

Aalto-yliopisto  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Building Technology

## **Diplomityö**

Vähähiilisen betonin ominaisuuksien huomioiminen uudisrakentamisen rakennesuunnitteluvaiheessa

(05.05.2023)

**Jan-Markus Rajala**

---

**Tekijä** Jan-Markus Rajala

---

**Työn nimi** Vähähiilisen betonin ominaisuuksien huomioiminen uudisrakentamisen rakennesuunnitteluvaiheessa

---

**Koulutusohjelma** Building Technology

---

**Pääaine** Structural Engineering**Pääaineen koodi** ENG27

---

**Työn valvoja** Professori Jouni Punkki

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Tapio Aho

---

**Päivämäärä** 05.05.2023**Sivumäärä** 78 s.**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Diplomityön tavoitteena oli tutkia vähähiilisen betonin ominaisuuksien huomioimista uudisrakentamisessa rakennesuunnitteluvaiheessa. Tärkeitä tekijöitä suunnittelijalla on vähähiilisen betonin saatavilla olevat rasisluokat, lujuuden kehitys ja lujuusluokat. Työn lopputuloksena luotiin taulukot, joista suunnittelija voi helposti katsoa missä vähähiilisyyssluokassa haluttua betonilaatua on tällä hetkellä saatavilla. Työssä käsitellään myös kattavan kuvan saamiseksi sitä, mistä betonin hiilidioksidipäästöt muodostuvat ja miten niitä voidaan vähentää. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja asiantuntijoiden haastatteluna.

Betonin hiilidioksidipäästöjä voidaan alentaa monella eri tavalla. Sementin valmistuksessa vapautuvasta hiilidioksidista johtuu suurin osa betonin hiilidioksidipäästöistä, minkä vuoksi tällä hetkellä tehokkain tapa hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen on sementin korvaaminen seosaineilla. Tulevaisuudessa on mahdollista hiilidioksidipäästöton sementti, joka toimii normaalin sementin tapaan. Tällä hetkellä vähähiilinen betoni valmistetaan suurilta osin masuunikuonaa käyttämällä sementin sijasta, koska sitä voidaan käyttää suurempia määriä seosaineena betoninormien mukaan. Masuunikuonan vaikutuksesta betonin ominaisuudet hieman muuttuvat. Masuunikuonan käytön haasteet tulevat esiin hitaampana lujuuden kehityksenä, talvibetonoinnissa pienempänä hydratoitumislämpönä ja heikompana pakkassuolakestävyytenä verrattuna normaaliin sementtiin. Tulevaisuudessa seosaineiden, kuten masuunikuonan, saatavuus ei tule riittämään kasvavaan kysyntään, minkä vuoksi muiden päästövähennyskeinojen, kuten hiilidioksidipäästöttömän sementin, merkitys korostuu.

Suurimmat hiilidioksidipäästövähennykset vähähiilisellä betonilla saadaan aikaan, kun rakennuskohteen suuret betonivolyymit toteutetaan vähähiilisyyssluokituksen mukaisella betonilaadulla. Hitaamman lujuudenkehityksen ja hydratoitumislämmön vuoksi talvirakentamisessa ei saada niin suuria hiilidioksidivähennyksiä kuin kesärakentamisessa. Suurivolyyminen rakenne on esimerkiksi talo- ja toimistorakennuksessa rakennuksen runko. Vähähiilistä betonia on helppoa käyttää sisä-rakenteissa ja perustuksissa, joiden betonimenekki on suurta talorakentamisessa. Sisä-rakenteiden ja perustusten rasisluokat ovat pääosin Xo, XC1 ja XC2. Rasisluokan betoneita on saatavilla jopa GWP.40 vähähiilisyyssluokassa. Vähähiilisen betonin käyttö on haastavinta pakkassuolarasituksen alaisissa rakenteissa, joissa vähähiilistä betonia on saatavilla helpohkosti ainoastaan GWP.70 vähähiilisyyssluokkaan asti masuunikuonan heikentävän vaikutuksen vuoksi. Erikoisrakenteissa, joissa betonimäärät ovat pieniä, on viisasta hyödyntää normaalia rakennebetonia ja suurissa volyymikoh-teissa vähähiilistä betonia.

---

**Avainsanat** Vähähiilinen betoni, uudisrakentaminen, rakennesuunnittelu, seosaineet, betonin hiilidioksidipäästöt

---

---

**Author** Jan-Markus Rajala

---

**Title of thesis** Taking into account the characteristics of low-carbon concrete during the structural design phase in new construction

---

**Degree programme** Building Technology

---

**Major** Structural Engineering**Code of major** ENG27

---

**Supervisor** Professor Jouni Punkki

---

**Thesis advisor(s)** MSc Tapio Aho

---

**Date** 05.05.2023**Number of pages** 78 p.**Language** Finnish

---

## Abstract

The main goal of the thesis was to investigate how to take into account the characteristics of low-carbon concrete during the structural design phase in new construction. Important factors for the designer are the exposure classes, strength development and strength classes of available low-carbon concretes. As a result of the thesis tables were created from which the designer can easily see in which low-carbon class the desired concrete is currently available. In order to get a comprehensive picture, the thesis also includes where concrete's carbon dioxide emissions are formed and how they can be reduced. The thesis was carried out as a literature review and an interview with experts.

Concrete's carbon dioxide emissions can be reduced in many different ways. Most of concrete's carbon dioxide emissions are caused by the carbon dioxide released during cement production which is why the most effective way to reduce carbon dioxide emissions at the moment is to replace cement with supplementary cementitious materials. In the future carbon dioxide-free cement that functions like normal cement will be possible. Low-carbon concrete is currently largely produced using blast furnace slag instead of cement because it can be used in the largest quantities as a supplementary cementitious material according to concrete standards. Due to the influence of blast furnace slag the properties of concrete change slightly. The challenges of using blast furnace slag come out in the form of slower strength development, lower heat of hydration, and weaker resistance to frost-salt stress compared to normal cement. In the future, the availability of supplementary cementitious materials such as blast furnace slag will not be sufficient for the growing demand which is why the importance of other means of reducing emissions will be emphasized such as carbon dioxide-free cement.

The largest carbon dioxide emission reductions with low-carbon concrete are achieved when in the large concrete volumes low-carbon concrete is used. In winter construction carbon dioxide reductions are not as large as in summer construction due to slower strength development and heat of hydration. A large volume structure is for example the frame of the building. Low-carbon concrete is easy to use in interior structures and foundations which has large volume of concrete. Their exposure classes are mainly X0, XC1 and XC2. In these exposure classes concretes are available up to GWP.40. The use of low-carbon concrete is most challenging in structures under frost-salt stress, where low-carbon concrete is easily available only up to the GWP.70 due to the weakening effect of the blast furnace slag. In special structures where the amount of concrete is small it is wise to use normal structural concrete and low-carbon concrete in large volume structures.

