilikädenjälki huomioidaan myös osana vähähiilisyiden arviointia. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan ilmastohyötyä, joka syntyy rakennuksen elinkaaren aikana ja jota ei olisi olemassa, ilman rakennushanketta. Ympäristöministeriön vähähiilisyiden arviointimenetelmä mainitsee mahdollisiksi hiilikädenjäljen aiheuttajiksi rakennushankkeessa rakennusmateriaalien uudelleen käytön, materiaalien kierrätyksen kautta vältetty kasvihuonepäästön, uusiutuvan energian tuoton rakennuksessa tai tontilla ja rakennusmateriaaleihin varastoituvan eloperäisen hiilen sekä materiaaleihin elinkaaren aikana mahdollisesti ilmakehästä sitoutuvan hiilidioksidin. [40, s.30] Uusiutuvan energian tuotannosta on esimerkki kuvassa 16 sivulla 36 [43].



Kuva 16. Raahessa vuonna 2011 otettu kuva asuinkerrostalosta, jonka katolle on sijoitettu aurinkopaneeleita sekä pientuulivoimaa. Rakennuksen uusiutuva energiantuotannon positiivinen vaikutus voidaan huomioida rakennuksen hiilikädenjäljen laskennassa. Kuvaa on rajattu alkuperäisestä. [43]

Sementtiä sisältäviä tuotteita, kuten betonia, voidaan pitää materiaalina, johon elinkaarren aikana mahdollisesti sitoutuu hiilidioksidia ilmasta. Tämän kaltaisessa tapauksessa on kuitenkin ehtoja hyödyn laskennalle. Sementin karbonisoitumisen, eli sementtiä sisältävien tuotteiden ilmasta sitoman hiilidioksidin määrä, voidaan laskea hiilikädenjälkeen vain tapauksessa, jossa tuote on mukana myös hiilijalanjäljen laskennassa, ja jossa karbonisoitumisesta mahdollisesti aiheutuvat korjaukset huomioidaan myös hiilijalanjäljen laskennassa. [40, s.32]

Kuten edellä on mainittu, tuotettu ylijäävä uusiutuva energia voidaan myös huomioida hiilijalanjäljessä. Tämän laskennassa tulee kuitenkin huomioida energian tuottamiseen vaadittavan laitteiston ja siirtojärjestelmän hiilijalanjälki. Käytännössä asuinkerrostoissa uusiutuvan energian tuotantoon voidaan käyttää esimerkiksi aurinkopaneeleja tai pientuulivoimalaa. Negatiivisena vaikutuksena tulee puolestaan huomioida esimerkiksi mahdollisen ulkopuolisen siirtojärjestelmän vaikutus, niiltä osin, joiden vaikutukset voidaan kohdistaa kyseiselle rakennukselle. [40, s.31], [45]

Hiilijalanjäljen arvioinnin kannalta ei hiilikädenjäljen huomioimisessa kuitenkaan ole kyse yksiselitteisestä summapelistä, sillä ohjeen mukaan, laskettua hiilikädenjälkeä ei kuitenkaan vähennetä hiilijalanjäljestä. Hiilikädenjäljen tiedostaminen on kuitenkin merkittävä asia rakennushankkeen päästöjen kannalta. [40, s.30]

Rakennuksen hiilijalanjäljen arvioinnissa edetään vaihe vaiheelta ja huomioiden kaikki arvioinnin osuudet saavutetaan tulos rakennuksen päästöistä. Laskentatulos esitetään ohjeen mukaisesti niin, että esimerkiksi uudisrakennuksen tulokset jaotellaan rakennuksen elinkaaren eri vaiheille. Tarkempaa ohjeistusta tulosten esittämisestä annetaan arviointimenetelmän liitetiedostoissa. [40, s.15-35]

### 2.5.3 Arviointimenetelmän pilotointi ja tämänhetkinen tilanne

Vuonna 2019 ympäristöministeriön julkaisema rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä on askel kohti hiilineutraalia Suomea vuonna 2035. Kuitenkin tämä arviointimenetelmäversio oli julkaistu vain pilotointivaihetta varten. Pilotoinnissa arviointimenetelmästä kerättiin palautetta, jota käytetään menetelmän päivittämiseen. Pilotointi päättyi vuonna 2020. [40, s.13]

Voidaan todeta, että ympäristövaikutusten laskeminen ei ole yksinkertaista tai täysin eksaktia. Luodessa ensimmäistä versiota näin laajasta aiheesta on arviointimenetelmän pilotointi ja uudelleen versiointi perusteltua. Pilottivaiheessa vähähiilisyyden arviointi oli käytössä yli 40 hankkeessa. Pilotoinnin tarkoitus on ollut testata, miten arviointimenetelmä soveltuu käytännön rakennushankkeisiin. [45]

Palautetta saatiin hankkeen eri osapuolilta ja esiin nousi myös haasteita. Ympäristöministeriön erityisasiantuntija Matti Kuittinen esitteli kesäkuussa vuonna 2020 pidetyssä seminaarissa pilotoinnissa esiin nousseita huomioita. Esimerkkinä tunnistetuista haasteista voidaan mainita, että laskentaan tarvittavien materiaalien tietojen sekä määrien selvittäminen on varsin työlästä. Hankkeissa tietomallien puutteellisuudesta aiheutuen, ei tarvittavia tietoja saada yksinkertaisin menetelmin käyttöön tietomallista ajatellun mukaisesti. [46, s.16-17]



Lisäksi kritiikkiä annettiin siitä, että arvioijien mukaan nykyinen laskutapa vaatisi, että hankkeen urakoitsijat ja rakennustavat olisi lukittu ennen arvioinnin suorittamista, jotta tuloksella olisi mitään mahdollisuutta olla paikkaansa pitävä. [46, s.16]

Laskentaa pidettiin melko suoraviivaisena, mutta laskennan paikkansapitävyys koettiin haastavaksi tarkastaa. Esiin nousi myös, että muuttujien määrä laskennassa koettiin yli-voimaiseksi. Pilotointiryhmä arvioi 0-10 asteikolla, kuinka sujuvaa hiilijalanjäljen arviointi oli. Asteikolla 0 kuvasi ei sujuvaa ja vastaavasti 10 täysin sujuvaa. Keskiarvo vastauksista oli 5,86. [46, s.5-17]

Kokonaisuudessaan arviointi koettiin kuitenkin oikeaan suuntaan ohjaavaksi. Todettiin, että arviointimenetelmään olisi syytä tehdä askel-askeleelta -tyyppinen ohje ja kertoa, mihin ensisijaisesti kannattaa kiinnittää huomiota päästöjen vähentämisessä, eli mitkä asiat ovat merkityksellisimpiä. [46, s.18]

Seuraavina askelina rakentamisen vähähiilisydessä tehdään pohjoismaista harmonisointia sekä päästöjen raja-arvojen tulkintaa. Lisäksi suunnitellaan, miten rakennusten vähähiilisyys tulisi kehittyä, jotta Suomi voisi olla hiilinegatiivinen 2040-luvulla. [46, s.26]

## 2.6 Betonirakenteiden säilyvyysuunnittelu

Tämän tutkimuksen kannata on merkittävää ilmaista ja selventää mitoituksessa käytetyt parametrit. Mitoituksen kannalta erityisen merkittävää on tarkasteltavien rakenteiden säilyvyysuunnittelu ja sen sisältämät ympäristön rasitusluokat. Säilyvyysuunnittelu vaikuttaa teräsbetonirakenteen suojabetonipaksuuksiin, joilla on huomattava merkitys rakenteiden mitoituksessa. [29, s.15]

Teräsbetonin käyttöiässä merkittävin tekijä on raudotteiden korrosio. Kasvattamalla suojabetonin paksuutta ja määrittämällä sopiva betonilaatu voidaan käyttöikä betonirakenteelle suunnitella yksilöllisesti. Raudotteiden korroosion osalta käyttöikä riippuu seuraavista tekijöistä: [47]

- suojabetonin paksuus
- halkeamien leveys
- betonin lujuusluokka
- betonin vesi- sementtisuhde

Seuraavat alaluvut selventävät betonirakenteiden säilyvyysuunnittelua ja tässä yhteydessä huomioitavien asioiden merkitystä rakenteen mitoituksen kannalta.

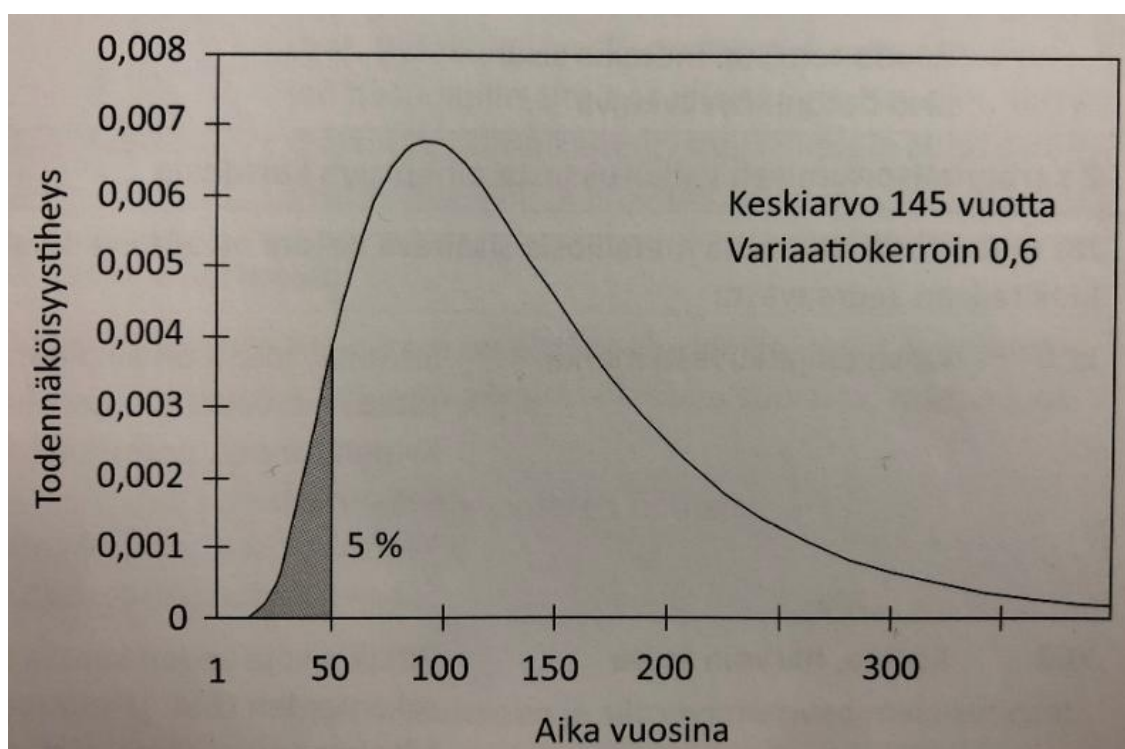
### 2.6.1 Suunnittelukäyttöikä

Suunnittelukäyttöikä on merkittävä asia betonirakenteen suunnittelun, kestävyiden sekä ympäristövaikutuksen kannalta. SFS-EN 1990 Suunnitteluperusteet -eurokoodin mukaan rakennuksen suunnittelukäyttöikä on määriteltävä. Rakennushankkeessa tilaajan olisi syytä määritellä rakennukselle tavoiteikä. Tämän perusteella suunnittelija määrittää lopullisen suunnittelukäyttöiän rakennukselle. [47]

Suunnittelukäyttöiällä tarkoitetaan ajanjaksoa, jonka ajan betonirakenteen ominaisuudet pysyvät valitulla todennäköisyydellä suunnitellusti huollettuna rakenteelta vaadittavalla tasolla. Tyypillisesti todennäköisyytenä pidetään 95 prosenttia, tämä tarkoittaa, että esimerkiksi rakennuksessa, jossa suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta, 50 vuoden kuluttua 5 prosenttia rakenteista voi olla vaurioituneita. Vastaavasti puolet rakenteista ovat

vaurioituneet vasta 150 vuoden kuluttua ja viimeisimmät rakenteet kestävät jopa 300 vuotta. [29, s.15]

Kuva 17 selventää rakenteiden vaurioitumista tyypillisessä asuinrakennuskohteessa [29]. Suunnittelukäyttöiässä oletetaan, että rakennuksen kunnossapito toteutetaan asianmukaisesti sen käytön aikana. Kun rakennus suunnitellaan tyypillisin menetelmin 50 vuoden käyttöiälle, käytetään tyypillisesti 95% varmuustasoa ja log-normaalista jakaumaa. Huomioitavaa on, että paikallisilla korjauksilla käyttöikä voidaan pidentää alkuperäisestä suunnitellusta käyttöiästä. [29, s.15]



Kuva 17. Rakenteiden vaurioituminen tyypillisessä asuinrakennuskohteessa. [29, s.15]

Tyypillisesti asuinrakennuksen tai muun tavanomaisen rakennuksen suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta. Suunnittelukäyttöikä rakennuksilla vaihtelee tyypillisesti välillä 50...200 vuotta. On kuitenkin huomioitava, että osa rakennuksen materiaaleista tai rakennusosista ei välttämättä kestä 50 vuotta, vaan ne tulee vaihtaa rakennuksen käyttöiän aikana kerran tai useammin. Tyypillisiä vaihdettavia rakenneosia ovat veden- ja kosteudeneristeet sekä ikkunat ja ovet. Vastaavasti on tyypillistä, että perustukset suunnitellaan 100 vuoden käyttöiälle, vaikka rakennuksen käyttöikä muutoin olisi 50 vuotta. [3, s.43-48], [29, s.21]

Tämän tutkimuksen luvussa 2.1.2 Aiheeseen liittyvä tutkimus ja ohjeistus - Claude Aït-chin ja Sidney Mindessin kirjoittaman teoksen *Sustainability of concrete (2011)* mukaan, todennäköisesti merkittävin keino vähentää betonirakenteen päästöjä on sen käyttöiän pidentäminen [13, s.5-8]. On kuitenkin huomioitavaa, että betonin kierrätysaste kasvaa jatkuvasti ja on jo nyt Suomessa 80 prosenttia. Materiaalin kierrätys ja uudelleenkäyttö parantaa huomattavasti betonin hiilijalanjälkeä. [38]

Purkujätteen kierrätyksen ohella on huomioitava, että vanhassa rakennuksessa myös tekniset ratkaisut sekä talotekniikka vanhenevat [3, s.47-48]. Käyttöajan energiankulutus on kuitenkin suurin osa koko asuinrakennuksen energiankulutuksesta [16]. Myös nämä asiat saattavat vaikuttaa rakennusten suunnittelukäyttöiän valintaan.

## 2.6.2 Betonirakenteiden rasisusluokat

Betonirakenteita suunniteltaessa betoninormien mukaan, tulee rakenteen rasisusluokka huomioida ympäristöolosuhteiden mukaisesti. Rakenne voi kuulua yhtäaikaisesti useaan rasisusluokkaan ja sen tulee täyttää kaikkien sille valittujen rasisusluokkien vaatimukset. [29, s.16], [47]

*Betoninormit 2016 by 65* [29] mukaan suunnittelija valitsee rakenteen rasisusluokan huomioiden seuraavat rasisustekijät [29, s.16]:

- karbonisoitumisen aiheuttama korroosio
- kloridien aiheuttama korroosio
- meriveden kloridien aiheuttama korroosio
- jäätymis- ja/tai sulamisrasitus
- kemiallinen rasisus

Rasitusluokkia on 18 ja ne voidaan jakaa ryhmiin niiden aiheuttajan mukaan kuvan 18 osoittamalla tavalla [49].

Rasitusluokka	Rasitus
X0	ei korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä
XC1...XC4	karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
XD1...XD3	kloridien aiheuttama korroosio
XS1...XS3	merivedessä olevien kloridien aiheuttama korroosio
XF1...XF4	jäätymis- / sulamisrasitus
XA1...XA3	kemiallinen rasitus

Kuva 18. Rudus Betoniakatemia esittämä betonirakenteiden rasitusluokkien jako. [49]. Betonirakenne voi kuulua samanaikaisesti useaan eri rasitusluokkaan. Kuva Joonas Jaakkola.