---

**Keywords** Low-carbon concrete, new construction, structural design, supplementary cementitious materials, carbon dioxide emissions of concrete

---

# Sisällysluettelo

|  |    |
|--|----|
| 1 Johdanto.....  | 1  |
| 1.1 Tutkimuksen tausta.....                                  | 1  |
| 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus .....                          | 2  |
| 1.3 Tutkimusmenetelmät ja rakenne.....                       | 2  |
| 2 Betonin hiilidioksidipäästöt.....                          | 3  |
| 2.1 Yleistä.....   | 3  |
| 2.2 Sementin hiilidioksidipäästöt .....                      | 4  |
| 2.3 Karbonatisoituminen .....                                | 6  |
| 2.4 Hiilidioksidipäästöjen arvioiminen.....                  | 9  |
| 2.5 Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen .....                | 10 |
| 3 Vähähiilinen betoni .....                                  | 13 |
| 3.1 Yleistä.....   | 13 |
| 3.2 Seosaineet .....   | 14 |
| 3.2.1 Masuunikuona .....                                     | 15 |
| 3.2.2 Lentotuhka .....                                       | 17 |
| 3.2.3 Silika.....  | 20 |
| 3.3 Fillerikiviaines .....                                   | 22 |
| 3.4 Kalsinoidut savet .....                                  | 24 |
| 3.5 Vaihtoehtoiset sideaineet.....                           | 25 |
| 3.6 Markkinoilla olevat vähähiiliset betonit.....            | 27 |
| 4 Vähähiilisen betonin ominaisuudet .....                    | 30 |
| 4.1 Yleistä.....   | 30 |
| 4.2 Rasitusluokat ja säilyvyysominaisuudet.....              | 30 |
| 4.3 Lujuskehitys .....                                       | 34 |
| 4.4 Kuivuminen .....   | 39 |
| 5 Vähähiilisen betonin huomioiminen rakenneosissa .....      | 44 |
| 5.1 Yleistä.....   | 44 |
| 5.2 BY-vähähiilisyysluokitus .....                           | 45 |
| 5.3 Hiilidioksidin vähentämispotentiaali rakentamisessa..... | 47 |
| 5.4 Sisärakenteet.....                                       | 52 |
| 5.5 Perustusrakenteet.....                                   | 55 |
| 5.6 Pakkasrasituksen alaiset rakenteet.....                  | 59 |
| 5.7 Pakkassuolarasituksen alaiset rakenteet .....            | 62 |
| 6 Johtopäätökset .....                                       | 67 |

|  |    |
|--|----|
| 7 Yhteenveto.....                                      | 69 |
| 8 Lähteet .....  | 71 |
| Liite 1: Taulukko vähähiilisen betonin valintaan ..... | 77 |

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Suomen kasvihuonepäästöistä noin kolmanneksen tuottavat rakennukset ja rakentaminen (Ympäristöministeriö). Noin kaksitoista prosenttia rakennetun ympäristön elinkaaripäästöistä syntyy rakennusmateriaaleista, joista suurin osa betonin käytöstä (Heino & ym., 2020). Ilmastotavoitteisiin päästäkseen on myös rakennussektorin päästöjen pienennettävä. Aikaisemmin on keskitytty pääosin rakennusten käytönaikaisiin päästöihin, mutta rakennusten energiatehokkuuden parantuessa rakennusmateriaalien osuus elinkaaren aikaisista kasvihuonepäästöistä kasvaa. Suurin osa rakennusmateriaalien kasvihuonepäästöistä syntyy valmistusvaiheessa. (Ympäristöministeriö)

Ympäristöministeriön tavoitteena on, että 2020-luvun puoliväliin mennessä on lainsäädännöllistä ohjausta rakennusmateriaalien valmistukseen, rakentamiseen sekä rakennusjätteen vähentämiseen ja kierrätykseen (Ympäristöministeriö). Uusi tuleva rakennuslaki tulee sisältämään määräyksiä päästövähennysten toteutumiseksi (Tompuri, 2022). Uudessa rakentamislaisissa asetetaan rakennuksille lupavaiheessa hiilikatto. Hiilikaton ensimmäiset raja-arvot tulevat voimaan viimeistään 2025, jonka jälkeen niitä tullaan kiristämään määrävälein. (Merikukka & ym., 2022) Yhteisenä tavoitteena betonialalla on kehittää betonin valmistusta niin, ettei sen käyttöä jouduta rajoittamaan hankekohtaisesti päästövähennystavoitteen täyttymättömyyden vuoksi (Tompuri, 2022).

Suomessa ja maailmalla betoni on määrältään yleisin rakennusmateriaali. Erityisesti betonia hyödynnetään runkorakenteissa. Betonin ja sementin suurien päästöjen taustalla on niiden massiiviset käyttömäärät. Niiden ominaisnaispäästöarvot eivät ole suuret muihin materiaaleihin verrattuna. Betonin päästöistä seitsemänkymmentä prosenttia syntyy raaka-aineista, joista suurin päästöjen aiheuttaja on sementti. (Pitkälä, 2020) Uudisrakentamisessa betonivolyymit ovat suuria, minkä ansiosta vähähiilisellä betonilla voidaan saada suuret hiilidioksidipäästövähennykset. Rakenteista riippuu, minkälaista betonia voidaan käyttää.

Betonin suurin kasvihuonekaasujen lähde on sementin valmistusprosessi. Sementin valmistus vaatii suuren määrän energiaa ja kalkkikiven kalsinoinnissa vapautuu hiilidioksidia. (Sementti ja kasvihuonepäästöt) Sementtiteollisuuden päästöt Suomessa ovat noin 1,9 prosenttia päästökauppaan kuuluvista päästöistä (Heikkilä, 2022). Betonin päästöihin sementin lisäksi vaikuttavat myös muut raaka-aineet, kuljetus ja betonin valmistusprosessi, mutta nämä ovat kokonaispäästöistä normaalissa rakennebetonissa vain 20 prosentin luokkaa (Pitkälä, 2020). Sementin päästöjä voidaan vähentää käyttämällä seosaineita, kuten masuunikuonaa ja lentotuhkaa, jotka syntyvät teollisuuden sivutuotteina. (Sementti ja kasvihuonepäästöt) Vähähiiliset betonit suurilta osin tällä hetkellä perustuvat seosaineiden käyttöön, joihin tässä työssä keskitytään. Seosaineet muuttavat betonin ominaisuuksia, ja tästä tulee olla tietoinen suunnittelussa, jotta voidaan valita oikea materiaali oikeaan tilanteeseen.

Rakennesuunnittelijat ovat vastuussa rakennejärjestelmien ja materiaalien valinnasta, jotta rakennus kestää kuormituksen ja täyttää turvallisuus- sekä käytettävyyksivaatimukset (Alimonadi, 2015). Ajan saatossa muovautunut suunnitteluosaaminen mahdollistaa sen,

että oikeaa materiaalia käytetään oikeassa paikassa materiaalin ominaisuuksia hyödyntäen (Kesti, 2019). Suunnittelijat eivät kuitenkaan välttämättä tunne uusien vähähiilisten materiaalien ominaisuuksia, minkä seurauksena voi syntyä lyhyen eliniän omaavia rakennuksia. Valinnat vaikuttavat suoraan kestävän kehityksen näkökohtiin, kuten kasvihuonepäästöihin. Suunnittelijan tulisi valinnoillaan muun muassa minimoida materiaalien käyttö ja kasvihuonepäästöt. (Alimonadi, 2015)

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän diplomityön ensisijaisena tavoitteena on tarkastella, mitkä ovat ne vähähiilisen betonin ominaisuudet, jotka vaikuttavat suunnittelijan materiaalivalintaan ja missä rakenteissa vähähiilistä betonia on viisasta käyttää. Tarpeellisten taustatietojen selvittämiseksi työssä myöskin tutkitaan yleisesti mistä betonin hiilidioksidipäästöt syntyvät ja kuinka niitä voidaan vähentää käyttämällä seosaineita ja muita menetelmiä. Työssä keskitytään uudisrakentamiseen ja seosaineilla valmistettuun betoniin. Työssä ei huomioida mahdollisia korjausrakentamisen erityispiirteitä. Työn tulosten pohjalta on tarkoituksena luoda taulukot, joista suunnittelija voi helposti tarkistaa voiko tarvittavan rakenteen betonina käyttää vähähiilistä betonia muun muassa rasisluokan ja saatavuuden perusteella.

Työn tavoitteet voidaan tiivistää seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- 1) Mistä betonin hiilidioksidipäästöt muodostuvat ja kuinka niitä voidaan vähentää?
- 2) Minkälaisia vähähiilisiä betoneita on saatavilla?
- 3) Mitkä ovat seosaineilla valmistetun vähähiilisen betonin ominaisuudet?
- 4) Missä rakenneosissa vähähiilistä betonia voidaan helposti käyttää?

## 1.3 Tutkimusmenetelmät ja rakenne

Tämän diplomityön tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja asiantuntijoiden haastatteluina. Kirjallisuuskatsauksen avulla pyritään vastaamaan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Katsaus aloitetaan tutkimalla betonin hiilidioksidipäästöjen muodostumista ja päästöjen vähentämistä. Tällä hetkellä päästöjen vähentyminen liittyy suurilta osin portlandsementin korvaamiseen eli tämänhetkisten vähäpäästöisten betonilaatujen reseptiikkaan.

Toiseen ja kolmenteen tutkimuskysymykseen pyritään vastaamaan kirjallisuuskatsauksella ja asiantuntijoiden haastatteluilla. Haastateltavat ovat valmisbetonin valmistajia, joiden avulla saadaan tietää vähähiilisten betonien tämänhetkinen saatavuus ja muun muassa rasisluokat, joissa betoneita voidaan käyttää. Haastatteluiden tukena käytetään kirjallisuuskatsausta, jotta saadaan kattavampi kokonaiskuva vähähiilisen betonin ominaisuuksista ja kehitystyöstä.

Lopulta työssä vastataan viimeiseen tutkimuskysymykseen kirjallisuuskatsauksen ja haastatteluissa saatujen tietojen perusteella. Tarkoituksena on luoda ohje siitä, missä betonirakenteissa voidaan helposti vähentää hiilidioksidipäästöjä vähähiilisiä betonilaatuja hyödyntäen muun muassa rasisluokat huomioon ottaen. Lisäksi johtopäätöksissä pohditaan, millaisia rajoitteita ja epävarmuustekijöitä kirjallisuuskatsauksessa kohdattiin sekä millaisia jatkotutkimustarpeita niiden perusteella havaittiin.

## 2 Betonin hiilidioksidipäästöt

### 2.1 Yleistä

Betoni on keinotekoinen kivi, jonka runkoaineet sitoo yhteen kovettunut sementtiliima eli sementtikivi. Betonin raaka-aineita ovat runkoaines, sementti ja vesi sekä mahdolliset lisä- ja seosaineet, jotka muokkaavat tuoreen betonin tai kovettuneen betonin ominaisuuksia. Runkoaineena eli kiviaineena voidaan käyttää luonnon kiviainesta, kuten tavanomaista hiekkaa, tai keinotekoisia kiviaineita, kuten lentotuhkaa. Runkoaineuksen tilavuusosuus betonista on 65...80 prosenttia, minkä vuoksi sillä on suuri vaikutus betonin ominaisuuksiin. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 31–32) Vetenä Suomessa voidaan käyttää normaalia puhdasta hanavettä (Suomen betoniyhdistys, 2019, s. 29).

Sementti on hienoksi jauhettu epäorgaaninen hydraulinen sideaine, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa pastan, joka sitoutuu ja kovettuu hydraatioreaktioiden kautta (Suomen betoniyhdistys, 2019, s. 28). Sementillä on ratkaiseva rooli betonin ominaisuuksiin, kuten tuoreen betonin työstävyyteen ja kovettuneen betonin säilyvyyteen. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 39)

Mineraalisia seosaineita, joita ovat masuunikuona, lentotuhka, silika ja ferrokromikuona, voidaan käyttää betonissa side- ja runkoaineena. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59). Seosaineilla voidaan parantaa betonin ominaisuuksia tai mahdollisesti vähentää sementistä johtuvaa hiilidioksidikuormaa (Suomen betoniyhdistys, 2019, s. 29).

Betonin ominaisuuksia voidaan muokata suhteutuksella eli osa-aineiden valinnalla ja seossuhteilla. Ominaisuuksia voidaan myöskin muokata lisäaineilla, joita lisätään pieniä määriä betonimassaan. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 63). Alla olevasta taulukosta 1 nähdään betonin tyypillinen koostumus.

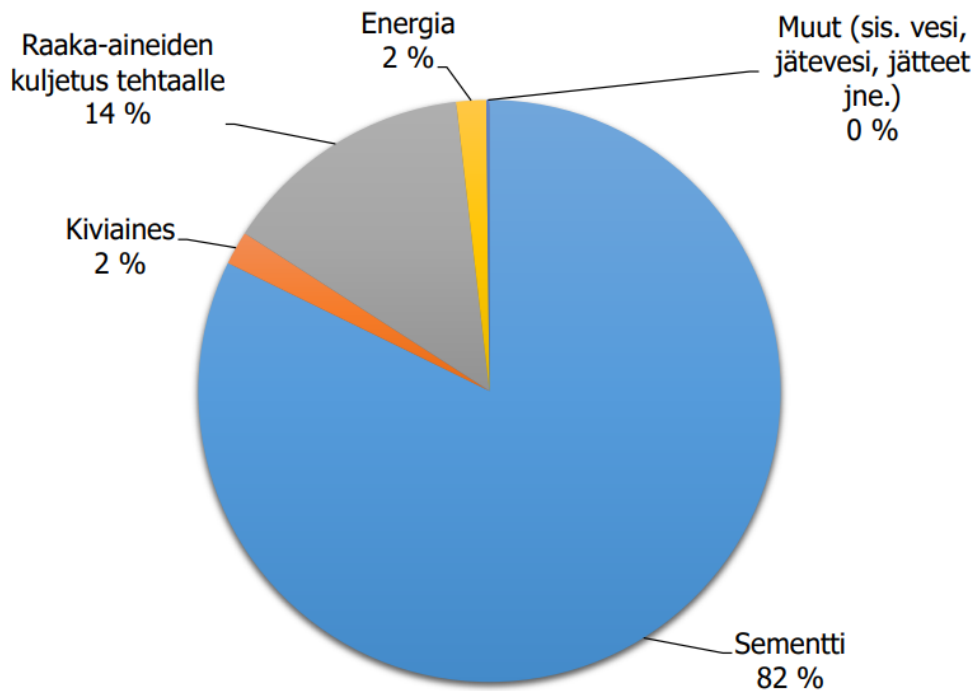
Taulukko 1 Esimerkki betonin tyypillisestä koostumuksesta

|             |             |                                 |
|-------------|-------------|---------------------------------|
| Sementtiä   | 300...450   | kg/m <sup>3</sup>               |
| Vettä       | 160...200   | dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| Kiviainesta | 1600...1950 | kg/m <sup>3</sup>               |
| Ilmaa       | 2...6       | %                               |

Betonirakenteen hiilidioksidipäästöihin vaikuttavat betonin raaka-aineiden valmistuksen päästöt, raaka-aineiden ja betoniseoksen kuljetukset, betoniseoksen valmistuksen päästöt, betonin valamisen aikaisen käytetyn energian päästöt sekä mahdollisesti käytetystä betoniteräksestä johtuvat päästöt. Kuvasta 1 nähdään esimerkki kuinka normaalin rakennebetonin C30/37 hiilijalanjälki muodostuu. Hiilijalanjäljessä on huomioitu raaka-aineiden hankinta ja kuljetukseen sekä betoniseoksen valmistukseen liittyvät päästöt. Kuvasta nähdään eri päästöosatekijöiden suuruus verrattuna kokonaispäästöihin. Normaalin rakennebetonin suurimmat hiilidioksidipäästöt johtuvat sementin valmistuksessa vapautuvista hiilidioksidipäästöistä. Betonin kokonaispäästöt per massa ovat pienemmät kuin muilla rakennusmateriaaleilla, kuten teräksellä ja lasilla, mutta portlandsementin päästöt per



massa ovat samaa luokkaa kuin muilla rakennusmateriaaleilla (Wasim, ym. 2022). Seuraavaksi suurimmat päästöt johtuvat raaka-aineiden kuljetuksesta, jonka osuus on kuitenkin yli 5 kertaa pienempi kuin sementin. Muiden tekijöiden osuus verrattuna sementtiin ovat mitättömät normaalissa rakennebetonissa. Suurin hyöty vähähiilisessä betonissa liittyykin sen vuoksi sementin korvaamiseen ja sementin päästöjen vähentämiseen.