Raudoitettu betonirakenne, joka sijoitetaan erittäin kuivaan ympäristöön, voidaan suunnitella rasitusluokkaan X0. Erittäin kuiva tila voi olla kuiva lämmitetty sisätila, kuten asuinrakennuksen runko. [48]

XC1...XC4 rasitusluokissa rakenteeseen kohdistuu karbonatisoitumisen aiheuttama rasitus. Karbonatisoituminen tarkoittaa tilannetta, jossa ilman hiilidioksidi tunkeutuu betoniin ja aiheuttaa betonin emäksisyyden laskemisen. Laskenut emäksisyyden taso neutralisoi betonin teräkselle antamaa kemiallista suojaa, jolloin raudoitteen pinnan raudoitetta suojaava oksidikalvo voi tuhoutua. Ilman oksidikalvoa on mahdollista, että raudoitteen korroosio kiihtyy. [48], [28, s.97-98]

XC1 rasitusluokan rakenne on kuiva tai jatkuvasti märkä, tämän kaltaisia tiloja ovat muun muassa kylpyhuoneet, porraskäytävät, kerroksellisen rakenteen sisäkuori ja vedenpinnan alaiset osat. [48]

XC2 rasitusluokassa rakenne on kostea tai harvoin kuiva. Tyypillisiä XC2-luokan rakenteita ovat perustukset. [48]

XC3 rasitusluokan rakenne on kohtalaisen kostea. Betoni, joka on sisätiloissa, joissa on kohtalainen tai korkea ilman kosteus tai ulkoiloissa osittain tai kokonaan sateelta suojattuna kuuluu rasitusluokkaan XC3. Tyypillisiä rasitusluokan XC3 rakenteita ovat esimerkiksi uimahallit, saunat, suurkeittiöt ja useat teollisuusrakennukset. [48]

XC4 rasisusluokkaan asetetaan rakenne, joka on jaksolliselle kastumiselle ja kuivumiselle altis. XC4 rakenteita ovat tyypillisesti parvekelaatat, sateelle alttiit julkisivut ja sokkelit. [48]

Kloridien ja muiden suolojen aiheuttama korroosio aiheutuu pääsääntöisesti teiden suolauksesta tai merivedestä. Kloridit voivat betoniin tunkeutuessaan poistaa raudotteiden kemiallisen suojan. Kloridien aiheuttamaa korroosiota voi esiintyä myös rakenteessa, joka ei ole karbonatisoitunut. XD1...XD3 rasisusluokat huomioivat kloridien vaikutusta betonirakenteeseen. XD1 rasisusluokassa rakenteen ympäristö on kohtalaisen kostea ja betonia rasittavat ilmavirran mukana tulevat suolat. Tämän kaltaisia rakenteita ovat esimerkiksi meluseinät tien läheisyydessä tai uimahallien sisätilat. [28, s.99], [48]

XD2 rasisusluokkaan kuuluu kloridein rasittama kostea, harvoin kuiva rakenne. Esimerkkinä XD2-luokasta voidaan mainita uima-altaat. [48]

XD3 rasisusluokan rakenteessa kostea- ja kuivaolosuhde vaihtelevat. Tämän kaltaisia rakenteita ovat suoloja sisältäville roiskeille tai suolaukselle altistuvat rakenteet. Esimerkkeinä voidaan mainita pysäköintitasot ja lämmitetyt autohallit. [48]

XS1...XS3 rasisusluokat tulee huomioida rakenteissa, jotka ovat alttiita meriveden sisältämille klorideille. XS1 rasisusluokassa rakenne ei ole suorassa kosketuksessa merivedeen, mutta tuulen mukana rakenteeseen kulkeutuu klorideja. Tyypillisiä XS1 luokan rakenteita ovat avomeren rannalla sijaitsevat rakenteet. [48]

XS2 rasisusluokan rakenteet ovat veden alaisia rakenteita. Merirakenteiden ja siltojen vedenalaiset osat kuuluvat rasisusluokkaan XS2. [48]

XS3 rasisusluokan rakenteet sijaitsevat vesirajassa tai ovat meriveden roiskeille alttiina. Tämän kaltaisia rakenteita ovat esimerkiksi siltojen välituet. [48]

XF1...XF4 rasisusluokat huomioivat jäätyksen ja sulamisen aiheuttaman rasisuksen. XF1 rakenne voi olla esimerkiksi julkisivu tai sokkeli, joka altistuu kohtalaiselle vedellä kyllästymiselle ilman jäänsulatusaineita. [48]

XF2 rasitusluokan rakennetta koettelee kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet. Tähän rasitusluokkaan voivat lukeutua esimerkiksi tien viereen sijoitetut meluseinät ja niiden sokkelit. [48]

XF3 rasitusluokan rakenteeseen kohdistuu suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusainetta. Esimerkkirakenteita XF3 luokassa ovat parvekkeet ja sisävesien vesirajassa olevat rakenteet. [48]

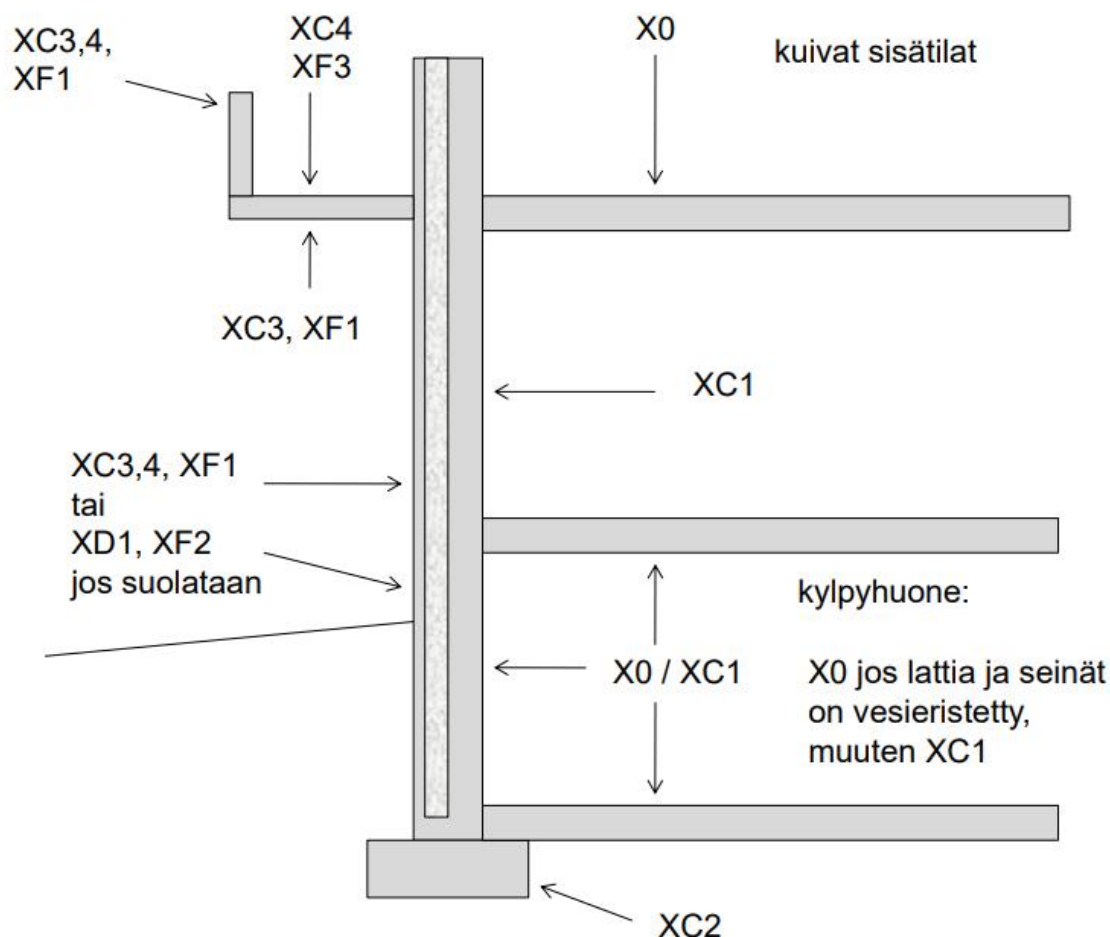
XF4 rasitusluokan ympäristössä rakenteeseen kohdistuu suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet. Näitä rakenteita ovat esimerkiksi pysäköintitalot ja autotallit. [48]

Betonirakenteen kemiallinen rasitus huomioidaan XA1...XA4 rasitusluokilla. XA1 rasitusluokassa rakenteen ympäristö on heikosti aggressiivinen. Tämän kaltainen rakenne voi olla esimerkiksi osa maatalousrakennusta. [48]

XA2 rasitusluokassa rakenne on kemiallisesti kohtalaisen aggressiivisen rasituksen alainen. Näitä rakenteita ovat esimerkiksi puukuivaamoissa sijaitsevat rakenteet. [48]

XA3 Rasitusluokassa rakenteen ympäristö on kemiallisesti voimakkaasti aggressiivinen. Tähän luokkaan voivat kuulua esimerkiksi maatalousrakenteet, joiden kemiallinen rasitus aiheutuu esimerkiksi maidosta tai lannoitteista. [48]

Kuvassa 19 sivulla 45 [48] esitetään yleisimpien betonirakenteiden rasitusluokkia niiden sijoituspaikan perusteella. Havainnollistava kuva auttaa suunnittelijaa määrittämään oikean rasitusluokan betonirakenteelle.



Kuva 19. Betonirakenteiden rasitusluokat. Betonirakenteisiin kohdistuu niiden ympäristöstä useita erilaisia rasituksia. Suunnittelijan on syytä havaita kyseisen rakenteen ympäristön rasitukset ja suunnitella rakenne niiden asettamien vaatimusten mukaisesti. [48, s.23]

Rasitusluokka vaikuttaa betonirakenteen raudoitteiden betonipeitteen vähimmäispaksuuteen. *Betoninormit 2016 by 65* -kirjan taulukon mukaiset arvot betonipeitteen vähimmäispaksuudelle on esitetty kuvassa 20 sivulla 46. [29, s.22]



Rasitusluokka	Betonipecitteen vähimmäisarvo 50 vuoden käyttöiälle [mm]		Betonipecitteen vähimmäisarvo 100 vuoden käyttöiälle [mm]	
	Betoniraudoitus	Jänneteräs	Betoniraudoitus	Jänneteräs
X0	10	10	10	10
XC1	10	20	10	20
XC2	20	30	25	35
XC3, XC4	25	35	30	40
XS1, XD1	30	40	35	45
XS2, XD2	35	45	40	50
XS3, XD3	40	50	45	55

Kuva 20. Lähteeseen *Betoninormit 2016 by 65* [29] perustuva kuva, jossa taulukoituna eri rasitusluokkien betonipeitteen vähimmäisarvot  $c_{min,dur}$  (nimellisarvo - sallittu mittapoikkeama) säilyvyyden suhteen. XC-rasitusluokissa ei kuvassa esitetyt raja-arvot ole voimassa käytettäessä ruostumatonta B600KX raudoitetta. [29, s.22] Kuva Joonas Jaakkola.

### 2.6.3 Halkeilu, saumat ja kunnossapito

Suunnittelukäyttöään ja rasitusluokan ohella on betonirakennetta suunniteltaessa huomioitava betonin halkeilu, betonirakenteiden saumat sekä oikea kunnossapito. Suunnittelussa sekä rakennuksen käytössä näiden tekijöiden laiminlyöminen voi aiheuttaa rakenteessa liiallisia vaurioita. [29, s.23-25]

Betonirakenteiden halkeilua tulee rajoittaa siten, että se ei heikennä rakenteen toimintaa tai säilyvyyttä. Betonirakenteen halkeilu ei saa myöskään vaikuttaa rakenteen ulkonäköön haitallisesti. Halkeamien syntyminen voi olla rakenteessa hyväksyttyä, tällöin on kuitenkin syytä pyrkiä hallitsemaan niiden leveyttä, jotta rakenteen toiminta ei häiriinny. Halkeamaleveyttä voidaan arvioida ja mitoittaa laskentamenetelmin. [29, s.23-24]

Betonirakenteiden saumat vaativat erityishuomiota niin paikallavalu kuin elementtirakenteissa. Elementtirakenteissa rakenneosien väliin tehdään luonnollisesti elementtisauma. Elementtisaumojen suunnittelu ja toteutus tulee tehdä käytettävien saumausmassojen ehdoilla niin, että rakenteesta tulee tiivis. Käytännössä sauman leveys valitaan siten, että saumausaineet kestävät elementin lämpö- ja kosteusliikkeet sekä valmistuksen ja asennuksen sallitut mittapoikkeamat. Paikallavalurakenteissa työsauman kohdalla betonin ominaisuudet ovat yleensä huonommat kuin muualla betonissa, tämä voidaan kuitenkin hallita oikealla suunnittelulla. [29, s.25]

Rakennuksen hyvä kunnossapito on myös betonirakenteiden säilyvyyden kannalta merkittävä asia. Betonirakenteet ovat tyypillisesti osa laajempaa kokonaisuutta ja vaikka itse betoni on varsin vähän kunnossapitoa vaativa rakenne, useat muut rakenteet vaativat kunnossapitotoimia, jotta kokonaisuus säilyy toimivana. Esimerkkinä voidaan mainita julkisivujen pellitykset, joiden tiiveys ja kunto tulee tarkastaa säännöllisesti. Huonokuntoiset pellitykset voivat aiheuttaa betonirakenteille niiden suunniteltua olosuhdetta vaativammat olosuhteet. Vedenpoiston toimivuuden toteuttaminen ja käytönaikana varmistaminen on myös betonirakenteiden kannalta tärkeä asia. [29, s.25]

Betonirakenteiden kuntoa tulee tarkastella käytönaikana myös mahdollisesti muuttuneiden ympäristöolosuhteiden vuoksi. Esimerkiksi suolausta voidaan aloittaa käyttämään paikoissa, joissa sitä ei ole rakennusta suunnitellessa huomioitu, tämä muuttaa ympäristön rasisluokkaa merkittävästi. Tämän kaltaisessa tilanteessa betonirakenne voidaan pinnoittaa, jolloin rakenne saa suojaa sille haitallisilta aineilta. [29, s.25]

## 2.7 Muut betonirakenteiden suunnittelua ohjaavat tekijät

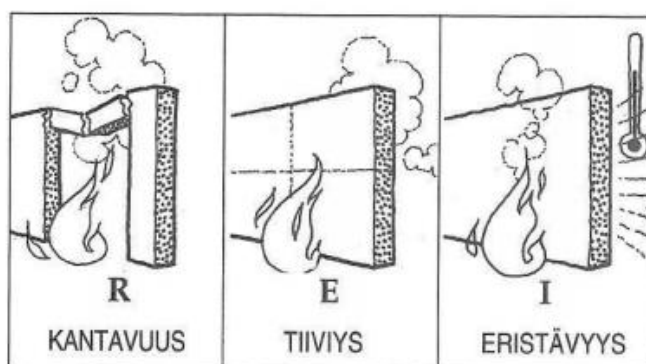
### 2.7.1 Paloturvallisuus

Betoni on palamaton rakennusmateriaali. Palamattomana materiaalina se ei lisää rakennuksen palokuormaa, ei materiaalina levitä paloa, eikä palotilanteessa muodosta savua tai myrkyllisiä kaasuja. Lisäksi palon kannalta betonin hyviä puolia ovat sen kyky massiivisena rakenteena varata lämpöä, joka voi alkupalon syttyessä viivästyttää yleissyttymistä. [49], [28, s.110]

Betoniteollisuus ry:n mukaan Ruotsissa on tehty selvitys vakuutusyhtiöiden tilastoista liittyen asuinkerrostalojen suurpaloihin. Selvityksessä suurpaloksi laskettiin palo, jossa itse rakennuksen vaurioiden suuruus nousi yli 150 000 euroon. Tämän tutkimuksen tietojen mukaan Ruotsissa tapahtui 125 asuinkerrostalon suurpaloa kymmenen vuoden tarkastelujaksolla. Näistä paloista 56 prosenttia tapahtui puurakenteisissa asuinkerrostaloissa, vaikka puurakenteisten talojen osuus vastaavasta rakennuskannasta on ainoastaan 10 prosenttia. Ruotsalaisen tutkimustiedon mukaan puutaloissa palon kehittymisen riski suurpaloksi on 11,5-kertainen verrattuna kivirakenteiseen taloon. Betoniteollisuuden tietojen mukaan Suomessa Tampereella aiemmin tehdyssä selvityksessä trendit ovat vahvasti samansuuntaiset. [49]

Betonirakenteiden palonkestävyys suunnitellaan yleensä taulukkomitoituksella tai teke­ mällä laskennallinen tarkastelu. Suunnittelussa noudatetaan eurokoodia SFS-EN 1992- 1-2 ja Suomen kansallista liitettä. Palotilanne vaikuttaa teräsbetonirakenteiden suunnit­ telussa etenkin raudoitteiden suojabetonipaksuuksiin. [50]

Rakennuksen paloluokkia on kolme, P1, P2 ja P3. P1 luokka on vaativin ja vastaavasti P3 luokka palovaatimuksiltaan kevein. Rakennuksen paloluokka ohjaa rakennusosilta vaadittavaa paloluokitusta. Paloluokitus perustuu tunnuksiin R – kantavuus, E – tiiviys, I – eristävyys ja M – iskunkestävyys palotilanteessa. Kuvassa 21 on esitetty havainnollis­ tavin kuvin eri paloluokitusten merkitykset. [51]



Kuva 21. Rakenteilta voidaan vaatia palotilanteessa erilaisia ominaisuuksia. R, E ja I vaatimusten lisäksi on olemassa vaatimus M, joka kuvaa iskunkestävyyttä palotilanteessa. [51, s.8]

Rakennusosalle voidaan määrätä vaadittava palonkesto-aika, joka on 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 tai 240 minuuttia. Näin ollen rakenneosan paloluokitus voi esimerkiksi olla REI 60. Tämä tarkoittaa, että 60 minuuttia standardipalo-olosuhteissa rakenneosaa on kan­ tava, tiivis ja eristävä. [51]

Tässä tutkimuksessa palomitoitus ei ole tarkastelun kannalta keskeinen asia. Palomitoi­ tus on kuitenkin erittäin merkittävä osa rakennesuunnittelua ja sen vaikutukset voivat olla merkittävät lopullisen suunnitteluratkaisun kannalta. Tästä syystä rakenteelle tyypillinen palomitoituksen vaatima palomitoitustaulukkoihin perustuva suojabetonipaksuus sekä rakenteen paksuus huomioidaan rakenteen mitoituksessa niin, että mitoitus tulokset mur­ torajatilassa ja käyttörajatilassa ovat käyttökelpoisia myös palotilanteen kannalta. Jokai­ selle mitoittavalle rakenteelle on määritetty sille tyypillinen palonkestovaatimus, joka esitetään rakenteen mitoitus tiedoissa.