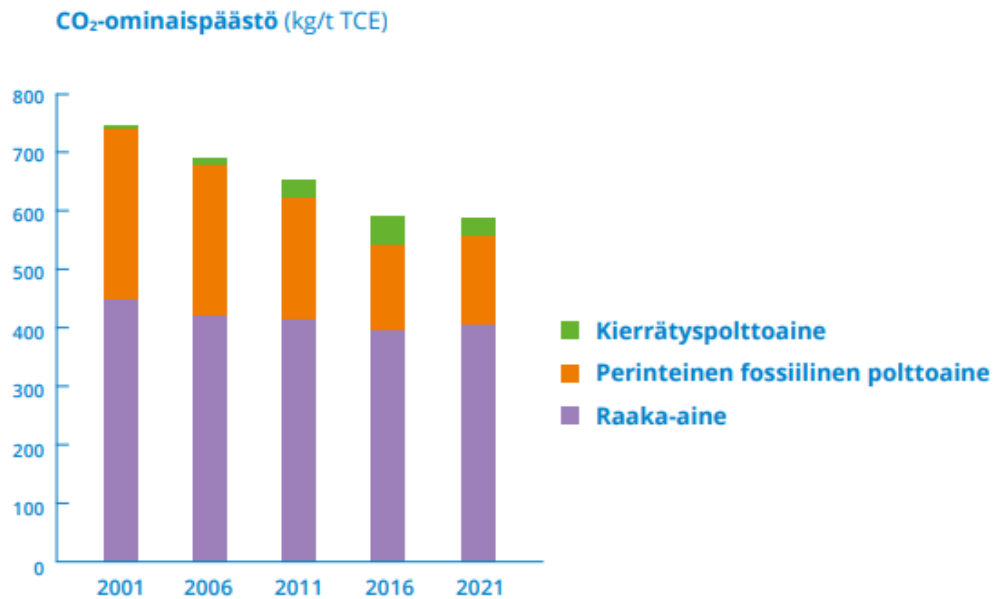
Kuva 1 Normaalin rakennebetonin C30/37 hiilijalanjäljen muodostuminen (Valmisbetoni)

## 2.2 Sementin hiilidioksidipäästöt

Sementtiteollisuuden vuotuiset hiilidioksidipäästöt Suomessa ovat noin 0,9 miljoonaa tonnia. Suomen tuottamat hiilidioksidipäästöt ovat vuosittain noin 50 miljoonaa tonnia. Sementin valmistus tuotti 1,6 prosenttia Suomen kokonaiskasvihuonepäästöistä vuonna 2018. (Sementti ja kasvihuonepäästöt) Maailmassa sementin valmistus tuottaa noin 7 prosenttia maailman hiilidioksidipäästöistä (Liikanen, 2022).

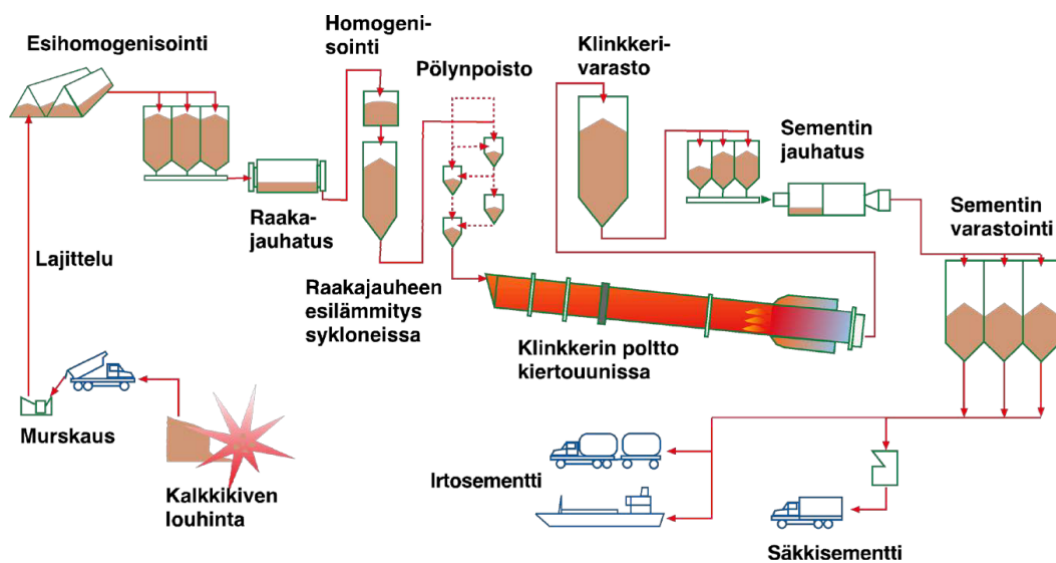
2005 käynnistyneessä päästökaupassa sementtiteollisuus on ollut alusta lähtien mukana. Suomessa sementin valmistuksesta johtuvia hiilidioksidipäästöjä on pystytty päästökaupan alkamisesta lähtien vähentämään 24 prosenttia verrattuna vuoden 1990 päästötasoon. Päästöjä on pystytty laskemaan muun muassa valmistusprosessin tarkemmalla hallinnalla ja kierrätyspolttoaineiden käytöllä. Kierrätyspolttoaineina on käytetty muun muassa autonrengasmursketta, lihaluujauhoa ja pakkausjätettä. Suomalaisen sementin valmistuksessa 45 prosenttia polttoaineesta oli kierrätys- ja biopolttoainetta vuonna 2021. (Sementti ja kasvihuonepäästöt) Kuvassa 2 nähdään sementin valmistukseen liittyvien päästöjen ja

kautuminen. Kalkkikivestä vapautuvan hiilidioksidin määrä ei ole laskenut, sillä kemiallisessa reaktiossa vapautuvan hiilidioksidin syntymistä ei voida estää, mutta energiasta johtuvat hiilidioksidipäästöt ovat laskeneet.



Kuva 2 Sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöt Suomessa (Ympäristöraportti 2022)

Sementin valmistuksen päävaiheet ovat kalkkikiven louhinta, murskaus ja raakajauhatus sekä portlandklinkkerin poltto ja sementin jauhatus (Sementin valmistus). Sementin eri vaiheet voidaan nähdä kuvasta 3. Sementin valmistuksessa pääraaka-aineena on kalkkikivi. Kalkkikivi louhitaan, murskataan ja lajitellaan ennen raakajauhatusa. Sementin valmistamiseen vaaditaan kalkkikivestä saatavan kalsiumkarbonaatin (CaCO<sub>3</sub>) lisäksi piioksidia (SiO<sub>2</sub>), rautaoksidia (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ja alumiinioksidia (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), joita saadaan kalkkikivilouhoksen sivukivistä ja muun teollisuuden sivutuotteista. Raaka-aineiden syötösuhteet määritellään kiviainesten kemiallisen koostumuksen perusteella ja aineet syötetään raakajauhemyllyyn, jossa ne jauhetaan hienoksi raakajauheeksi. (Sementin valmistus)



Kuva 3 Sementin valmistuksen eri vaiheet (Tikkanen, 2021)

Raakajauhe menee esilämmitysjärjestelmän kautta kiertouuniin, jossa tapahtuu sementtiklinkkerin poltto (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 39). Kiertouunissa raakajauhe poltetaan korkeassa lämpötilassa, jolloin kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi ( $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ ). Reaktiota kutsutaan kalsinoinniksi. Kalsinointireaktiossa vapautuva hiilidioksidi vastaa noin 70 prosentista sementin valmistuksesta aiheutuvasta hiilidioksidipäästöistä. Hiilidioksidia vapautuu noin 500 kilogrammaa sementtitonniä kohden. (Hiilen sidonta) Sementinvalmistuksen loput hiilidioksidipäästöt ovat peräisin polttoaineista (Sementti ja kasviuonepäästöt).