## 2.7.2 Akustiikka

Akustisessa suunnittelussa tarkoituksena on hallita ääniolosuhteet niin, että tila tai rakennus vastaa akustisesti käyttötarkoitustaan. Akustinen suunnittelu rakennussuunnittelussa voidaan jakaa neljän osa-alueeseen, joita ovat huoneakustiikka, rakennusakustiikka, meluntorjunta ja tärinäeristys. [52]

Huoneakustiikassa varmistetaan, että tila toimii sen käyttötarkoituksen edellyttämin tavoin. Huoneakustiikassa tarkastellaan äänen heijastumista, vaimenemista ja etenemistä huoneen sisällä. Esimerkkinä huoneakustiikasta voidaan mainita esiintyjän kuuleminen konserttisalissa. [52]

Rakennusakustiikka on merkittävä osa rakennussuunnittelua. Rakennusakustiikassa äänieristyksen keinoin vähennetään ja estetään ilma-, askel- tai runkoäänen siirtymistä tilasta toiseen. Rakennusakustiikan tarkastelut tarkastelevat äänen siirtymistä rakenteiden välityksellä eri tilojen välillä. [52]

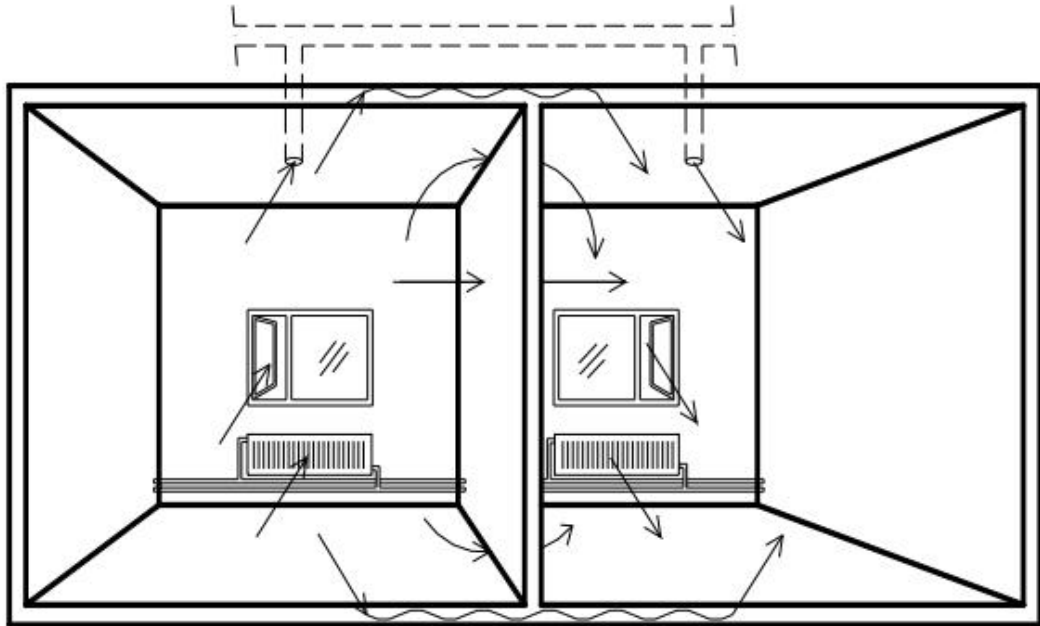
Meluntorjunnalla tarkoitetaan akustisia ratkaisuja, joilla vaikutetaan melun syntymiseen tai vähennetään melun tasoa. Lisäksi melun leviämisen estäminen on meluntorjuntaa. [52]

Tärinäeristäminen toteutetaan eristämällä värähtelylähde rakennuksesta joustavilla rakennesosilla. Näin toimittaessa voidaan estää epäsuotuisan värähtelyenergian siirtymistä rakennuksen runkoon. [52]

Suomessa rakennusten akustinen suunnittelu perustuu maankäyttö- ja rakennuslakiin, jonka perusteella ympäristöministeriö on säätänyt asetuksen 796/2017 rakennuksen ääniympäristöstä. Asetus astui voimaan ensimmäisenä päivänä tammikuuta vuonna 2018. Ennen vuotta 2018 rakennusten akustista suunnittelua ovat säätäneet Suomen rakennusmääräyskokoelman osat C1 ja D2. Myöhemmin asetusta 796/2017 on muutettu osin asetuksella 360/2019. [53], [54]

Ympäristöministeriön asetuksissa säädetään rakennusten äänieristyksestä sekä melun ja tärinätorjunnasta. Lisäksi säädetään piha-alueiden ja parvekkeiden ääniolosuhteista.

[54] Rakennuksessa on useita kulkeutumisreittejä äänelle, kuva 22 [53] selventää tyypillisiä huoneistojen välisiä äänen siirtymäreittejä.



Kuva 22. Huoneistojen välillä ääni voisi siirtyä useita reittejä. Yksittäinenkin puute akustiikassa voi aiheuttaa epätoivotun äänen kulkeutumisen. Yksinään riittävän vaimentavat rakenteet eivät takaa hyvää lopputulosta, esimerkiksi liitoksiin sekä talotekniikkaan on myös kiinnitettävä huomiota. [55, s.13]

Betonia Oy:n ylläpitämän elementtisuunnittelu.fi -verkkosivuston mukaan akustiikan vuoksi betonirakenteisten kerrostalojen huoneistojen väliseinien paksuudeksi suositellaan aina vähintään 200 millimetrin paksuista betonirakennetta. Ulkoseinärakenteissa betonisen sisäkuorielementin paksuudeksi suositellaan 150 millimetriä, mikäli rakenteena ei ole betoni sandwich-elementti. [56]

Asuinkerrostaloissa ontelolaatta ala- ja välipohja on toimiva O37-ontelolaatoilla, sillä sen paino saumattuna ja tasoitettuna nousee yli 500 kg/m<sup>2</sup>. Kevyempiä ontelolaattoja voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun ontelolaatan päälle tehdään pintavalu, ja näin paino kasvaa 500 kg/m<sup>2</sup> asti. Massiivilaatan tulee olla 260 mm paksu, jotta pelkällä laatalta ja lattiapinnan alusmateriaalilla saavutetaan riittävä akustinen taso. [56]

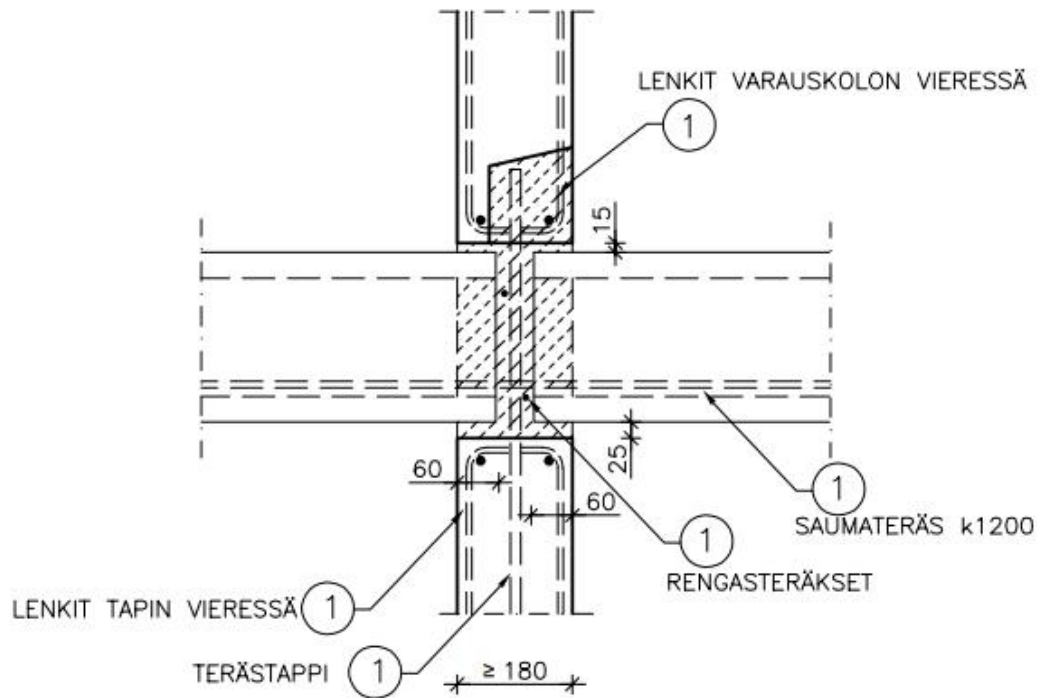
Yksittäisen rakennetyypin tarkastelu sen kaikkien vaatimusten osalta on laaja tehtävä. Yleistyksenä voidaan todeta, että akustiikka asettaa rajoitteita rakenteiden kaventamiselle asuinkerrostaloissa. Mahdollisesti lisäämällä rakennekerroksia voitaisiin käyttää akustiikan kannalta hoikempia rakenteita, on kuitenkin huomioitava, että lisäämällä rakennekerroksia työvaiheet sekä materiaalimenekki voivat kasvaa nykyisestä. Tämä saattaa aiheuttaa lisäkustannuksien ohella myös kasvavaa hiilijalanjälkeä.

### 2.7.3 Rakenteellinen toiminta

Tämän tutkimuksen aikana keskustelussa Ramboll Finland Oy:n rakennesuunnittelun asiantuntijoiden kanssa nousi esiin betonirakenteiden dimensioiden muutosten vaikutus rakenteelliseen toimintaan. Esimerkkinä voidaan mainita kantava väliseinä. Kantavan väliseinän päälle tuetaan tyypillisesti väli- tai yläpohjan paikallavalu-, massiivi-, tai ontelolaattoja. Mikäli väliseinän päälle tuetaan molemmin puolin laatat, asettaa tämä seinän yläpinnan tukipinnan leveydelle vaatimuksia.

Tyypillisen O37-ontelolaatan tukipinnan suunnitteluarvo on 60 millimetriä ja minimipituus asennuksessa 40 millimetriä [57, s.33]. Lisäksi ontelolaattojen päätyjen väliin on jätävä tilaa rengasterästen asennukselle. Voidaan siis todeta, että kantavan väliseinän merkittävä kaventaminen asettaa pelkästään tästä syystä ongelmallisen tilanteen. Kuva 23 sivulla 52 [58] selventää tyypillistä kantavan väliseinän ja molemminpuolisten ontelolaattojen liitosta. Kuten kuvasta voidaan havaita, asettaa ontelolaattojen vaatimat tukipinnat sekä saumoihin vaadittavat raudoitteet vaatimuksia seinän yläpinnan tuen leveydelle. Seinän merkittävä kaventaminen ei siis ole mahdollista tätä liitosdetaljiikkaa hyödyntäen.

mittakaava 1:10



SUUNNITTELUSSA JA ASENNUKSESSA ON ERITYISESTI HUOMIOITAVA:

- TUKIPINNAT ASENNUS- JA LOPPUTILANTEESSA (HUOMIOITAVA LAATTAKOHTAISESTI)
- SAUMA- JA RENGASRAUDOITUS
- JUOTOSBETONI JA LIITOKSEN KUORMAKAPASITEETTI
- YLLEENSÄ YLI 8-KERROKSISSA TALOISSA LIITOS BETONINORMIKORTTI 27EC MUKAISESTI

MATERIAALI- JA TARVIKELUETTELO						TUNNUS:	
RY	PO	MAT/TAR	TYYPPI	KOKO	LAATU	MÄÄRÄ	HUOM.
RH	1	TERÄS			B500B		

Kuva 23. Betonia Oy:n ylläpitämän verkkosivun Elementtisuunnittelu.fi runkoliitosdetaljit 2020 pii-rustusten detajli DO501 ontelolaatan liitos kantavaan väliseinään. Kuvaa on rajattu alkuperäisestä. [58, s.49]

Mainitussa esimerkkitapauksessa seinän vähentynyt tukipinta voitaisiin kapeammassa seinärakenteessa mahdollisesti korvata betonikonsolilla. On kuitenkin huomioitava, että etenkin elementtirakenteessa betonikonsolin lisääminen seinäelementtiin aiheuttaa vääjäämättä lisäkustannuksia. Paikallavalurakenteessa puolestaan konsolin lisääminen teettää lisätyötä valun muotituksessa.

Muita esiin nousseita huomioitavia rakenteellisia muutoksia voivat olla paikallavalurakenteiden muottitekniset seikat. Rakennesuunnittelussa on tapauksia, joissa betonirakennetta levennetään niin, että syntyy tukipintoja, joille yläpuolisten rakenteiden muotit on mahdollista asentaa. Mikäli rakenteita kavennetaan järjestelmällisesti mahdollisimman kapeiksi materiaalimenekin pienentämiseksi huomioimatta näitä tukipintoja, voidaan päätyä tilanteeseen, jossa varsinainen rakentaminen hankaloituu merkittävästi.

## 2.8 Rakennesuunnittelijan valinnat betonirakenteen suunnittelussa

Rakennesuunnittelijan tehtäviin oikean betonin valitsemiseksi kuuluu ympäristön rasitusluokan, suunnittelukäyttöiän, betonin lujuuden, rakenneluokan sekä kiviaineen suurimman maksimiraekoon määrittäminen. Näiden tietojen lisäksi rakennesuunnittelija asettaa raudoitteiden betonipeitteelle nimellisarvon, jolla voi myös olla vaikutusta betonin valintaan. Rakennesuunnittelijan määrittämien tietojen perusteella valmisbetonitoimittaja voi toimittaa oikean betonin. [59, s.407]

Edellä mainittujen tietojen lisäksi rakennesuunnittelija voi antaa lisätietona betonirakenteen pintaluokat, tasaisuus-, kulutuskestävyys-, tai vedenpitävyysvaatimuksen. Lisäksi voidaan mainita erityisvaatimuksia rakenteen lämmön- tai lujuudenkehitykselle. [59, s.407]

Ympäristön rasitusluokista aiheutuvista betonimassan ominaisuuksista tai muista betonitoimittajalle kuuluvista betonin valmistamiseen liittyvistä ominaisuuksista, ei rakennesuunnittelijan ole syytä määrätä. Betonivalmistajan vastuulle jää esimerkiksi betonin vesi-sementtisuhteen määrittäminen sekä sideainesuhteet. [59, s.407]



Rudus Oy:n valmisbetonin kehityspäällikkö Vesa Anttila kirjoitti betonin valinnassa huomioitavista tekijöistä listan julkaisussa *Rakentajainkalenteri 2003* [59]. Anttila mainitsee betonilaadun valinnassa huomioitaviksi tekijöiksi seuraavat tekijät [59, s.407]:

- viranomaismääräykset
- työselityksen ohjeet
- rasitusluokat
- suunnittelukäyttöikä
- rakenteen käytön- ja kuormien vaatimukset
- betonivalun työsuorituksen huomioiminen
- valuolosuhteiden ja jälkihoidon huomioiminen

Edellä mainitun perusteella voidaan todeta, että betonin valinta on yhteistyötä rakennesuunnittelijan ja betonitoimittajan välillä. Osan lopullisen betonimassan valinnoista tekee rakennesuunnittelija ja osan betonitoimittaja.