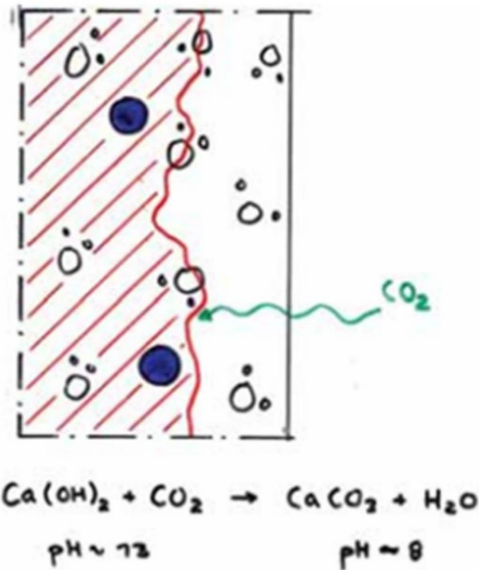
Kalkki-, pii-, alumiini-, ja rautayhdisteet muuttuvat kalsiumyhdisteiksi polton aikana ja sintraantuvat sementtiklinkkeriksi lämpötilan noustessa 1400 celsiusasteeseen. Kiertouunin lopussa sementtiklinkkeri jäädytetään ilmajäädyttimissä nopeasti noin 200 celsiusasteeseen. (Sementin valmistus) Sementtiklinkkerin päämineraalit ovat aliitti ( $C_3S$ ), beliitti ( $C_2S$ ), aluminaatti ( $C_3A$ ) ja ferriitti ( $C_4AF$ ). Aliitin ja beliitin ominaisuutena on suuri loppulujuus. Aliitin ominaisuus on nopea lujuuskehitys ja beliitin hidas lujuuskehitys. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 40)

Sementin ominaisuuksia voidaan säädellä muun muassa sementtiklinkkerin koostumuksella, käytettävien seosaineiden suhteilla ja jauhatushienoudella (Sementin valmistus). Seosaineiden avulla saadaan sementin tuotannon aiheuttamaa ympäristökuormaa pienennettyä. Seosaineiden käytöllä on myöskin useita suotuisia vaikutuksia sementin ominaisuuksiin. (Seosaineet sementissä)

Finnsementti on tuonut markkinoilla viime vuosina uusia vähäpäästöisempiä sementtejä, joissa käytetään seosaineina masuunikuonaa ja kalkkikivijauhetta. Seosaineiden ansioista hiilidioksidipäästöt ovat selvästi alhaisemmat kuin perinteisellä rakennussementillä. (Sementti ja kasviuonepäästöt)

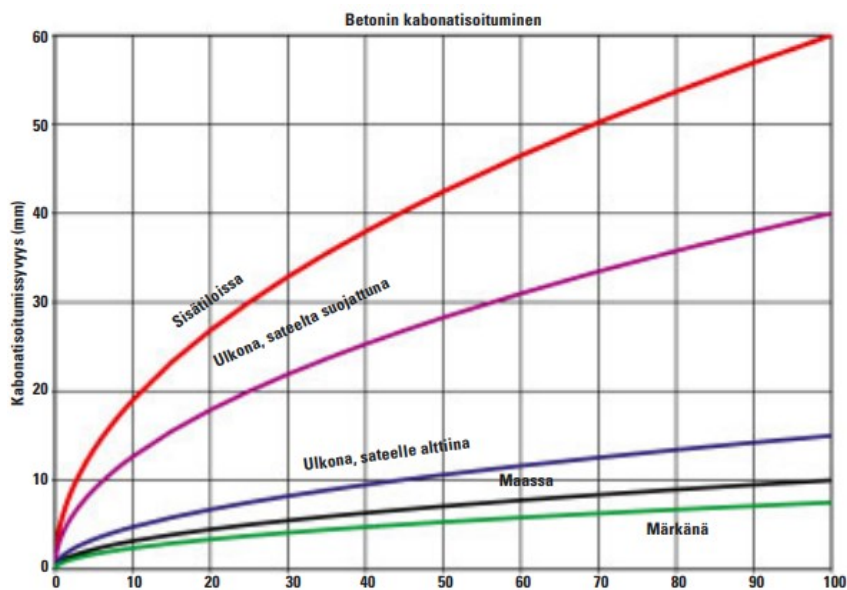
## 2.3 Karbonatisoituminen

Sementin valmistusprosessissa kalkkikiven kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi korkeassa lämpötilassa. Reaktioita kutsutaan kalsinoinniksi. Reaktio ei ole kuitenkaan termodynaamisesti stabiili, vaan hydratoitunut sementti yrittää reagoida ilmakehän hiilidioksidin kanssa kalsinoinnin käänteisessä reaktiossa, jota kutsutaan karbonatisoitumiseksi. Karbonatisoitumisessa sammutettu kalkki ( $Ca(OH)_2$ ) reagoi hiilidioksidin ( $CO_2$ ) kanssa ja sitoo hiilen pysyvästi takaisin kalsiumkarbonaattiin ( $CaCO_3$ ). Reaktion yksinkertaistettu reaktioyhtälö on  $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ . (Hiilen sidonta) Yksinkertaistetun karbonatisoitumisen periaatteen voidaan nähdä kuvassa 4.



Kuva 4 Yksinkertaistettu betonin karbonatisoituminen raudoitetussa betonirakenteessa (Suvanen, 2022)

Karbonatisoituminen betonissa alkaa sen pinnalta ja etenee suhteellisen tasaisena rintamana sitä hitaammin, mitä tiiviimpää betoni on. Karbonatisoitumisen eteneminen hidastuu mitä syvemällä betonissa reaktio tapahtuu. Sen etenemisnopeuden määrää ilman hiilidioksidin tunkeutumisen nopeus betoniin. Karbonatisoitumisen nopeutta voidaan arvioida kaavalla  $X = k\sqrt{T}$ , jossa k on karbonatisoitumiskvakio, jonka hajonta on suuri. Karbonatisoituminen on nopeampaa sateelta suojatuissa rakenteissa, sillä hiilidioksidi tarvitsee betonin ilmahuokosia päästäkseen betoniin. Karbonatisoituminen kuitenkin tarvitsee vähäistä kosteutta tapahtuakseen. Betonin C35/45 karbonatisoitumiskvakio sateelle alttiina olevissa rakenteissa on noin 2,7 ja C30/37 betonin noin 3,8. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 98) Kuvassa 5 nähdään karbonatisoitumissyvyyden riippuvuus ajasta vuosina normaalissa C30/37 rakennebetonissa eri olosuhteissa.



Kuva 5 Normaalin rakennebetonin karbonatisoituminen eri olosuhteissa (Virtanen, 2010)

Karbonatisoitumisnopeus riippuu betonin tiiviyn lisäksi sideaineen kalkkipitoisuudesta. Sementtimäärän kasvaessa kasvaa myöskin betonissa olevien kalsiumyhdisteiden määrä, mitkä voivat sitoa ilman hiilidioksidia karbonatisoitumisreaktiossa. Masuunikuonan kalkkipitoisuus on huomattavasti pienempi kuin portlandsementin. Masuunikuonan kovettuessa ei myöskään muodostu vapaata kalsiumhydroksidia, joka voisi reagoida hiilidioksidin kanssa. Lentotuhka ja silika ovat pozzolaanisia sideaineita, jotka reagoivat sementin kovettumisreaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 98–99) Vähähiilisessä betonissa käytetään juurikin edellä mainittuja sementin korvaavia sideaineita niiden huomattavasti pienemmän hiilijalanjäljen vuoksi. Tällöin on mahdollista, ettei vähähiilinen betoni sido niin suurta määrää ilman hiilidioksidia betonirakenteissa.