Tämän tutkimuksen mitoitustapauksissa käytetään rakenteille tyypillisiä mitoitusolettamuksia ja variaatiota luodaan nimenomaisesti rakennesuunnittelijan vaikutusmahdollisuuksin. Seuraavissa alaluvuissa esitellään mitoitukseen valitut rakenteet, niiden mitoituskuormat sekä muut mitoitusolettamukset.

### 3 Tutkimuksen esimerkkitapaukset ja -rakenteet

Tässä tutkimuksessa käytetyt mitoitustilanteet ovat suunniteltu vastaamaan todellisia asuinkerrostalon kuormitustilanteita. Mitoitusasetelmat eivät liity suoraan mihinkään todelliseen kohteeseen. Mitoitusasetelmat sekä niiden sisältämät kuormitustapaukset on luotu yhdessä Ramboll Oy:n rakennesuunnittelun asiantuntijoiden kanssa niin, että ne vastaisivat mahdollisimman hyvin tyypillistä asuinkerrostalorakentamista.

Käyttämällä kuvitteellista mitoitustilanteenasettelua, ei ajauduta tilanteeseen, jossa jotain mitoitustapausten tietoja jouduttaisiin piilottamaan kohteen häivyttämiseksi. Luomalla kuvitteellinen asetelma voidaan myös luoda yleispätevämpi tarkastelu kuin jos tarkasteltaisiin ainoastaan yksittäistä kohdetta. Varsinaiseen rakenteiden mitoitukseen käytetään yleisesti käytössä olevia laskentapohjia, jotta tutkimus on tieteellisen periaatteen mukaan hyvin toistettavissa.

Seinien mitoitukseen käytetään Betonia Oy:n ylläpitämän elementtisuunnittelu.fi -internetsivuston vapaasti ladattavissa olevaa *Seinän mitoitus* -Excel laskentapohjaa. Muut tarkasteltavat rakenteet mitoitetaan SKOL ry:n Eurocode-laskentapohjilla, jotka ovat laajasti käytössä Suomessa rakennesuunnittelua tarjoavissa yrityksissä. Kaikki edellä mainitut laskentapohjat perustuvat Eurokoodien mukaiseen laskentaan.

Rakenteeltaan tutkimus esitellään tässä kirjallisessa teoksessa seuraavasti: Tutkimuksen luvussa 3 Tutkimuksen esimerkkitapaukset ja -rakenteet esitellään mitoitettavat rakenteet sekä niiden mitoitukset. Mitoitusasetelmina mainitaan mitoituskuormat sekä ympäristöolosuhteet ja mahdolliset muut mitoitusolettamat. Luvussa 4 Rakenteiden mitoitus sekä sen alaluvussa selvennetään varsinaisen mitoituksen kulkua ja tuloksia. Mitoituksen lopuksi luku 5 Tulosten tarkastelu luo kokonaisvaltaisen kuvan tutkimuksen tuloksista.

### 3.1 Tarkasteltavat rakenteet ja käytetyt mitoitusmenetelmät

Mitoituksessa tarkastellaan kantavaa väliseinää, kantavaa ulkoseinää, pilaria sekä pila-rianturaa. Tämän luvun alaluvuissa syvennytään yksittäisten rakenneosien mitoitusolet-tamuksiin sekä kuormien kertymiseen sovellettuihin tilanteisiin.

Yhteistä kaikille rakenteille on, että mitoitus rakenteille suoritetaan kolmella eri kuormi-tustapauksella. Kuormitustapauksiksi on valikoitu rakennuksen ensimmäiseen kerrok-seen sijoitettu rakenne, johon kuormitustapauksesta riippuen kohdistuu kuorma yhdeltä-, neljältä- tai seitsemältä ylemmältä kerrokselta.

Kaikki rakenteiden kerrokset ovat yhteneväisiä toistensa kanssa, eli esimerkiksi raken-nuksen yläpohjaa ei ole käytetty kuormaa kerryttävänä kerroksena, vaan kerrokset ovat tyypillisiä asumiseen tarkoitettuja kerroksia. Näiltä kerroksilta kuorma kertyy välipohjalta tai parvekelaatalta sekä sille asetetuilta hyötykuormilta. Kaikkien rakenteiden osalta seu-raamusluokka on CC2, joka tarkoittaa, että epäedullisten kuormien yhdistelyyn käytetty kuormakerroin KFI on arvoltaan 1,0. Edulliset kuormat huomioidaan kertoimella 0,9. Kai-kissa kuormayhdistelyissä noudatetaan Eurokoodin mukaista laskentaa. [60, s.8-9]

Tutkimuksessa rakennuksen kantava runko, mukaan lukien ulkoseinät ja sisärakenteet mitoitetaan 100 vuoden käyttöiälle. Samoin perustukset mitoitetaan 100 vuoden käyt-töiälle. Täydentävien rakenteiden, eli tässä tutkimuksessa parvekepilareiden suunnitte-lukäyttöikäenä käytetään 50 vuotta. Rakenteiden valitut suunnittelukäyttöiät perustuvat rakenteen suositeltuun käyttöikäen, johon ohjeistaa lähteen *RIL 216-2013* [3] taulukko 4.2.

Käyttöiän pidentäminen yli 50 vuoteen aiheuttaa ilmastosta johtuville kuormien ominai-sarvojen korotuksen. Ilmastosta johtuvia kuormia ovat lumi-, tuuli- ja jääkuormat. Suun-nitellun käyttöiän ollessa yli 50 vuotta edellä mainittuja kuormia korotetaan 10 prosentilla ja yli 100 vuoden suunnitellussa käyttöiässä ominaiskuormia korotetaan 20 prosentilla. Hyötykuormien ominaisarvojen katsotaan kuitenkin olevan riippumattomia rakennuksen suunnitellusta käyttöiästä. [60, s.12]

Rakenteet raudoitetaan tyypillisillä raudoitteilla standardin SFS-EN 10027-1 mukaan. Tämä tarkoittaa, että rakenteet raudoitetaan käyttäen irtotankoina harjateräsraudoitetta  $T = B500B$ . Raudoiteverkkoina käytetään raudoitetta  $K = B500A$  ja tarvittaessa ruostumattomana raudoitteena  $E = B600XA$ -laatua. Rakenteita käsitellään mitoituksessa paikallavalurakenteina, ei elementtirakenteina.

Rakenteiden kuormien määrittämiseen on käytetty PTC Mathcad Prime version 5.0.0.0 -ohjelmaa. Lisäksi FEM-laskentaa on suoritettu hyödyntäen Dlubal RFEM 5.22 -ohjelmaa.

Rakenteiden mitoitukseen valikoitiin mahdollisimman laajasti alalla käytössä olevia sekä hyvin saatavilla olevia mitoituspohjia. Kaikki käytetyt mitoituspohjat perustuvat Microsoft Excel -ohjelmaan.

Kantava väliseinän sekä kantavan ulkoseinän mitoitukseen käytettiin Betonia Oy:n ylläpitämän Elementtisuunnittelu.fi -sivuston tarjoamaa *Seinän mitoitus* -Excel tiedostoa (tiedoston nimi tarkemmin: seinanmitoitus110110.xls). Tämä laskentapohja on vapaasti ladattavissa internetsivustolta.

Muiden rakenteiden, eli parvekepilarin ja parvekeanturan mitoitukseen käytettiin alalla laajasti käytössä olevia SKOL ry:n laatimia mitoituspohjia. Pyöreän parvekepilarin mitoitukseen käytettiin laskentapohjaa *SKOL\_B9\_Teräsbetonipilari\_pyöreä\_v1.61.xlsx*. Pilarianturan mitoitukseen puolestaan laskentapohjaa *SKOL\_B19\_Maanvarainen\_antura\_v1.71.xlsx*.

Myös tuulikuorman laskennassa hyödynnettiin julkaisun *RIL 201-1-2011* lisäksi SKOL Eurocode-laskentapohjaa. Käytetty laskentapohja oli *SKOL\_M10\_Tuulikuorma\_v.1.5.xlsx*. SKOL ry:n mitoituspohjat ovat käyttäjilleen maksullisia.

### 3.2 Rakenteiden kuormitustilanteet ja mitoituskuormat

Kaikille tarkasteltaville rakenteille on luotu oma kuormitustilanteensa, joka pyrkii vastaamaan tyypillistä asuinkerrostalon kuormitustilannetta. Kuormien määrittämisessä on käytetty FEM-ohjelmaa, josta saatuja tuloksia on verrattu käsinlaskentamenetelmin saatuihin tuloksiin.

Seuraavissa alaluvuissa selvennetään jokaisen tarkastellun rakenteen osalta, millaisesta kuormitustapauksesta mitoituskuormat ovat laskettu. Kaikille rakenteille on yhteistä se, että kuormitustapauksia on kolme. Ensimmäinen kuormitustapaus sisältää yhden ylemmän asuinkerroksen kuorman, toinen neljän kerroksen kuorman ja viimeinen seitsemän kerroksen kuorman. Rakenteita kuormittavat kerrokset ovat keskenään yhteneväisiä, tyypillisillä kuormilla kuormitettuja asuinkerroksia tai parvekkeita.

Jokaisen rakenteen osalta mitoituksissa käytetyt tarkat kuormat ovat esitelty seuraavissa alaluvuissa. Kuvissa 25, 27, 29 ja 30 on taulukkomuotoisesti kirjattuna FEM-laskennasta saadut mitoistulokset, joita on käytetty Excel-pohjaisissa mitoituspohjissa rakenteiden kuormina.

#### 3.2.1 Kantava väliseinä

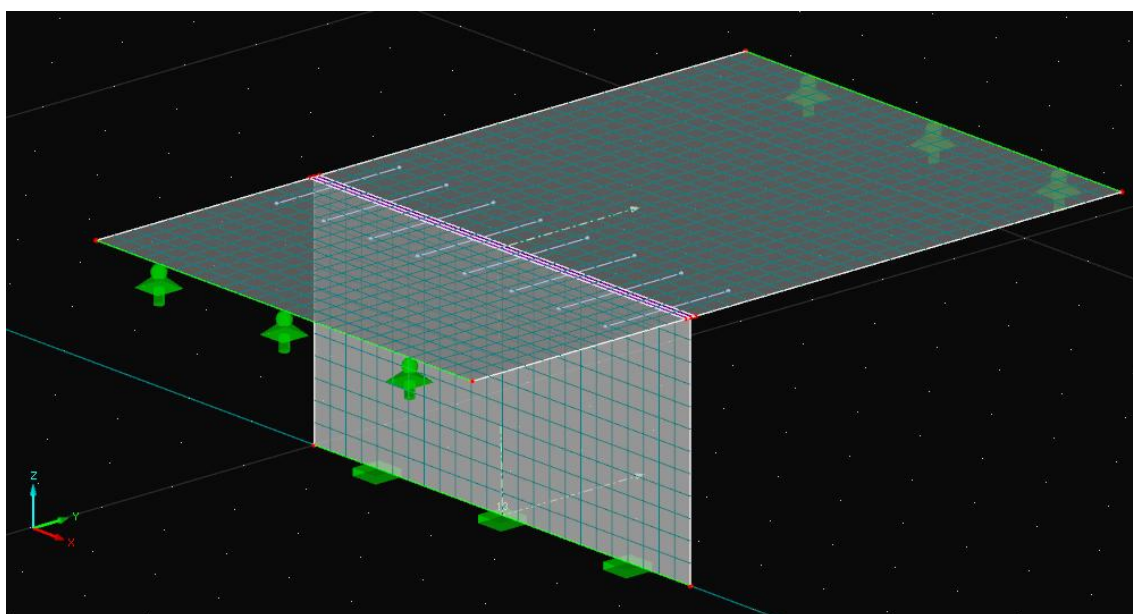
Kantavan väliseinän kuormitustilanteeksi valikoitui seinä, jonka päälle tukeutuu molemmin puolin rakennuksen välipohja. Välipohja asetettiin seinän päälle tuelle noudattaen ontelolaattojen valmistajan ohjeita, eli 60 mm tukipinnalla. Aiemmin tekstissä esitetyssä kuvassa 23 sivulla 52 esitetään periaate, jolla ontelolaattojen tuenta on toteutettu kantavan väliseinän päälle. Yksittäisen laatan epäkeskeinen tuenta suhteessa seinään huomioitiin laskennassa.

Välipohjana toimii 370 mm paksu ontelolaattavälipohja, jonka omapaino on saumattuna  $5,1 \text{ kN/m}^2$ . Tämän ontelolaatan päälle asetettiin 20 mm paksu tasoitekerros, jonka kuormana käytettiin  $0,5 \text{ kN/m}^2$ .

Hyötykuormana välipohjalla käytettiin arvoa  $2,5 \text{ kN/m}^2$ . Tämä hyötykuorma sisältää välipohjan päälle mahdollisesti asennettavat kevyet väliseinät. Asuinrakentamiselle tyypillisesti välipohjaan ei kohdistettu erillistä ripustuskuormaa.

Kuormitustapauksessa kantavan väliseinän molemmin puolin seinän päälle tuettiin ontelolaatat. Toisen puolen laatan pituus oli ainoastaan 3 metriä ja toisen laatan pituus 9 metriä. Muodostamalla kuormitustilanne näin, pyrittiin suurehkon kuormitusalan lisäksi kerryttämään vääntömomenttia seinälle voimakkaasti eri kokoisilla kuormitusaloilla seinän eri puolin. Seinän pituutena on käytetty arvoa 6 metriä ja korkeutena 3 metriä.

Kuvassa 24 esitetään havainnollistava kuva kuormitustapauksesta. Kuvasta voidaan havaita, että epäkeskeinen ontelolaattojen tuenta seinän päällä on huomioitu tekemällä seinän keskikohdasta ontelolaatan suuntaan äärettömän jäykkä kappale, jonka avulla kuorma välittyy seinän päälle epäkeskeisesti, todellista tilannetta tarkoin jäljitellen. Äärettömän jäykän kappaleen ja ontelolaatan väliin on asetettu seinän pituussuuntaisen kiertymän salliva vapautus. Tämä jäljittelee todellista tilannetta, jossa ontelolaatan pää ei ole täysin jäykästi tuettu seinän päällä. Yksittäisen ontelolaatan epäkeskisyyden seinän päällä on kantavan väliseinän tapauksissa suuruudeltaan 70 mm.



Kuva 24. Kuvakaappaus RFEM 5 -laskentaohjelmasta.

Yhtenä tarkasteltavana kuormitustapauksena on tarkastettu kuormitustapaus, jossa aiheutetaan seinälle vääntöä, vaihtelemalla hyötykuorman suuruutta eri kentillä. Tyypillisesti tällöin voidaan puhua niin sanotusta shakkilauta-tapauksesta. Vääntömomentin kannalta mitoittava tapaus voi hyvinkin muodostua tilanteesta, jossa toisella puolen seinää laatalta on täysi hyötykuorma, kun samanaikaisesti toisella puolen laatta ei ole

lainkaan hyötykuormaa. Lisäksi vääntöä seinälle aiheuttaa edullisen kuorman huomioiminen kertoimella 0,9, siinä missä epäedullinen kuorma kerrotaan tyypillisin murtorajatilakertoimin. Epäkeskeinen laattojen tuenta seinän päällä kasvattaa entisestään edellä mainittujen tapausten aiheuttamaa vääntömomenttia rakenteessa. Kuormitustapauksissa, joissa useampi kuin yksi kerros kuormittaa mitoitettavaa rakennetta huomioidaan myös ylempien seinien omapaino. Kantava väliseinä on mitoitettu kuvassa 25 esitetyillä mitoituskuomilla.

<b>Mitoituskuormat, kantava väliseinä</b>			
Kuormitus tilanne	Nd, [kN]	Mx.d+, [kNm]	Mx.d-, [kNm]
1 kerros	458,46	24,05	-48,60
4 kerrosta	2388,72	14,52	-29,06
7 kerrosta	4111,32	14,70	-29,28

Kuva 25. Kantavan väliseinän mitoituskuormat. Seinä on mitoituksessa 6 m pitkä, puristus Nd, voidaan jakaa metrikuormaksi jakamalla kuvassa esitetty arvo kuudella. Momentti Mx.d kuvastaa suurinta seinän poikittaissuuntaista vääntömomenttia.

### 3.2.2 Kantavan ulkoseinän sisäkuori

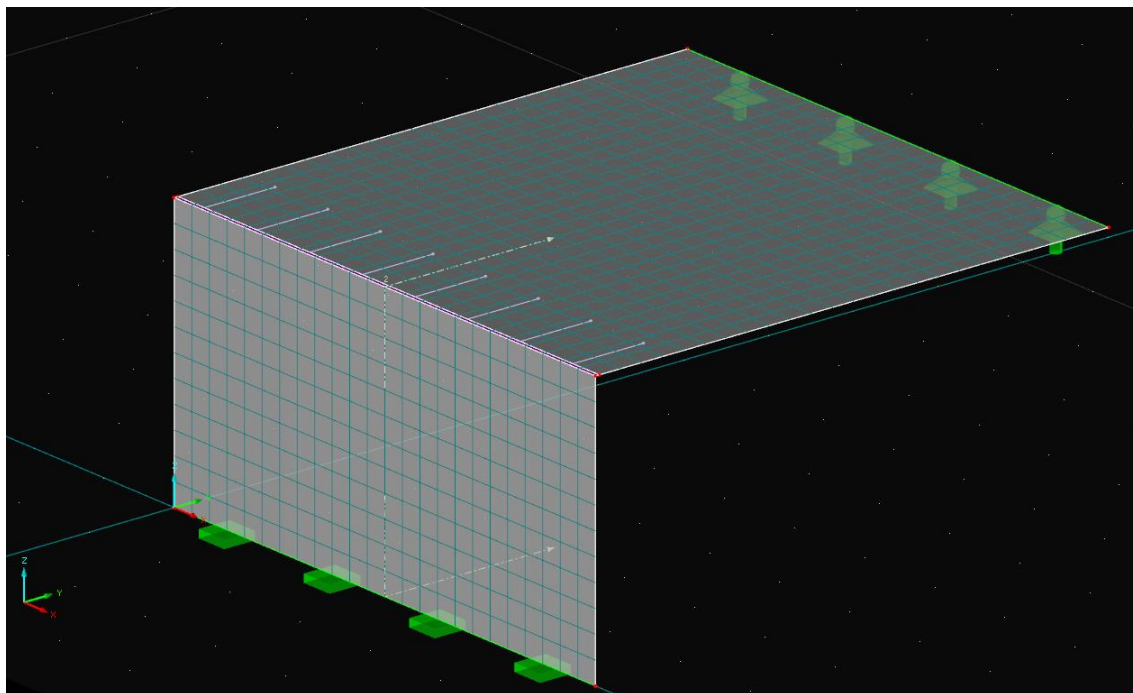
Kantavan ulkoseinän sisäkuoren kuormitustapauksissa kuorma seinälle kohdistuu välipohjilta sekä seinään kohdistuvasta vaakasuuntaisesta tuulikuormasta. Kantavan ulkoseinän sisäkuoren päälle asetetaan tuelle välipohjan 370 mm paksu ontelolaatta. Ontelolaatan pituus tässä kuormitustapauksessa on 6 metriä.

Välipohjan ontelolaatan tuennan epäkeskisyyks seinän päällä on suuruudeltaan 45 mm. Ontelolaatan omapaino on saumattuna 5,1 kN/m<sup>2</sup>, jonka lisäksi huomioidaan pinnan päällä tasoite kuormalla 0,5 kN/m<sup>2</sup>. Hyötykuorman suuruus välipohjalla on 2,5 kN/m<sup>2</sup> ja se sisältää kevyet väliseinät.

Rakennuksen tuulikuorma on laskettu hyödyntäen SKOL laskentapohjaa M10. Laskentapohjan avulla voidaan määrittää tuulen nopeuspaine, jota käytetään RIL 201-1-2013 ohjeiden mukaisesti lähtötietona mitoitustuulikuorman laskennassa. Kokonaistuulivoiman laskentaan on käytetty voimakerron menetelmää. Tuulikuormaksi rakenteelle on asetettu kauttaaltaan yhteneväisesti arvo 0,73 kN/m<sup>2</sup>. Laskennassa rakennus kuuluu maastoluokkaan 3, rakennus on tasakattoinen ja sen korkeus on 25,5 m. Rakennuksen

leveys toiseen suuntaan on 15 m ja toiseen suuntaan 50 m. Ulkoseinärakenteen eristeen tai ulkokuoren verhouksen painoa ei huomioida seinän sisäkuoren mitoituksessa.

Kuvassa 26 esitetään kantavan ulkoseinän 3-ulotteinen FEM-laskentamalli, joka on luotu RFEM 5 -ohjelmaan. 3-ulotteisessa mallissa seinän pituutena on käytetty arvoa 6 metriä ja korkeutena 3 metriä. Kuvan tapaus esittää yhden kerroksen kuormaa vastaavaa tapausa. Tämän lisäksi on tehty laskentamalleja, joissa sama kerros toistuu toistensa päälle, muodostaen neljän ja seitsemän kerroksen kuormitustapauksen.



Kuva 26. Kuvassa esitetään kantavan ulkoseinän 3-ulotteinen FEM-laskentamalli. Ontelolaatan seinää kohti olevassa sivussa näkyvät vaaleat sauvat kuvaavat kiertymävapautusta, joka on luotu äärettömän jäykän levyn ja ontelolaatan välille. Vapautuksen avulla pyritään jäljittelemään tarkemmin todellista rakenteen toimintaa.

Kantavan ulkoseinän sisäkuori on mitoitettu kuvassa 27 sivulla 62 esitetyillä kuormilla. Kuormat on laskettu FEM-ohjelmaan luodussa laskentamallissa.



Mitoituskuormat, kantavan ulkoseinän sisäkuori			
Kuormitus tilanne	Nd, [kN]	Mx.d+, [kNm]	Mx.d-, [kNm]
1 kerros	229,26	10,81	-24,24
4 kerrosta	1170,06	6,13	-14,67
7 kerrosta	2050,80	6,16	-16,63

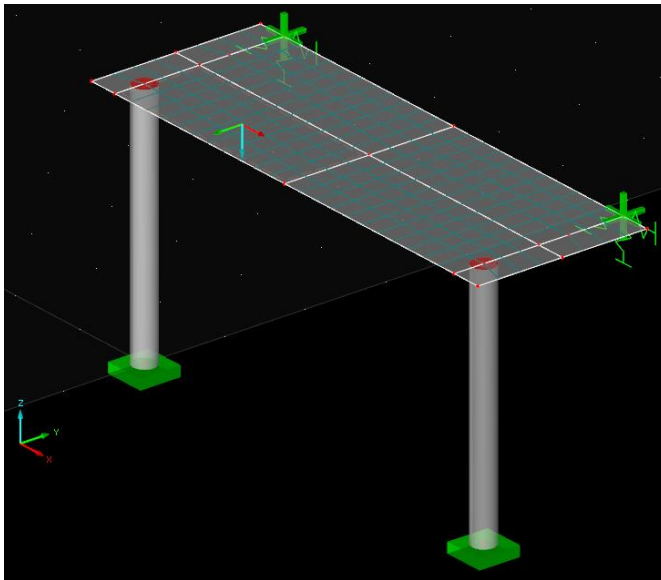
Kuva 27. Kantavan ulkoseinän sisäkuoren mitoituskuormat. Seinä on mitoituksessa 6 m pitkä, puristus Nd, voidaan jakaa metrikuormaksi jakamalla kuvassa esitetty arvo kuudella. Momentti Mx.d kuvastaa suurinta seinän poikittaissuuntaista vääntömomenttia.

### 3.2.3 Parvekepilari

Parvekepilaria kuormittaa sen nimensä mukaisesti parveke sen kaikkine kuormineen. Parvekkeen kuormat muodostuvat parvekelaatasta, kaidekuormasta sekä tason hyötykuormasta. Tässä kuormitustapauksessa tuulikuorma on jätetty pilarimitoituksessa huomioimatta, koska rakenteeseen aiheutuva tuulikuorma otetaan vastaan parvekeputkilla, jotka kantavat osaltaan myös parvekelaatan julkisivun puoleisen pystykuorman. Parvekepilarin korkeus laskentamallissa on 3 metriä.

Kuormitustapauksessa parvekkeen laattana on käytetty 260 mm paksua massiivibetonilaattaa. Parvekkeen leveys on 6 metriä ja syvyys 2,1 metriä. Kaidekuorma on käytetty 1 kN/m suuruista kuormaa parvekelaatan kolmella sivulla. Lisäksi parvekkeella on huomioitu hyötykuormana 2,5 kN/m<sup>2</sup> suuruinen kuorma.

Parvekepilari on valikoitu muodoltaan pyöreäksi, sillä sen katsottiin keskustelussa asiantuntijoiden kanssa olevan yleisempi asuntorakentamisessa kuin suorakaidepilarin. Kuvassa 28 sivulla 63 esitetään parvekepilarin 3-ulotteinen FEM-laskentamalli. Huomioitavaa laskentamallissa on etenkin parvekeputkien mallintaminen hyvin jäykkänä tukena, joka ei kuitenkaan ole äärettömän jäykkä. Todellisuudessa parvekeputki myötää hieman kuormituksesta, mitä on pyritty jäljentämään laskentamallissa asettamalla tueksi hyvin jäykkä jousi. Jousen jäykkyytenä sen kaikkiin suuntiin on käytetty arvoa 100 000 kN/m. Tämä tarkoittaa, että 100 000 kN kuorma aiheuttaisi jouseen 1 m suuruisen siirtymän.



Kuva 28. Kuvassa näkyy yksittäinen parvekekerros 3-ulotteisessa FEM-laskentamallissa. Parvekepilari on sijoitettu niin, että sen keskikohta on 365 mm päässä molemmista sivuista. Samoin jäykkinä jousina mallinnetut parvekeputket ovat 365 mm päässä parvekelaatan reunasta.

Parvekepilarin on mitoitettu kuvassa 29 esitetyillä kuormilla. Kuormat on laskettu FEM-ohjelmaan luodussa laskentamallissa.

Mitoituskuormat, parvekepilari					
Kuormitus tilanne	Nd [kN]	Md.y.top [kNm]	Md.y.btm [kNm]	Md.z.top [kNm]	Md.z.btm [kNm]
1 kerros	54,64	-7,36	3,63	-1,81	0,86
4 kerrosta	188,66	-5,46	2,72	-0,57	0,27
7 kerrosta	257,45	-5,45	2,72	-0,66	0,00

Kuva 29. Parvekepilarin mitoituskormat. Arvo Nd on pilarin mitoittava puristusvoima. Md kuvastaa taivutusmomentin suurinta arvoa. Indeksillä top (englanniksi top = yläpää) kuvataan pilarin yläpään momenttia ja vastaavasti lyhenne btm (englanniksi bottom = alapää) tarkoittaa pilarin alapään momentin mitoitussarvoa. Indeksillä y ja z kuvataan pilarin pääakselien suuntaa.

### 3.2.4 Pilariantura

Pilarianturan kuormat ovat laskettu samassa 3-ulotteisessa FEM-laskentatiedostossa parvekepilarin kanssa. Pilariantura on sijoitettu aiemman mitoitusapauksen parvekepilarin alle. Pilarianturan kuormia kerryttävät rakenteet ovat siis varsin samanlaiset kuin parvekepilareilla.

Ensimmäisen kerroksen parvekepilari sijoitetaan suoraan anturan yläpinnan päälle. Pilariantura on maanvarainen. Pilarianturan mitoituskuormat ovat esitetty kuvassa 30. Pilarianturan mitoitukseen käytetty SKOL-laskentapohja tarvitsi lähtötiedoiksi ominaisarvoina anturaan kohdistuvat pystykuormat, vaakakuormat sekä momentit. Nämä edellä mainitut rasitukset tulee eroteltuna pysyviin kuormiin ja muuttuviin kuormiin. Pysyvän kuorman tunnus on G ja muuttuvan kuorman tunnus Q. Kirjain N kuvastaa puristusta ja kirjain M vääntömomenttia. Indeksillä k, viitataan kuorman olevan ominaisarvo, ei mitoitusarvo. X ja y ovat anturan pääakselien suunnat.

Mitoituskuormat, pilariantura										
Kuormitus tilanne	N.Gk [kN]	N.Qk [kN]	M.Gk.y [kNm]	M.Qk.y [kNm]	H.Gk.y [kN]	H.Qk.y [kN]	M.Gk.x [kNm]	M.Qk.x [kNm]	H.Gk.x [kN]	H.Qk.x [kN]
1 kerros	36,48	9,97	3,10	1,11	0,79	0,33	1,06	0,31	3,15	1,13
4 kerrosta	128,57	35,39	2,09	0,75	0,28	0,17	0,28	0,17	2,11	0,76
7 kerrosta	179,08	49,24	2,09	0,75	0,08	0,11	0,06	0,11	2,11	0,76

Kuva 30. Pilarianturan mitoitukseen käytetyt ominaiskuormat. Mitoitukseen käytetty laskentapohja tekee tarvittavan Eurokoodinmukaisen kuormayhdistelyn, jolla rakenne mitoiteaan.

## 4 Rakenteiden mitoitus ja hiilijalanjätkilaskenta

Tämä luku ja sen alaluvut selventävät mitoituksen kulkua sekä mitoitustulosten perusteella tehtyä hiilijalanjätkilaskentaa. Materiaalien hiilijalanjätkitiedot perustuvat Suomen ympäristökeskuksen sekä ympäristöministeriön hiilijalanjätkitietoihin. Tarkemmin päästötietoja selventää luku 2.3 Betonin valmistuksessa syntyvät päästöt, alalukuineen.

Pääpiirteittäin betonirakenteiden mitoitus suoritettiin määrittämällä ensin kuormat mitoitettaville rakenteille. Tämän jälkeen näillä kuormilla mitoitettiin raudoitus rakenteisiin. Kun rakenteen raudoitus oli tiedossa, laskettiin valitun raudoituksen sekä rakenteessa käytetyn betonin painon perusteella rakenteen hiilijalanjätki.

Eri kuoritusten lisäksi jokaisessa rakenteessa betonin lujuutta varioitiin, pyrkimyksenä saavuttaa eroja vaadituissa raudoitusmäärissä eri betonin lujuuksilla. Jokaiselle rakenteelle käytettiin kolmea eri betonilujuutta. Rakenteiden toimivuus palotilanteessa varmistettiin taulukkomitoitusmenetelmin, lisäksi tarkastuksissa toteutettiin käyttörajatilan sekä murtorajatilan mitoitus.

Rakenteiden mitoitustiedot esitetään kuvissa 32, 34, 36 ja 38. Mitoitustiedot perustuvat kirjallisiin lähteisiin, joista merkittävimpinä voidaan mainita *Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016 - by 68* [61] ja *Betoninormit 2016 – by 65* [29].

Mitoituksessa raudoittamattoman betonin tiheytenä on käytetty arvoa  $2310 \text{ kg/m}^3$ . Raudoittamattoman betonin tiheys on laskettu Suomen betoniyhdistyksen julkaiseman *Betonitekniikan oppikirja 2004 – by 201* [28] mukaan. Kirjassa mainitaan tavanomaisen raudoitetun betonin materiaalisältö, jonka perusteella raudoittamattoman betonin tiheys on laskettu.

Teräksen tiheytenä käytetään arvoa  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Yksittäisten raudoitteiden metripainojen tiedot ovat esitetty kuvassa 31 sivulla 66. Hiilijalanjätkilaskennassa materiaaleille käytetyt GWP-arvot ovat esitetty kuvassa 9 sivulla 24. Käytetyt GWP-arvot perustuvat Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämään Rakentamisen päästötietokanta -internetsivustoon. Mitoitusten tarkat tulokset raudoitemäärien, betonimenekin sekä hiilijalanjäljen osalta ovat esitetty seuraavissa alaluvuissa esitettävissä kuvissa 33, 35, 37 ja 39.

Harjateräs	kg/m
T6	0,222
T8	0,395
T10	0,617
T12	0,888
T16	1,580
T20	2,470
T25	3,850
T32	6,310

Kuva 31. Harjaterästen metripainot [62]. Tunnus T viittaa normaaliin harjateräkseen, eli kyseessä ei ole ruostumaton raudote. Tyypillisten harjateräs raudotteiden halkaisijat vaihtelevat välillä 6...32 mm. Kuva Joonas Jaakkola.

#### 4.1 Kantava väliseinä

Kantavan väliseinän mitoittamiseen on käytetty Elementtisuunnittelu.fi -sivuston tarjoamaa *Seinän mitoitus* -Excel tiedostoa. Kantava väliseinä mitoitettiin kuvan 32 esittämien mitoittustietojen mukaisin oletuksin. Kantavan väliseinän tyypillisenä betonin lujuutena voidaan pitää arvoa C30/37.