Karbonatisoitumista on pidetty haitallisena ilmiönä, koska karbonatisoitumisen aiheuttaman pH:n neutraloitumisen päästyä etenemään betoniteräksiin saakka terästen ruostuminen käynnistyy, jos kosteutta on tarpeeksi. Betoniteräsrakenteissa käytetään niin sanottua suojabetonikerrosta ruostumisen ehkäisemiseksi, eli betoniterästen tulee aina sijaita riittävän syvällä betonissa. (Concretesolution) Esimerkiksi rasitusluokan XC1 suojabetonikerroksen vähimmäisarvo 50 vuoden käyttöiällä on 10 mm (Suomen betoniyhdistys, 2019, s. 22). Karbonatisoitumista pyritään hidastamaan valmistamalla betoni niin tiiviiksi, ettei hiilidioksidi pääse imeytymään betoniin nopeasti. (Concretesolution)

Määräysten mukaan valmistetussa betonirakenteen pintakerroksessa on aina karbonatisoitumiselle altista, hiilidioksidia sitovaa materiaalia ilman, että rakenteen käyttöikä vaarantuu raudotteiden ruostumisen vuoksi (Concretesolution). Karbonatisoitumisessa muodostunut karbonatisoitunut kerros suojaa betonin raudotteita hidastaen karbonatisoitumisnopeutta (Hiilen sidonta). Jos betonirakenteessa käytetään ruostumatonta raudoitusta, kuten betonijulkisivuissa, ei syvällekkään edennyt karbonatisoituminen aiheuta ruostumisongelmaa. Karbonatisoitumista voidaan vapaasti hyödyntää tämän tapaisissa rakenteissa ilman vaaraa ongelmista. Sisätilojen pienen kosteuden ansioista betoni voi karbonatisoitua ilman ongelmia sisätiloissa, sillä kosteus ei riitä käynnistämään terästen ruostumista. (Concretesolution)

Kalsinointireaktioissa kalsiumkarbonaatista vapautuvasta hiilidioksidista sementti pystyy sitomaan takaisin noin 85 prosenttia. Sitoutumisessa hiili varastoituu karbonatisoitumisen kautta pysyvästi betonirakenteeseen. Betonikerrostalo sitoo noin 15 prosenttia siihen käytetyn betonin kalsinoinnin päästöistä käyttöiän aikana. Rakennuksen elinkaaren jälkeen, kun rakennus puretaan, on mahdollisuus käyttää betonimursketta siten, että siihen on sitoutunut muutamassa vuodessa noin 85 prosenttia kalsinoinnissa vapautuneesta hiilidioksidista. Altistamalla mahdollisimman suuri pinta-ala ilman hiilidioksidille sekä suojaamalla betonimurske suoralta sateelta optimoidaan murskeen hiilensidonta. Kierrätysvaihe onkin kriittinen, kun maksimoidaan betonin koko elinkaarenaikaista hiilinielua. (Hiilen sidonta) Laskennallinen hiilenegatiivisuus betonille voidaan saavuttaa tehokkaalla betonin kierrättämisellä sekä matalilla sideaineen hiilidioksidipäästöillä (Liikanen, 2022).

Karbonatisoitumisessa hiilidioksidia oli sitoutunut Suomen betonikantaan vuoteen 2018 mennessä 5,2 miljoonaa tonnia. Noin 92 prosenttia sitoutuneesta hiilidioksidista on sitoutunut talokantaan, mikä vastaa 14 prosenttia tämän betonimäärän kalsinoinnin hiilidioksidipäästöistä. Hiiltä sitoutuu betonirakenteisiin varsin tasaisesti ja vuotoinen sitoutuminen on noin 0,1 miljoonaa tonnia. Vuosittainen sitoutuminen vastaa noin kymmenesosaa

Suomen sementtituotannon kokonaishiilidioksidipäästöistä. Laskemissa ei ole huomioitu purkubetonin vaikutusta, jolla on luultavasti suurempi vaikutus. (Kekkonen, 2021)

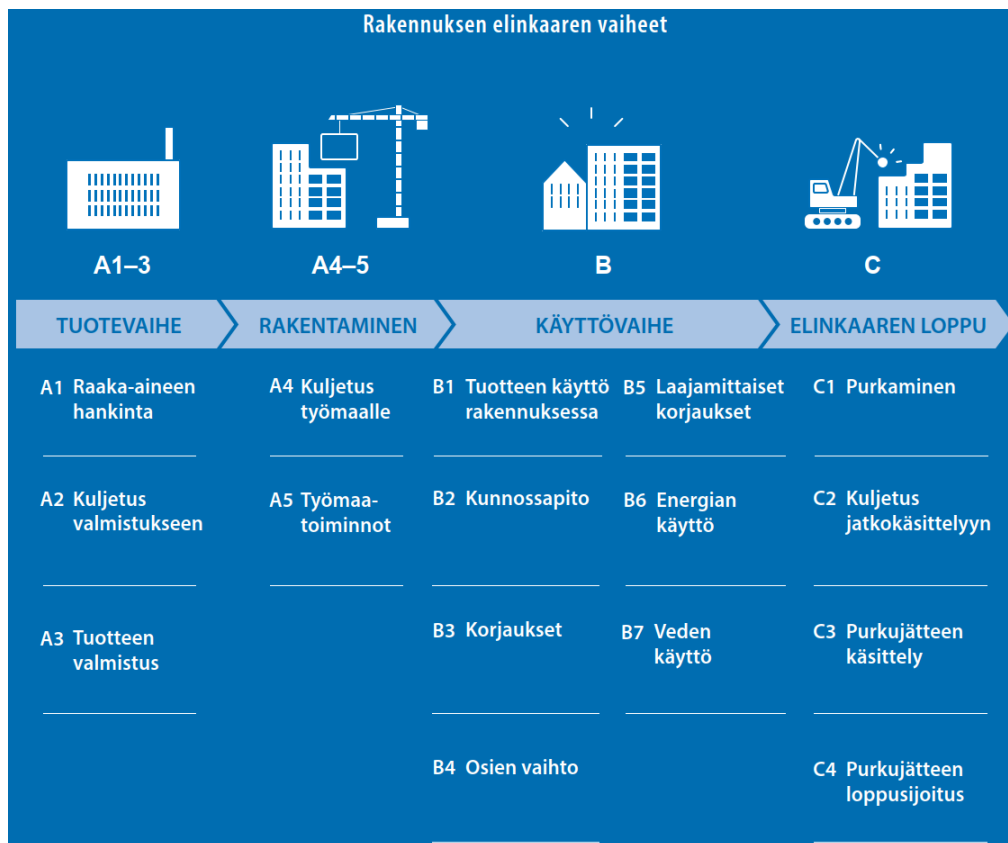
Tutkimuksissa on huomattu, että rakenteen käyttöiän ollessa 70 vuotta ja murskauksen jälkeisen vaiheen ollessa 30 vuotta, betoni on ehtinyt sitomaan 57 prosenttia kalsinoinnissa vapautuneesta hiilidioksidista. 100 vuoden elinkaarella betonirakenteeseen sitoutuu 40–90 prosenttia kalkinpolton päästöistä riippuen betonityypistä. (Kekkonen, 2020)

## 2.4 Hiilidioksidipäästöjen arvioiminen

Rakennusten vähähiilisyttä arvioidaan hiilijalanjäljellä ja hiilikädenjäljellä. Rakennusten vähähiilisyyden arviointimenetelmä perustuu eurooppalaisiin EN-standardeihin sekä EU:n yhteiseen Level-arviointimenetelmään. Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan rakennuksen elinkaaren aikaisia ilmastohaittoja. Siihen luetaan rakennustuotteiden valmistuksen päästöt, kuljetusten ja rakennustyömaan päästöt, rakennuksen energian kulutus ja rakennustuotteiden vaihdot ensimmäisten 50 vuoden ajalta sekä aikanaan tapahtuva purkaminen ja materiaalien kierrätys. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan mahdollisia ilmastohyötyjä, joita ei syntyisi ilman rakennusta. Siihen luetaan rakennustuotteiden kierrätyksen ja uudelleenkäytön hyödyt, pitkäikäiset puutuotteiden tai teollisesti talteen otetun hiilen varastot rakennuksessa, sementtipohjaisten tuotteiden karbonatisoitumisen hyödyt purkamisen jälkeen sekä ylimääräinen uusiutuva energia. Jatkossa tarvittavassa rakennuksen ilmastoeselityksessä esitetään tulokset vähähiilisyyden arvioinnista. (Kuittinen, 2022)

Rakennusten päästöt lasketaan hyödyntämällä rakennuksessa käytettyjen materiaalien ja energianlähteiden määrää, jotka kerrotaan niiden omilla päästökertoimilla. Elinkaaripäästöihin lasketaan myöskin materiaalien valmistuksessa syntyvien päästöjen lisäksi materiaalien kuljetukset, vaihdot, työmaa ja korjaus elinkaaren aikana sekä loppukäsittely. Elinkaaripäästöt ilmoitetaan rakennuksissa yksikössä kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a. Taulukkoarvot löytyvät kuljetuksille, työmaalle, korjauksille ja loppukäsittelylle, ja näitä voidaan hyödyntää koko hankkeen materiaaleille. Materiaaleille tarvittavat vaihdot lasketaan sen sijaan hyödyntäen materiaalien teknistä käyttöikä ja rakennuksen arviointijakson pituutta. (Pasanen, 2021)

Elinkaariarviointiin kuuluu kuvan 6 mukaiset elinkaaren vaiheet. Materiaalin elinkaaren kuuluvat vaiheet ovat raaka-aineiden hankinta ja käsittely (A1), kuljetus valmistukseen (A2), tuotanto (A3), valmiin tuotteen toimitus työmaalle (A4), purkuvaihe (C1), kuljetus käsittelyyn (C2), materiaalien käsittely ja kierrätys (C3) sekä loppusijoitus (C4) elinkaaren lopussa. Elinkaari arviointiin kuuluu lisäksi moduuli D, jossa huomioidaan materiaalien kierrätyksestä tai uusiokäytöstä syntyvät elinkaarenaikaiset hyödyt. Betonin osalta tällä hetkellä hyödyt syntyvät suurimmaksi osaksi murskatun kierrätysbetonin käytöstä maarakentamisessa, missä murske korvaa neitseellistä kiviainesta. Tällainen kierrätysbetonin käyttö ei vaadi erillistä lupaa. Kierrätysbetonia voidaan myöskin käyttää betonituotteiden raaka-aineena ja markkinoilta löytyykin jo esimerkiksi uusioraaka-aineesta tehtyjä ympäristöbetonituotteita. (Salminen, 2019)



Kuva 6 Elinkaariajattelun eri vaiheet (Kuittinen, 2019)

Elinkaariarvioinnin tuloksia hyödynnetään paitsi suunnittelutason materiaalivalinnoissa myös vähäpäästöisempien tuotteiden kehittämisessä. Vähäpäästöisempien tuotteiden kehittämisessä rakentaminen (A5) ja käyttö (B1–B7) jätetään arvioinnin ulkopuolelle. Tämä on yleinen käytäntö tuotteiden elinkaariarvioinnissa. Rakennuksen käytöstä ja rakentamisesta johtuvat päästöt otetaan huomioon yleensä vasta rakennuksen hiilijalanjälkeä lasettaessa hankekohtaisin tiedoin, jotka voivat vaihdella hyvinkin paljon rakennuksesta ja betonituotteen käyttökohteesta riippuen. (Salminen, 2021)

## 2.5 Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen

Betonirakenteen hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää korvaamalla normaali rakennebetoni vähähiilisellä vaihtoehdolla sekä oikeanlaisella suunnittelulla ja betonin tehokkaan käytön avulla. Vähähiilistä betonia voidaan tuottaa korvaamalla osa suuripäästöisestä sementistä pienipäästöisemmällä seosaineilla, johon tässä työssä keskitytään. Betonissa käytettyjä seosaineita ovat muun muassa masuunikuona, lentotuhka, kalkkikivijauhe ja silika. Niitä käyttämällä voidaan pienentää betonin hiilidioksidipäästöjä jopa 90 prosentilla. (Vähähiilinen betoni)

Sementin valmistuksen päästöjä vähennetään korvaamalla polttoaineita kierrätyspolttoaineilla ja prosessin energiantehokkuuden parantamisella. Finnsementin Lappeenrannan sementtitehtaan kierrätyspolttoaineiden osuus on nykyään 80 prosenttia, minkä ansiosta polttoaineista johtuvia päästöjä on saatu pienennettyä 20 prosenttia. Energiatohokkuutta sementtitehtaissa voidaan parantaa myös hukkalämmöntalteenotolla. (Leveelahti, 2022)

Sementtiklinkkerin polttoon vaaditaan niin korkea lämpötila, ettei sitä voida sähkötoimisella kiertouunilla kustannustehokkaasti tehdä. Raakajauheessa olevan kalkkikiven kalsinoituminen tapahtuu ennen kiertouunia kalsinaattorissa tai nousuputkessa, jonka kalsinoitumisosuus voidaan toteuttaa sähköän avulla. Sen jälkeen materiaali syötetään kierto-uuniin klinkkerin polttovaiheeseen. Sähköisellä kalsinaattorilla on mahdollista alentaa sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä huomattavasti. (Punkki, 2021)

Vähähiilisen sementin mahdollistavat kiertotalous, uusiutumattomien raaka-aineiden korvaaminen jäteperäisillä materiaaleilla ja siirtyminen biopolttoaineisiin. Kaikki tällä hetkellä tehdyt vähähiilisyystoimet pienentävät sementin kokonaispäästöjä, jolloin jäljelle jäävän hiilidioksidin vähentäminen on huomattavasti helpommin hallittavissa myös seuraavan vaiheen teknologioikassa. (Leveelahti, 2022)

Tulevaisuudessa on mahdollista kokonaan päästötön portlandsementti. Eurooppalaisten sementinvalmistajien yhteistyönä on käynnissä monia koe- ja pilottilaitoksia ympäri Eurooppaa, joissa tutkitaan päästöttömän sementin tuotantoa. Koe- ja pilottilaitoksissa hiilidioksidipäästöjä vähennetään hiilidioksidin talteenotolla tai varastoinnilla sopivaan mineraaliin. Norjassa on käynnissä projekti täyden mittakaavan hiilidioksidin talteenottolaitoksesta Oslon lähellä sijaitsevalle Norcemin sementtitehtaalalle, jossa prosessista talteenotettu hiilidioksidi sijoitetaan Pohjanmeren ehtyneisiin öljykenttiin. (Vähähiilinen betoni)

Hiilidioksidin talteenotolla ja prosessin optimoimalla sementin päästöt voidaan saada alhaiseksi, jopa kuudesosaan nykyisestä. Sementin valmistuksen saaminen vähäpäästöiseksi tulee vaatimaan suuria investointeja ja globaalisti se tulee kestäväkään kauan. Vähäpäästöinen sementti on mahdollista paikallisesti, kuten Suomessa. Investoinnit edellyttäisivät kuitenkin merkittävää yhteiskunnan tukea kuten Norjassa, jossa valtio tukee sementin hiilidioksidin talteenottolaitoksen ja varastointi-infrastruktuurin investoineissa. (Punkki, 2021)

Vähäpäästöisen sementin raaka-aineet olisivat helposti saatavilla, sillä se tukeutuisi perinteiseen portlandsementin raaka-aineisiin. Vähäpäästöinen sementti olisi myöskin tuttu ja turvallinen, sillä se olisi samaa kuin normaali portlandsementti, josta on kokemusta ja tutkimustietoa jo yli sadan vuoden ajalta. Sementin ominaisuudet ja rajoitukset tunnetaan hyvin. Sementin valmistaminen Suomessa on huoltovarmuuden kannalta tulevaisuudessakin tärkeää. (Punkki, 2021)

Betonirakenteissa käytetty hiilidioksidipäästötön sementti mahdollistaisi ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden vähentymisen. Päästöttömästä sementistä valmistettu betonirakenne sitoo ilmasta hiilidioksidia karbonatisoitumalla, joten on mahdollista, että tulevaisuudessa betonirakentaminen torjuu ilmastonmuutosta. (Vähähiilinen betoni) Työssä ei keskitytä päästöttömään normaaliin rakennesementtiin, sillä se ei muuta rakennebetonin ominaisuuksia, jolloin se ei muuta suunnittelijan työtä nykyisestä.