Kantava väliseinä	
suunnittelu käyttöikä	100 vuotta
betonin lujuus	C12/15, C30/37, C50/60
kiviaineksen suurin raekoko	#16
rasitusluokka (BY 50)	X0
betonipeitteen nimellisarvot	20 mm
seuraamusluokka	CC2
luotettavuusluokka	RC2
toteutusluokka (SFS-EN 13670)	2
toleranssiluokka (SFS-EN 13670)	1
paloluokka	R60

Kuva 32. Kantavan väliseinän mitoittustiedot.

Kantavan väliseinän paksuutena on käytetty arvoa 200 mm. Tähän seinäpaksuuteen on johtanut asuinrakennuksen akustiset vaatimukset sekä molemminpuolisten laattojen tuennan vaatima pinta-ala seinän päällä. Lisäksi todettiin, että 200 mm paksu kantava väliseinä kuvastaa parhaiten tyypillistä asuinkerrostalorakentamista kyseiselle rakenteelle. Kantava väliseinä mitoitettiin jäykistettynä rakenteena.

Seinän mitoittamiseen käytetty Elementtisuunnittelu.fi -verkkosivuston laskentapohja ei tarkasta rakenteen minimiraudoitusta. Huolimatta siitä, että mitoitusasetelma oli luotu tarkoituksella niin, että seinälle saataisiin suurehko vääntömomentti, saadut tulokset kaikissa mitoitus tapauksissa johtivat minimiraudoituksen käyttöön.

Minimiraudoitus tarkasteltiin erikseen käsinlaskentamenetelmin. Miniraudoituksen laskennassa noudatettiin eurokoodin mukaista laskentaa. Raudoitukseksi kaikissa mitoitus tilanteissa valikoitui T10 raudoite 300 mm jaolla molempiin pintoihin ja molempiin suuntiin. Seinän muiksi raudoitteiksi huomioitiin T10 haat kauttaaltaan seinän ympäri 300 millimetrin jaolla. Yksittäisen haan pituus suorana harjateräksenä oli 950 mm. Kuvassa 33 esitetään kantavan väliseinän mitoitus tulokset.

<b>Mitoitustulokset, kantava väliseinä</b>			
<b>1, 4 ja 7 krs kuorma</b>	<b>C12/15</b>	<b>C30/37</b>	<b>C50/60</b>
Raudoite määrä	#10-300 MP	#10-300 MP	#10-300 MP
Raudoite kuutioina [m <sup>3</sup> ]	0,021	0,021	0,021
Raudoite kiloina [kg]	161,94	161,94	161,94
Betoni kuutioina [m <sup>3</sup> ]	3,10	3,10	3,10
Betoni kiloina [kg]	7159,55	7159,55	7159,55
Raudoitteen CO2-ekv. [kg]	108,50	108,50	108,50
Betonin CO2-ekv. [kg]	644,36	1045,29	1252,92
Rakenteen CO2-ekv. [kg]	752,86	1153,79	1361,42

Kuva 33. Kantavan väliseinän mitoitus tulokset. Mitoitus johti kaikissa kuormitus tapauksissa ja kaikilla betonilujuuksilla minimiraudoitukseen. Kuvassa esitettyihin raudoitusten määriin on huomioitu seinän pintojen raudoitteiden lisäksi seinän reunoille asennettavat haat. Merkintä # -viittaa raudoiteverkkoon ja MP viittaa sanoihin: molempiin pintoihin. Raudoiteverkon sijaan rakenne voitaisiin raudoittaa myös irtotangoilla merkinnästä huolimatta.

#### 4.2 Kantavan ulkoseinän sisäkuori

Kantavan ulkoseinän sisäkuoren mitoituksessa on hyödynnetty Elementtisuunnittelu.fi -verkkosivuston mitoitus pohjaa. Kuvassa 34 sivulla 68 on esitetty kantavan ulkoseinän sisäkuoren mitoitus tiedot. Kantavan ulkoseinän sisäkuoren tyyppillisenä betonin lujuutena voidaan pitää arvoa C30/37.

Kantavan ulkoseinän sisäkuori	
suunnittelu käyttöikä	100 vuotta
betonin lujuus	C20/25, C30/37, C50/60
kiviaineksen suurin raekoko	#16
rasitusluokka (BY 50)	XC1
betonipeitteen nimellisarvot	20 mm
seuraamusluokka	CC2
luotettavuusluokka	RC2
toteutusluokka (SFS-EN 13670)	2
toleranssiluokka (SFS-EN 13670)	1
paloluokka	R60

Kuva 34. Kantavan ulkoseinän sisäkuoren mitoitustiedot.

Kantavan ulkoseinän sisäkuoren paksuutena on käytetty arvoa 150 mm. Seinän korkeutena mitoituksessa on käytetty 2,6 metriä ja pituutena 6 metriä. Rakennetta on käsitelty mitoituspohjassa jäykistettynä seinänä.

Mitoitustuloksiksi saatiin kaikissa kuormitustapauksissa ja kaikilla betonilujuuksilla minimiraudoitusvaatimus. Minimiraudoitus laskettiin erillisessä laskennassa käsinlaskenta-menetelmin. Minimiraudoitusvaatimuksen mukaisesti raudoitukseksi valittiin T8 raudoite 300 millimetrin jaolla. Seinän pitojen raudoitteen lisäksi seinän raudoituksena huomioitiin T8 haat, joita asetettiin seinän ympäri 300 mm jaolla. Yksittäisen haan pituus suorana harjateräksenä oli 950 mm. Kuvassa 35 esitetään kantavan ulkoseinän sisäkuoren mitoitustulokset.

Mitoitustulokset, kantavan ulkoseinän sisäkuori			
1, 4 ja 7 krs kuorma	C20/25	C30/37	C50/60
Raudoite määrä/puoli	#8-300 MP	#8-300 MP	#8-300 MP
Raudoite kuutioina [m <sup>3</sup> ]	0,013	0,013	0,013
Raudoite kiloina [kg]	103,67	103,67	103,67
Betoni kuutioina [m <sup>3</sup> ]	2,33	2,33	2,33
Betoni kiloina [kg]	5374,89	5374,89	5374,89
Raudoitteen CO <sub>2</sub> -ekv. [kg]	69,46	69,46	69,46
Betonin CO <sub>2</sub> -ekv. [kg]	483,74	784,73	940,61
Rakenteen CO <sub>2</sub> -ekv. [kg]	553,20	854,20	1010,07

Kuva 35. Kantavan ulkoseinän sisäkuoren mitoitustulokset. Huolimatta pyrkimyksestä luoda melko haastava kuormitustilanne rakenteelle, mitoituksen tuloksena saatiin vain minimiraudoitusvaatimus rakenteelle. Myöskään betonin lujuuden muutoksella ei saavutettu eroja rakenteen raudoitusvaatimuksiin.

### 4.3 Parvekepilari

Parvekepilari mitoitettiin yläpäästään vaakasiirtymälle tuettuna pilarina. Rakenteen nurjahduskertoimena käytettiin arvoa 1,0. Kuvassa 36 on esitetty parvekepilarin mitoitustiedot. Parvekepilarin tyypillisenä betonin lujuutena voidaan pitää arvoa C40/50.

Parvekepilari	
suunnittelu käyttöikä	50 vuotta
betonin lujuus	C30/37, C40/50, C50/60
kiviaineksen suurin raekoko	#16
rasitusluokka (BY 50)	XC4, XF1
betonipeitteen nimellisarvot	35 mm
seuraamusluokka	CC2
luotettavuusluokka	RC2
toteutusluokka (SFS-EN 13670)	2
toleranssiluokka (SFS-EN 13670)	1
paloluokka	R30

Kuva 36. Parvekepilarin mitoitustiedot.

Parvekepilari mitoitettiin 2,8 m korkeana. Huomioitavaa rakenteelle on sen käyttöikä, joka on muita mitoitettuja rakenteita lyhyempi. Rakenteen käyttöikä on 50 vuotta. Huomioitavaa on myös rakenteen suurehko ympäristön rasitus. Rasitusluokan XC4 rakenne on jaksolliselle kastumiselle ja kuivumiselle altis. Rasitusluokka johtaa betonipeitteen paksuuden suurentamiseen rakenteen suunnittelussa. Suurempi betonipeite on myös palotilanteen kannalta rakenteen kapasiteettia parantava tekijä. Pilari täyttää rakenteen palomitoitusvaatimuksen Eurokoodin mukaisin taulukkomitoitusmenetelmin tarkastettuna.

Pilarin haoiksi asetettiin kaikissa mitoitustapauksissa T8 raudoite 150 millimetrin jaolla. Pyrkimyksenä oli luoda vaihtelua laskennan vaatimiin pääteräksiin sekä betonin lujuuteen.

Käytetty SKOL-laskentapohja tarkastaa pilarin kapasiteetin yhteen suuntaan taivutettuna, tämä on huomioitu tulosten tarkastelussa, varmistamalla riittävän matala käyttöaste rakenteelle. Todellinen rakenne on kahteen suuntaan taivutettu, vaikka vääntö etenkin toisen pääakselin suhteen on varsin pieni.



Kuvassa 37 on esitetty parvekepilarin mitoituksen tulokset. Huolimatta siitä, että rakennetta kuormitettiin kolmella eri suuruisella kuormalla ja rakenteessa käytetyn betonin lujuutta muutettiin, määrääväksi tekijäksi rakenteissa muodostui minimirauditusvaatimus, jonka käytetty laskentapohja tarkastaa. Mitoitustuloksissa on huomioitu pääraudoitteiden ja betonin ohella rakenteessa käytetty hakarauditus.

Mitoitustulokset, parvekepilari			
1, 4 ja 7 krs kuorma	C30/37	C40/50	C50/60
Raudoite määrä	4T10 + HAAT 8-150	4T10 + HAAT 8-150	4T10 + HAAT 8-150
Raudoite kuutioina [m <sup>3</sup> ]	0,00148	0,00148	0,00148
Raudoite kiloina [kg]	11,63	11,63	11,63
Betoni kuutioina [m <sup>3</sup> ]	0,086	0,086	0,086
Betoni kiloina [kg]	199,78	199,78	199,78
Raudoitteen CO2-ekv. [kg]	7,79	7,79	7,79
Betonin CO2-ekv. [kg]	29,09	29,97	34,96
Rakenteen CO2-ekv. [kg]	36,88	37,76	42,75

Kuva 37. Parvekepilarin mitoitustulokset. Kaikissa mitoitustapauksissa rakenteen kuormat, etenkin mitoitusmomentti jäi niin pieneksi, että rakenne toimi minimiraudituksella. Myöskään betonin lujuutta varioimalla ei saatu aikaan eroa vaaditussa raudituksessa.

#### 4.4 Pilariantura

Pilariantura mitoitettiin maanvaraisena anturana. Maan kantokestävyytenä käytettiin arvoa 500 kN/m<sup>2</sup>. Anturan päälle asetettiin 0,5 metriä täyttöä, jonka tiheys oli 21 kN/m<sup>3</sup>. Anturan yläpuolisesta täytöstä aiheutui siis lisäkuormaa 10,5 kN/m<sup>2</sup>. Kuvassa 38 esitetään pilarianturan mitoituksen tiedot. Pilarianturan tyypillisenä betonin lujuutena voidaan pitää arvoa C25/30 tai C30/37.

Pilariantura (maanvarainen)	
suunnittelu käyttöikä	100 vuotta
betonin lujuus	C20/25, C30/37, C50/60
kivianneksen suurin raekoko	#32
rasitusluokka (BY 50)	XC2
betonipeitteen nimellisarvot	30 mm, Maata vasten 50 mm
seuraamusluokka	CC2
luotettavuusluokka	RC2
toteutusluokka (SFS-EN 13670)	2
toleranssiluokka (SFS-EN 13670)	1
paloluokka	-

Kuva 38. Parvekeanturan mitoitustiedot.

Parvekepilariin alapinta asetettiin suoraan anturan yläpintaan, ilman erillistä perustusta. Pilarianturan dimensioiksi valikoitui käytetyn SKOL-laskentapohjan tarkastelun mahdollistama pienin antura. Antura oli tasakylkinen 1400 mm leveä ja 600 mm korkea suorakulmainen särmiö.

Antura raudoitettiin alapintaan asennettavilla raudoiteilla, jotka ankkuroitiin taivuttamalla niitä päistään ylöspäin anturan sivuille 300 millimetrin matkan. Yksittäisen raudoitettanگون pituus oli siis 1,9 m suorana. Käytetty mitoituspohja tarkasti anturan kaatumisen, liukumisen sekä tarvittavaan raudoituksen. Huomioitavaa on, että betonin lujuuden kasvattamisella anturan mitoituksessa on vaikutus vaadittuun minimiraudoituksen määrään. Tästä aiheutuen, kun betonin lujuutta nostettiin, vaadittu raudoitusmäärä kasvoi. Kuvasssa 39 esitetään pilarianturan mitoituksessa saadut tulokset.

<b>Mitoitustulokset, pilariantura</b>			
<b>1, 4 ja 7 krs kuorma</b>	<b>C20/25</b>	<b>C30/37</b>	<b>C50/60</b>
Raudoite määrä/puoli	T12-180	T12-140	T12-90
Raudoite kuutioina [m <sup>3</sup> ]	0,0034	0,0043	0,0069
Raudoite kiloina [kg]	27	33,74	53,99
Betoni kuutioina [m <sup>3</sup> ]	1,173 m <sup>3</sup>	1,172	1,169
Betoni kiloina [kg]	2709 kg	2707	2701
Raudoitteen CO2-ekv. [kg]	18,09 kg	22,61	36,17
Betonin CO2-ekv. [kg]	325,03 kg	395,17	472,62
Rakenteen CO2-ekv. [kg]	343,12 kg	417,78	508,79

Kuva 39. Maanvaraisen pilarianturan mitoitus tulokset. Käytettäessä lujempaa betonia vaadittu minimiraudoituksen määrä kasvoi, tästä aiheutuen lujemman betonin hiilijalanjälki kasvoi entisestään.

Pilarianturaa kuormitettiin kolmella eri kuormitustapauksella. Mitoitustuloksissa kuormitustapausten eroavat mitoituskuormat eivät kuitenkaan näy. Rakenteen raudoituksen kannalta merkittäväksi muodostui minimiraudoituksivaatimus.

## 5 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen rakenteiden kuormitustilanteet pyrkivät vastaamaan todellisen betonirunkoisen asuinkerrostalon kuormitustilanteita. Rakenteita kuormitettiin yhden, neljän sekä seitsemän kerroksen kuormalla. Tästä huolimatta kaikille rakenteille kaikissa kuormitustapauksissa ja kaikilla betonilujuuksilla mitoittavaksi tekijäksi muodostui minimiraudoitusvaatimus, murtorajatilan, käyttörajatilan tai palotilanteen vaatiman raudoituksen sijaan.

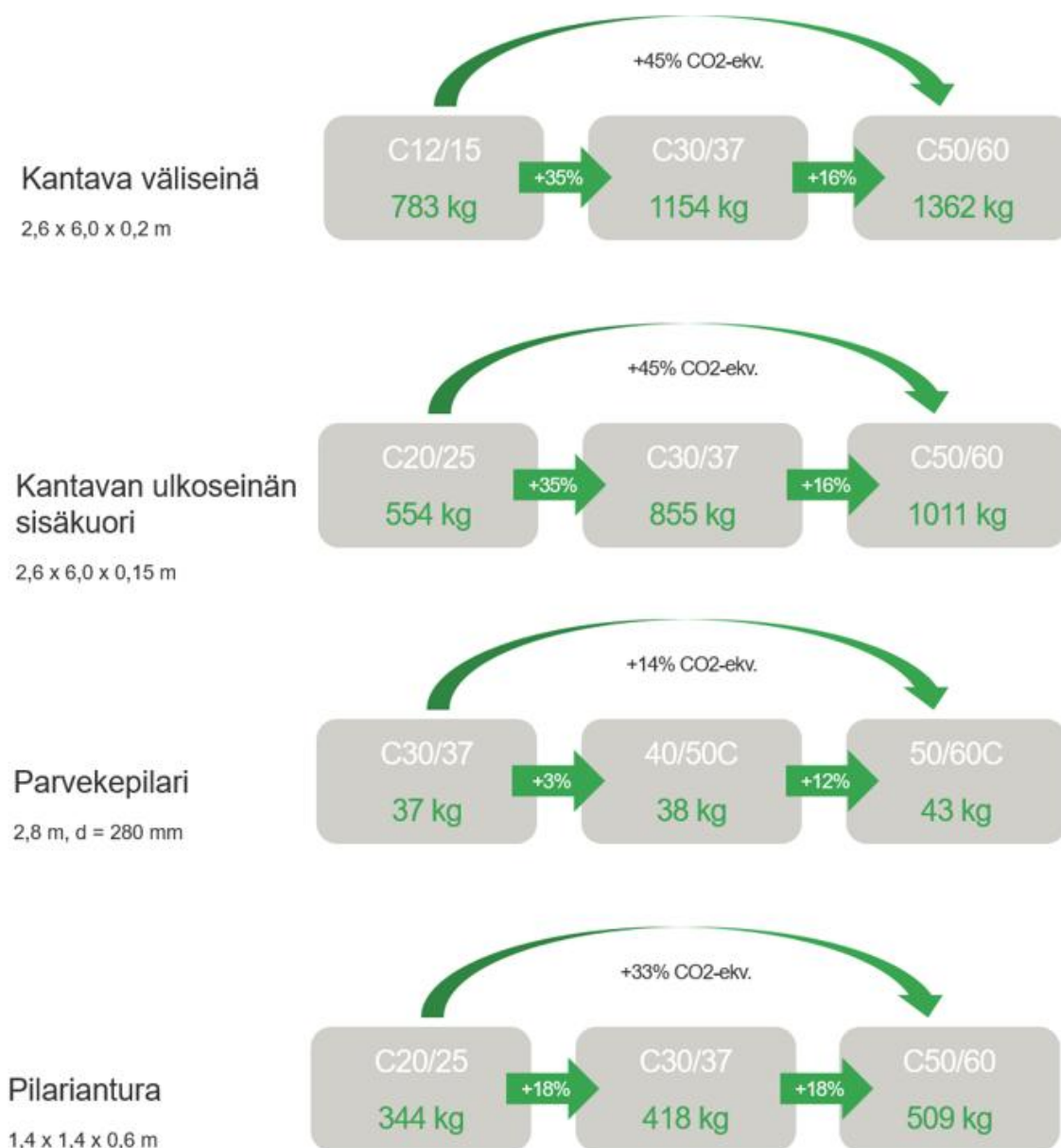
Seinien paksuudet niin kantavassa väliseinässä kuin kantavassa ulkoseinän sisäkuoressa määrittyivät akustisten ja rakenteellisten vaatimusten perusteella. Näistä syistä seiniä ei ole mielekästä kaventaa nykyisistä leveyksistään. Mitoituksessa osoittautui, että tyypillisen leveyden omaavat seinät ovat melko helposti raudoitettavissa kantamaan tyypillisen asuinkerrostalon kuormia.

Parvekepilarin mitoituksessa käytettiin pilarin poikkileikkauksena 280 mm halkaisijan omaavaa pyöreää parvekepilaria. Tutkimuksessa osoittautui, että parvekerakenteessa, jossa vaakavoimat parvekkeelta siirretään rakennuksen runkoon julkisivusta ulokkeina toimivin parvekeputkin, eivät varsinaisten parvekepilarien rasitukset tyypilliset dimensiot omaavalta parvekelaatalta ole kovinkaan suuret. Suurempaan raudoitemäärään olisi päädytty epäilemättä, mikäli tuulesta parvekkeelle aiheutuvia vaakavoimia olisi siirretty perustuksille parvekepilareilla parvekeputkien sijaan.

Pilarianturan mitoituksesta SKOL-laskentapohjalla voidaan todeta, että mitoittavaksi tekijäksi muodostui jälleen minimiraudoitusvaatimus. Huomioitavaa pilarianturan tapauksessa kuitenkin on, että betonin lujuuden muutos aiheutti variaatiota vaadittuun minimiraudoitukseen. Mitoitustuloksissa anturan raudoitteet on annettu T12-raudoitteella, todennäköistä on, että todellisessa tapauksessa raudoitteena käytettäisiin harvemmallalla jaolla T16-raudoitetta. Käytettyjen harjaterästen halkaisija ei kuitenkaan vaikuta mitoitetun raudoitemäärän poikkileikkauspinta-alan vaatimukseen.

Mitoitusten tuloksista voidaan tulkita, että pienentämällä betoninlujuutta voidaan pienentää rakenteen hiilijalanjälkeä. Tuloksien perusteella betonin lujuuden pienentäminen ei ainakaan tutkimuksen tarkastelemissa, tyypillisissä asuinkerrostalojen rakenteissa aiheuta raudoitemääriin merkittävää kasvua. Tämän tutkimuksen rakenteet toimivat pääsääntöisesti samalla minimiraudoitemäärällä, matalilla betonin ljujuuksilla kuin

suuremmillakin betonin lujuuksilla. Näin ollen voidaan todeta, että huomioiden rakenteen muut vaatimukset, betonin lujuuden pienentäminen voi olla varteenotettava keino vähentää betonirakenteiden hiilijalanjälkeä. Kuvassa 40 esitetään tutkimuksen eri rakenteiden hiilijalanjälki sekä eri betonin lujuuksilla mitoitettujen rakenteiden välinen hiilijalanjäljen prosentuaalinen ero.



Kuva 40. Tutkimuksen rakenteiden hiilijalanjäljet hiilidioksidiekvivalentteina. Lisäksi kuvassa esitetään eri betonin lujuuksilla mitoitettujen rakenteiden hiilijalanjäljen prosentuaalisia eroja. Kasvatettaessa betonin lujuutta tutkimuksen kaikissa tapauksissa rakenteen hiilijalanjälki kasvoi.

Kuvan 40 sivulla 73 esittämien mitoitustulosten perusteella voidaan todeta, että tutkimuksen tulokset rakenteiden hyvin samankaltaisten raudoitusten ansiosta ovat betonin lujuuden kannalta kuitenkin mielenkiintoisia. Rakenteissa betonin lujuuden muutos on selvästi liitettävissä rakenteen hiilijalanjälkeen. Tämän tutkimuksen rakenteissa poikkeuksetta betonin lujuuden kasvattaminen kasvatti myös rakenteen hiilijalanjälkeä.

## 6 Virhearvio

Tutkimuksessa virhearvion kannalta on merkittävää, että havaitaan hiilijalanjälkilaskennan sisältämä epävarmuus. Eri lähteisiin perustuva tieto materiaalien hiilijalanjäljestä voi vaihdella merkittävästi. Tässä tutkimuksessa tätä ongelmaa on pyritty vähentämään käyttämällä luotettavina pidettyjen lähteiden Suomen ympäristökeskuksen sekä ympäristöministeriön tuottamia hiilijalanjälkimateriaalitietoja.

Tutkimuksessa rakenteiden hiilijalanjälkilaskenta suoritettiin käyttäen hiilidioksidiekvivalenttia laskentamenetelmää, jossa eri päästöjen ilmastoa kuormittavaa vaikutusta verrataan hiilidioksiidiin. Laskentamenetelmästä voidaan todeta, että tieteen kehittyessä myös materiaalien arvot voivat muuttua ja tarkentua. Hiilijalanjäljen tai ilmastoa lämmittävän vaikutuksen laskenta tuskin koskaan on eksaktia. Huomioitavaa on, että jopa melko pieni muutos materiaaliarvoissa, eli tutkimuksen lähtöarvoissa, vaikuttaa merkittävästi tämän tutkimuksen hiilijalanjälkilaskennan tuloksiin.

Virhearvion kannalta on syytä mainita, että betonin paino on laskettu tutkimuksessa *by 201* -julkaisun esittämän tavanomaisen betonin suurpiirteisten sisältämien osa-aineiden mukaan. Todellisuudessa betonin paino voi mahdollisesti erota hieman tästä laskennallisesta painosta, tai eri betonilujuuksien paino suhteessa toisiinsa saattaa vaihdella.

Virhearvion kannalta on syytä todeta, että luodut mitoitustilanteet ja mitoitusolettamat voivat olla todellisten rakenteiden kannalta osin puutteellisia. Tällä lausumalla tarkoitetaan, että todellisen rakenteen suunnittelu on yksilöllinen prosessi, eivätkä tämän tutkimuksen oletamat näin ollen kuvasta lopulta kuin yksittäistä tapausta. Myöskin rakenteen toteutus voi olla rakenteen suunnittelua ja esimerkiksi raudoitusta ohjaava tekijä. Esimerkiksi joissain tapauksissa rakenteeseen voidaan käyttää laskennallista vähimmäismäärää suurempi raudoitemäärä helpottamaan rakenteen toteutusta. Tässä

tutkimuksessa ei ole huomioitu rakenteen toteutusta suunnittelua ohjaavana piirteenä, paitsi sillä laajuudella, että rakenne on toteutettavissa.

On myös huomioitava, että tutkimuksessa suoritetuissa mitoituksissa käytettiin rakenteessa yleisesti pääraudoitusta sekä hakaraudoitusta. Todellisessa tilanteessa rakenteeseen voidaan lisätä näiden raudoitteiden lisäksi erilaisia muita raudoitteita tai varusteita, joita ei tässä tutkimuksessa sen yleisluontoisuuden vuoksi ole huomioitu. Nämä valtuutettavat raudoitteet tai varusteet ovat mahdollisesti terästä, jonka ympäristöra-  
situs voi olla yllättävän suuri, etenkin jos materiaali on ruostumatonta terästä.

## 7 Pohdinta

Tämän tutkimuksen aihe on erittäin ajankohtainen. Ilmastonmuutos ja ihmisen toiminta sen voimistamisessa on nyt jatkuvasti esillä kaikissa toimintaympäristöissämme, niin myös rakentamisessa. Tällä hetkellä rakentamisen ja etenkin betonin valmistamisen suuresta volyymistä aiheutuvan suuren hiilijalanjäljen pienentäminen on merkittävän muutospaineen alla.

Työn tavoitteena oli tarkastella tyypillisen betonirakenteisen asuinkerrostalon rakenteita ja tutkia, miten betonin lujuuden pienentäminen yleisesti käytössä olevilla betonilujuuksilla vaikuttaa rakenteen dimensioihin ja raudoitteisiin. Kysymyksenä yksinkertaisuudessaan oli, voidaanko näissä olosuhteissa yksinomaan betonin lujuutta pienentämällä saavuttaa pienempi hiilijalanjälki?

Työn aihetta ideoidessa, keskustelussa Ramboll Finland Oy:n rakennesuunnittelun asiantuntijoiden kanssa, esiin nousi ajatus siitä, että työn tulos voi hyvinkin olla se, että betonin lujuutta pienentämällä ei saavuteta mitoituksen tuloksena saatavissa raudoitemäärissä varianssia. Toisaalta esiin nousi myös ajatus siitä, että betonin lujuuden pienentäminen voi aiheuttaa ei-toivotun kehityksen raudoitemääriin ja näin ollen aiheuttaa suuremman hiilijalanjäljen rakenteelle. Tämä ristiriitaisuus keskustelussa kuvastaa sitä, että tutkimuksen aihe käsittelee monitahoista ongelmaa, jonka syy-seuraussuhteet ovat monimutkaisia. Tästä aiheutuen jopa rakennesuunnittelun asiantuntijan on hankala tehdä tutkimukseen todennettavaa hypoteesia.

Tutkimuksessa tavoitteet saavutettiin osin. Tutkimuksen ongelmana voidaan mainita se, että vaikka kuormitustilanteet suunniteltiin tyypillisen asuinkerrostalon lähtökohdista haastaviksi, ei rakenteisiin saatu kohdistettua niin suuria rasituksia, että raudoitusta olisi tarvittu paljon. Tämä johti siihen, että varsinaista optimointia rakenteiden dimensioiden, betoninlujuuden ja raudoitemäärän suhteen ei päästy laajamittaisesti toteuttamaan.

Esimerkkinä haasteista luoda rakenteita voimakkaasti raudoitettavia rasituksia, voidaan nostaa esiin kantavan väliseinän tapaus. Tavoiteltaessa suurempaa rasitusta rakenteeseen, muutettiin tutkimuksen edetessä kantavan väliseinän kuormitustilannetta kertaalleen. Tutkimuksessa esitetty kantavan väliseinän kuormitustilanne on haastavammaksi muokattu versio aiemmin seinän molemmin puolin yhtä pitkistä välipohjalaatoista, joiden tuenta niin ikään johti minimiraudoitusvaatimukseen.

Kuormitustilanteiden aiheuttamat vähäiset raudoitemäärät eivät kuitenkaan kieli yksinomaan epäonnistuneesta tutkimusasetelmasta. Tyypillisiksi tapauksiksi kuvatut kuormitustilanteet osoittavat, että rakenteiden betonin lujuutta voisi olla mahdollista pienentää niin, että rakenne edelleen kantaa sille asetetut kuormat ja rakenteen dimensiot sekä raudoitemäärät pysyvät ennallaan. Tutkimus nosti esiin myös sen, että nykyisellään tyypilliset rakennepaksuudet ovat jo nyt useiden rakenteiden vaatimusten vuoksi niin kapeita kuin ne voivat olla. Yhtenä merkittävänä syynä voidaan tässä yhteydessä nostaa esiin akustiikka, joka asettaa merkittäviä rajoja massiivisten betonirakenteiden paksuudelle.

Tutkimuksen voidaan katsoa monin osin onnistuneen hyvin. Tutkimuksessa erinomainen asia olivat hyvin yleispätevät ja laajasti käytössä olevat laskentapohjat, jotka loivat tutkimukseen erinomaisen toistettavuuden ja mahdollisuuden vertaisarviointiin. Lisäksi tutkimuksen yleispätevyyttä lisääväksi onnistumiseksi voidaan mainita onnistunut luotettavien hiilijalanjälkitietojen kartoitus.

Varsinaisen tutkivan osuuden lisäksi tämä opinnäytetyö luo laaja-alaisen katselmuksen aiheen taustoihin, sekä nostaa esiin keskeiset betonirakenteisen asuinrakennuksen rakenteiden mitoituksen tekijät. Lisäksi opinnäytetyö sisältää varsin tarkoin seulottua tietoa useille rakennusalan ammattilaisille uudesta aiheesta, hiilijalanjälkilaskennasta. Näiden tulosten perusteella voidaan katsoa opinnäytetyön onnistuneen hyvin sen tavoitteissa.

Tavoitteina oli luoda kokonaisvaltainen katsaus aiheeseen sekä uuden tiedon kerryttäminen mitoitustutkimuksen avulla.

Tutkimus nosti esiin useita jatkotutkimusaiheita. Näistä ensimmäisenä voidaan mainita ajatus tutkimuksesta, jossa tyypillisen asuinkerrostalon rakenteiden sijaan tarkastelussa olisi erityyppinen rakennus. Mikäli rakennus olisi esimerkiksi pilari-palkkirunkoinen hallimainen rakennus, saataisiin epäilemättä rakenteille haastavampia mitoitustilanteita aikaan. Suuremmat rasitukset mitoitustilanteissa voisivat olla mielekkäämpiä betonin lujuuden laajemman vertailun ja rakenteen optimoinnin näkökulmasta.

Yhtenä ajatuksena nousi esiin, että tutkimuksen olisi voinut suorittaa myös niin, että usean kerroksen kuormittaessa rakennetta, olisi kaikille päällekkäisille rakenteille valikoitu rasitukset ryhmän vaativimpien tapausten mukaan. Tämä saattaisi jossain määrin kuvastaa tyypillisempää tapaa tehdä rakennesuunnittelua. Tällä ryhmänä rakenteita mitoittavalla menetelmällä olisi saatu suurempia taivutusmomenteja rakenteisiin. Kuitenkin on huomioitava, että tällöin tulisi tarkastella tilannetta myös niin, että edullista pystykuormaa ei käytetä hyväksi siellä missä sitä ei todellisuudessa ole.

Jatkotutkimuksen kannalta olisi myös mielenkiintoista, jos akustiikan aiheuttamia vaatimuksia massiivisista rakenteista voitaisiin korvata esimerkiksi monikerroksisilla rakenteilla. Voisiko esimerkiksi väliseinä olla nykyistä kapeampi, jos paksun betoniseinän sijaan käytettäisiin ohuempaa betoniseinää ja jotain akustisia ominaisuuksia parantavaa materiaalikerrosta? Olisiko tämä hiilijalanjalan kannalta edullista?

Kuten akustiikan osalta, myös rakenteellinen toiminta rajoittaa suuresti rakenteiden dimensioiden pienentämistä. Ajatuksena herää, että olisiko mahdollista toteuttaa esimerkiksi välipohjien tuenta seinän päälle niin, että seinän ei tuennan vuoksi tarvitsisi olla tietyn levyinen. Voitaisiko tässä menetellä niin, että se olisi hiilijalanjalan suhteen järkevää? Kuten kaikissa esitetyissä muutoksissa, on kyse myös aina kustannusvaikutuksista. Kustannusvaikutusten arviointi itsessään olisi tämänkaltaisten jatkokehityskohteiden kannalta merkittävä asia.

Rakennusten hiilijalanjälkilaskenta sekä kehitys kohti vähähiilisempää rakentamista on käynnissä olevaa toimintaa, jonka syveneminen on nähtävissä vääjäämättä tulevaisuudessa. On tärkeää, että aihetta tutkitaan laaja-alaisesti ja kehitystä edistetään



ennakkoluulottomasti innovoimalla. Yhteisen ilmastomme kannalta merkittävää on edistää vähähiilisyttä kaikessa ihmisen toiminnassa.

## Lähteet

- [1] Colonet Oy. Verkkosivut. Taustaa. [www.openco2.net](http://www.openco2.net). Saatavilla: <https://www.openco2.net/fi/taustaa>. Luettu: 18.4.2021
- [2] Ilmatieteenlaitos. Verkkosivut. Kasvihuonekaasut. [www.ilmatieteenlaitos.fi](http://www.ilmatieteenlaitos.fi). Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-tutkimus>. Luettu: 18.4.2021
- [3] RIL 216-2013. 2013. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki. Rakenteiden ja rakennusten elinkaaren hallinta. ISBN: 978-951-758-556-9
- [4] Huld Oy. Verkkosivut. Tekninen laskenta. [www.huld.fi](http://www.huld.fi). Saatavilla: <https://huld.io/fi/mita-teemme/tekninen-laskenta/>. Luettu: 6.8.2021
- [5] Alestalo Mikko, Ekholm Tommi, Kulmala Markku, Seppälä Jyri, Soimakallio Sampo. 2014. Ilmastopaneeli. Hiilineutraalisuuden tavoittelu – mitä se on missäkin yhteydessä. Saatavilla: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Hiilineutraalisuuden-tavoittelu-mita-se-on-missakin-yhteydessa.pdf>
- [6] RIL ry. Verkkosivut. Roti kokoaa kansallisen osaamisen. [www.ril.fi](http://www.ril.fi). Saatavilla: <https://www.ril.fi/fi/alan-kehitys-2/roti>. Luettu: 18.4.2021
- [7] Ramboll Finland Oy. Verkkosivut. [www.ramboll.com](http://www.ramboll.com). Saatavilla: [https://fi.ramboll.com/ramboll\\_finland\\_oy](https://fi.ramboll.com/ramboll_finland_oy). Luettu 8.4.2021
- [8] Elina Lahdensivu. 2019. Tampereen yliopisto. Kandidaattityö. Hiilijalanjäljen arviointi aikaisessa suunnittelussa ja siihen vaikuttaminen. Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/119014>
- [9] Caroline Moinel, Matti Kuittinen (toimittanut). Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmä. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161761>. Luettu: 2.6.2021
- [10] Ilmasto-opas.fi. Verkkosivut. Sopimukset ohjaavat kansainvälistä ilmastopolitiikkaa. [www.ilmasto-opas.fi](http://www.ilmasto-opas.fi). Saatavilla: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hilinta/-/artikkeli/f65a78bb-dc8e-41a5-b09a-6fa36661880b/sopimukset-ohjaavat-kansainvalista-ilmastopolitiikka.html>. Luettu: 8.6.2021
- [11] Ympäristöministeriö. Verkkosivut. Level(s) – rakennusten resurssitehokkuuden yhteiset EU-mittarit. [www.ym.fi](http://www.ym.fi). Saatavilla: <https://ym.fi/levels-rakennusten-resurssitehokkuuden-mittarit>. Luettu: 9.6.2021

- [12] European Commission. Verkkosivut. Level(s) European framework for sustainable buildings. [www.ec.europa.eu](http://www.ec.europa.eu). Saatavilla: [https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/levels\\_en#ecl-inpage-261](https://ec.europa.eu/environment/topics/circular-economy/levels_en#ecl-inpage-261). Luettu: 9.6.2021
- [13] Aïtchin Pierre-Claude & Mindess Sidney. 2011. Sustainability of concrete. Modern concrete technology 17. Abingdon, Oxon, Yhdistynyt kuningaskunta. ISBN 13: 978-0-415-57196-8. ISBN 13:978-0-203-85663-5 (e-kirja)
- [14] RIL ry. 2019. ROTI 2019. Rakennetun omaisuuden tila 2019. Saatavilla: [https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti\\_2019\\_raportti.pdf](https://www.ril.fi/media/2019/roti/roti_2019_raportti.pdf). Luettu: 11.4.2021
- [15] RIL ry. 2021. ROTI 2021. Rakennetun omaisuuden tila 2021. Saatavilla: [https://www.ril.fi/media/2021/vaikuttaminen/roti2021\\_low.pdf](https://www.ril.fi/media/2021/vaikuttaminen/roti2021_low.pdf). Luettu: 11.4.2021
- [16] Ympäristöministeriö. Verkkosivut. Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. [www.ym.fi](http://www.ym.fi). Saatavilla: <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>. Luettu: 11.4.2021
- [17] YIT Oyj. Verkkosivut. Materiaalit, lämmitys ja laatu – avaimet ekologisempaan rakentamiseen. [www.yit.fi](http://www.yit.fi). Saatavilla: <https://www.yit.fi/asunnot/kestava-asuminen/tavoitteena-ekologinen-rakentaminen>. Luettu: 11.4.2021
- [18] Ympäristöministeriö. Verkkosivut. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. [www.ym.fi](http://www.ym.fi). Saatavilla: <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>. Luettu: 11.4.2021
- [19] Ympäristöministeriö. Verkkosivut. Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä lausuntokierrokselle. [www.ym.fi](http://www.ym.fi). Saatavilla: <https://ym.fi/-/rakennusten-hiilijalanjäljen-arviointimenetelmä-lausuntokierrokselle>. Luettu: 11.4.2021
- [20] Ruuska Antti, Häkkinen Tarja, Vares Sirje, Korhonen Marja-Riitta, Myllymaa Tuuli. Ympäristöministeriö. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Saatavilla: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B1FAF46B2-2649-41ED-B3AA5EA789C9512F%7D/37571>
- [21] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Betoni rakennusmateriaalina. [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Saatavilla: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>. Luettu: 18.4.2021
- [22] Toivonen Janne. YLE. 2017. Verkkoartikkeli. Sementti on isompi ilmastopahis kuin lentokoneet, ja nyt se pitäisi korvata – mutta miten? Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-9901767>. Luettu: 18.4.2021
- [23] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Betonin valmistus. [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Saatavilla: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>. Luettu: 18.4.2021

- [24] Rudus Oy. 2018. Verkkoartikkeli. Vedenalaisissa betonivaluissa omat haasteensa. Saatavilla: <https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2018/12/18/vedenalaisissa-betonivaluissa-omat-haasteensa>. Luettu: 18.4.2021
- [25] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Jälkihoito. [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Saatavilla: <https://betoni.com/koti-betonista/rakennustapavaihtoehdot/paikallavalu/jalkihoito/>. Luettu: 18.4.2021
- [26] EPV Tuulivoima Oy. 2014. Verkkosivut. Miljoona kiloa terästä raudoittaa perustuksia. [www.epvtuulivoima.fi](http://www.epvtuulivoima.fi). Saatavilla: <https://www.epvtuulivoima.fi/torkkolan-blogi/miljoona-kiloa-terasta-raudoittaa-perustuksia/>. Luettu: 9.6.2021
- [27] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Betonityypit ja oikean betonin valinta. [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Saatavilla: <https://betoni.com/koti-betonista/rakennustapavaihtoehdot/paikallavalu/betonityypit-ja-oikean-betonin-valinta/>. Luettu: 18.4.2021
- [28] Suomen Betoniyhdistys ry. 2004. Betonitekniikan oppikirja 2004 by 201. Viides painos. Helsinki. ISBN 952-5075-61-3. ISSN 0358-5255
- [29] Suomen Betoniyhdistys ry. 2019. Betoninormit 2016 by 65. Neljäs painos. Helsinki. ISBN 978-952-68068-4-6. ISSN 0358-5239
- [30] CGC Suomi ry. Green Building Council Finland. 2019. Excel-tiedosto. Rakennuksen hiilijalanjäljen arviointityökalu. Saatavilla: <https://www.ym.fi/download/none/%7BD4EE18D2-E07C-48A2-88A5-D266705A0498%7D/149235>. Luettu: 4.6.2021.
- [31] Suomen ympäristökeskus SYKE. Verkkosivu. Rakentamisen päästötietokanta. [www.co2data.fi](http://www.co2data.fi). Saatavilla: <https://co2data.fi/>. Luettu: 23.6.2021
- [32] Punkki J, Lounamaa A & Junnila S. 2010. Betonirakenteiden merkitys rakennuksen elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä. Betoni, Nro 1. S. 46-49. Saatavilla: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23506/Betonirakenteiden%20merkitys%20rakennuksen%20elinkaaren%20aikaisista%20hiilidioksidip%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf>. Luettu: 4.6.2021
- [33] Colonet Oy. Verkkosivut. CO2-Muunnin. [www.openco2.net](http://www.openco2.net). Saatavilla: <https://www.openco2.net/fi/co2-muunnin>. Luettu: 4.6.2021
- [34] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Kiertotalous toimii. [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Saatavilla: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ekologisuus/kierratys/>. Luettu: 4.6.2021
- [35] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Raudoitteet. [www.betoni.com](http://www.betoni.com). Saatavilla: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/raudoitteet/>. Luettu: 4.6.2021

- [36] Ruokonen Sini. Finnsementti Oy. 2020. Rakennussementit. Suomen Betoniyhdistys ry:n oppimateriaalia. Saatavilla: [http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/ruokonen\\_rakennussementit-betonilaborantti-ja-myllarikurssi-7.1.2020.pdf](http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/ruokonen_rakennussementit-betonilaborantti-ja-myllarikurssi-7.1.2020.pdf). Luettu: 18.4.2021
- [37] Johansson Kim. Suomen betoniyhdistys ry. 2020. Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet. Opetusmateriaalia. Saatavilla: <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/nuoren-ja-kovettuneen-betonin-ominaisuudet-2020.pdf>. Luettu:18.4.2021
- [38] Rudus Oy. 2021. Valmisbetonihinnasto 1.3.2021, Etelä-Suomi. Saatavilla: <https://www.rudus.fi/hinnasto-ja-esitteet/hinnastot/betonihinnasto#>. Luettu: 18.4.2021
- [39] Finnsementti Oy. 2020. Environmental Data Sheet. Verkkajulkaisu. Saatavilla: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019\\_Lappeenranta-Pika.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019_Lappeenranta-Pika.pdf). Luettu: 18.4.2021
- [40] Rudus Oy. Verkkosivut. Vihreä betoni. [www.rudus.fi](http://www.rudus.fi). Saatavilla: <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/vihrea-betoni/5798/vihrea-betoni>. Luettu: 18.4.2021
- [41] Ekholm T, Lindroos T & Savolainen I. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2012. Kuopio. Common metrics: lämpenemiseen vaikuttavien päästöjen yhteismittailmistaminen ilmastopolitiikassa. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2012/T57.pdf>. Luettu: 7.6.2021. ISBN 978-951-38-7887-0. ISSN 2242-122X
- [42] Tilastokeskus. Verkkosivut. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2019. [www.stat.fi](http://www.stat.fi). Saatavilla: [https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki\\_2019\\_2020-05-28\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki_2019_2020-05-28_kat_001_fi.html). Luettu: 7.6.2021
- [43] Korhonen Mikko. 2011. Vastavalo.net. Saatavilla: <https://www.vastavalo.net/displayimage.php?pos=-284095>. Luettu: 3.6.2021
- [44] Ympäristöhallinto. Verkkosivut. Rakennuksen energia- ja ekotehokkuus. [www.ymparisto.fi](http://www.ymparisto.fi). Saatavilla: [https://www.ymparisto.fi/fi-fi/rakentaminen/rakennuksen\\_energia\\_ja\\_ekotehokkuus](https://www.ymparisto.fi/fi-fi/rakentaminen/rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus). Luettu: 3.6.2021
- [45] CGC Suomi ry. Green Building Council Finland. 2020. Vähähiilisuuden arviointimenetelmän pilotoinnin tulosseminaari. Saatavilla: <https://figbc.fi/vahahiilisuuden-arviointimenetelman-pilotoinnin-tulosseminaari/>. Luettu: 3.6.2021
- [46] Kuittinen Matti. Ympäristöministeriö. 2020. Yhteenveto pilottihakkeista. Seminaari-esitys. Saatavilla: <https://elinkaarilaskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2020/06/Pilotoinnin-yhteenveto-2020-06-08.pdf>. Luettu: 3.6.2021

- [47] Betonia Oy. Verkkosivut. Säilyvyys. [www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi). Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys>. Luettu: 17.6.2021
- [48] Timonen-Nissi Hannu. Rudus Oy. 2019. Rasitusluokat – Rudus Betoniakatemia. Saatavilla: <https://www.rudus.fi/Download/27940/Betoniakatemia%20Rasitusluokat.pdf>. Luettu: 10.6.2021
- [49] Betoniteollisuus ry. Verkkosivut. Paloturvallisuus & palovahingot. [www.betoni.fi](http://www.betoni.fi). Saatavilla: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/turvallisuus/paloturvallisuus-palovahingot/>. Luettu: 14.6.2021
- [50] Betonia Oy. Verkkosivut. Palonkesto. [www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi). Saatavilla: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/palonkesto>. Luettu: 14.6.2021
- [51] Jämsä Jani. Pelastusopisto. 2014. Rakenteellinen paloturvallisuus rakennussuunnittelussa. Saatavilla: [https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/kouutus-ja-esitysaineistot/2015/041115\\_rakenteellinen-paloturvallisuus-suunnittelussa.pdf](https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/kouutus-ja-esitysaineistot/2015/041115_rakenteellinen-paloturvallisuus-suunnittelussa.pdf). Luettu: 14.6.2021
- [52] Malaska Mikko. Oulun yliopisto. 2015. Akustinen suunnittelu. Oppimateriaalia. Saatavilla: <https://docplayer.fi/23743525-Akustinen-suunnittelu.html>. Luettu: 16.6.2021
- [53] Finlex. Verkkosivut. 796/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen äänimäisestä. [www.finlex.fi](http://www.finlex.fi). Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170796>. Luettu: 16.6.2021
- [54] Finlex. Verkkosivut. 360/2019. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen äänimäisestä annetun ympäristöministeriön asetuksen 5 ja 6 §:n muuttamisesta. [www.finlex.fi](http://www.finlex.fi). Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190360>. Luettu: 16.6.2021
- [55] Rakennusteollisuus RT. 2009. Asuinrakennusten äänitekniikan täydentävä suunnitteluohje. Saatavilla: [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21797/Suunnitteluohje\\_final\\_osa1.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21797/Suunnitteluohje_final_osa1.pdf). Luettu: 16.6.2021
- [56] Betonia Oy. Verkkosivut. Rakenteen valinta. [www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi). Saatavilla: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/aanieristys/rakenteen-valinta>. Luettu: 16.6.2021
- [57] Parma Oy. 2018. Parman ontelolaatatot -suunnitteluohje 2018. Saatavilla: [https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma\\_ontelolaatatot\\_suunnitteluohje\\_2018-1.pdf](https://parma.fi/userassets/uploads/2018/12/parma_ontelolaatatot_suunnitteluohje_2018-1.pdf). Luettu: 18.6.2021

- [58] Betonia Oy. Verkkosivut. Runkoliitosdetaljit 2020. Detalji tunnuksella DO501. [www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi). Saatavilla: [https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24227/Runkoliitosdetaljit\\_2020.pdf](https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/24227/Runkoliitosdetaljit_2020.pdf). Luettu: 18.6.2021
- [59] Anttila Vesa. Rakennustieto Oy. 2003. Teoksessa: Koskenvesa Anssi (toim.). Rakentajainkalenteri. Betonin valinta. Helsinki. Sivut 407-416. Saatavilla: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK090403.pdf>. Luettu: 10.6.2021
- [60] Ympäristöministeriö. 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki. Saatavilla: <https://www.ym.fi/download/no-name/%7BC352472F-E7C4-4653-BF44-1AB47FB50CB0%7D/137127>. Luettu: 26.7.2021
- [61] Suomen Betoniyhdistys ry. 2016. Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016 by 68. Helsinki. ISBN 978-952-68619-1-3. ISSN 0358-5239
- [62] Nelirauditus Oy. Verkkosivut. Harjaterästen painot. [www.nelirauditus.fi](http://www.nelirauditus.fi). Saatavilla: <http://www.nelirauditus.fi/index.php?id=49&kieli=1>. Luettu: 28.7.2021