Suunnittelussa on useita keinoja päästöjen vähentämiseksi. Kantavissa rakenteissa voitaisiin esimerkiksi käyttää eri lujuusluokkia niiden kuormitusten mukaan. Käyttökohteeseen sopivalla rakennejärjestelmän valinnalla käyttökohteesta riippuen on myöskin merkitystä. Muun muassa palkin mittojen kasvattaminen kasvattaa betonimäärää, mutta jos lujuus on alhaisempi, voi sideaineen kokonaismäärä olla alhaisempi. (Härkönen, 2021)



Rakenteiden suunnittelussa voidaan arvioida eri runko- ja vaipparakenteiden hiilidioksidipäästöjä ja esimerkiksi kustannuksia. On kehitelty työkaluja, joilla voidaan nopeasti vertailla suurta määrää erilaisia vaihtoehtoja. Esimerkiksi rakenteita vertailemalla voidaan huomata, että paksumpi eristekerros lisää hiilidioksidipäästöjä rakentamisvaiheessa, mutta rakennuksen energiankulutuksen kannalta paksumpi eristekerros on parempi. Koko rakennuksen elinkaari tulee huomioida. (Tompuri, 2022)

Suunnittelulla voidaan vähentää käytetyn sementin määrää betonirakenteissa. Voidaan esimerkiksi korvata normaali rakennebetoni pilareista korkealujuusbetonilla. Tällöin pilareiden poikkipinta-alaa voidaan pienentää, jolloin betonin kulutus on pienempi. Vaikka korkealujuusbetoniin kuluu enemmän sementtiä, korkealujuusbetonia voidaan mahdollisesti vaatia niin paljon vähemmän kuin normaalia rakennebetonia, että sementin kokonaiskulutus on pienempi ja näin rakentamisen hiilidioksidipäästöt. (Illikainen)

Betonin lujuutta on mahdollista lisätä ja päästöjä vähentää sementin optimaalisella käytöllä pidentämällä rakenteen käyttöikä. Betonin kierrätysastetta on mahdollista kasvattaa entisestään, ja yhä vaativammat kiertotalouden tavoitteet voitaisiin saavuttaa muun muassa suunnittelemalla elementit yksinkertaisesti purettavaksi ja uudelleenhyödynnettäviksi. (Salminen, 2019)

Kun rakenteet suunnitellaan jatkuviksi, rakenneosien taipumiin voidaan vaikuttaa merkittävästi. Kun taipuma on mitoittava, hoikempiin rakenteisiin päästään, jolloin materiaalien menekki on pienempi. Lisäksi jatkuvassa betonirakenteessa voidaan rakenne suunnitella poikkileikkaukseltaan muuttavaksi, jolla voidaan vaikuttaa materiaalin menekkeihin. (Härkönen, 2021)

Suunnittelun laadulla ja kattavuudella on suuri merkitys lopputulokseen. Usein rakenteet suunnitellaan mitoittavan poikkileikkauksen mukaan ja samaa poikkileikkausta käytetään muualla vähemmän rasitetuissa kohdissa. Samaa poikkileikkausta käyttämällä ei päästä parhaaseen lopputulokseen päästöjen kannalta, mutta ajallisesti se vaatii suunnittelussa vähiten. Rakennejärjestelmää ja rakenneosaa tulee tarkistella kokonaisuutena. Suunnittelun tulee olla kattavaa ja suunnitteluosaamisen riittävän korkeatasoista riittävällä aikavaruksella ja resursseilla. (Härkönen, 2021)

Rakenteen päästöjä voidaan koko elinkaaren ajalta vähentää, kun rakenteet tehdään ja suunnitellaan mahdollisimman muuntojoustaviksi. Erilaisissa rasitusolosuhteissa betonin valinta tulee olla tarkoituksenmukainen. Esimerkiksi ulkokuori olisi hyvä valmistaa mahdollisimman korkealaatuisesta betonista huomioimalla muitakin ominaisuuksia kuin puristuslujuus. Ulkokuori voitaisiin myös suunnitella vaihdettavaksi. Muuntojoustavina suunnitellut betonirakenteet voivat toimia uusitussakin rakennuksessa. Rakenteiden kantavuuden arvioiminen on myös suuressa roolissa. Kun rakenteen käyttöikä voidaan pidentää sellaisenaan, on sillä selvä vaikutus päästöihin. (Härkönen, 2021)

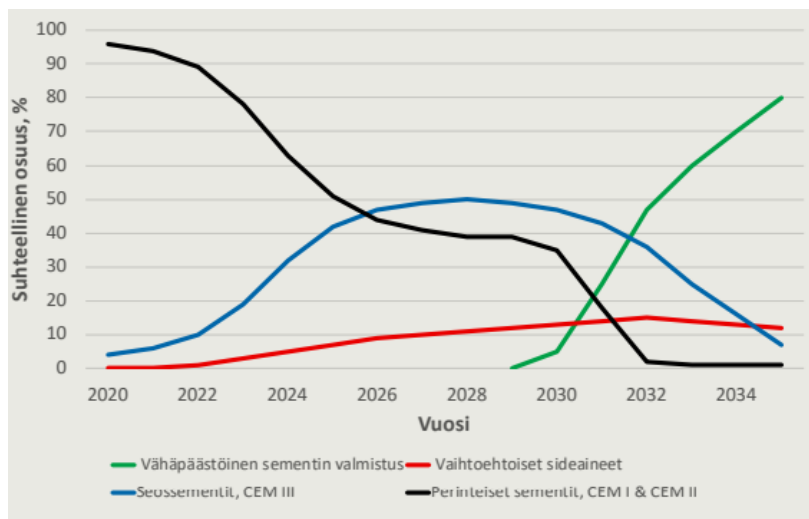
Rakenteiden päästöihin voidaan vaikuttaa tutkimalla uusia ja jo olemassa olevia kantavia betonirakenteita. Tutkimalla rakenteiden toimintaa voidaan päätyä pienempään hajontaan tietyn rakenneosan tai rakenteiden mittoihin ja määriin puuttumatta haluttuun kestävyys- tai käyttöikä. Lisäksi tutkimalla voidaan saada aikaan muun muassa kehittyneempiä mitoitusmenetelmiä ja määrittää tarkempia kuormia. (Härkönen, 2021)

## 3 Vähähiilinen betoni

### 3.1 Yleistä

Vähähiilinen betoni on betonia, jonka raaka-aineista osa on korvattu valmistuksessa hiilidioksidipäästöiltään pienempipäästöisillä raaka-aineilla. Sementin suuren hiilijalanjäljen vuoksi suurin hiilidioksidipäästövähennys saadaan, kun sementtiä korvataan seosaineilla. Pienempipäästöisiä seosaineita ovat muun muassa masuunikuona, lentotuhka, kalkkikivijauhe ja silika. (Betonitieto) Seosaineita hyödyntämällä betonin hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää jopa 90 prosenttia (Vähähiilinen betoni). Kappaleessa 3.2 käsitellään tarkemmin eri seosaineita.

Sideaineet tulevat muuttumaan betonissa jo lähitulevaisuudessa. Kolme erilaista suuntausta voidaan nähdä sideaineiden kehitykselle. Kuvassa 7 nähdään erityyppisten sideaineiden arvioitu kehitys vuoteen 2035 saakka. Kuvassa 7 erityyppisten sideaineiden kehitystä vertaillaan perinteiseen portlandsementtiin tai vähäisissä määrin seostettuun sementtiin. (Punkki, 2021)



Kuva 7 Arvio sideaineiden käytön kehittymisestä (Punkki, 2021)

Voidaan arvioida, että seossementin käyttö kasvaa ensimmäisenä ja siten laskee CEM I- ja CEM II-tyyppisten sementtien osuutta. Seossementti ei sovellu kaikkiin käyttökohteisiin, joten voidaan olettaa, ettei seossementin osuus ylitä 60 prosenttia. Lisäksi masuunikuonan saatavuus tulee rajoittamaan seossementin käyttöä. (Punkki, 2021)

Vaihtoehtoisten sideaineiden käyttö tulee kasvamaan tulevaisuudessa, mutta voidaan olettaa, että kasvu tulee olemaan verrattain hidasta ja niiden markkinaosuus tulee jäämään kohtuullisen alhaiseksi. Niiden käyttö jää pääosin vain pienivolyymisiin erikoiskohteisiin, sillä standardit rajoittavat vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöä kantavissa rakenteissa. Raaka-aineiden saatavuudella on myöskin negatiivinen vaikutus vaihtoehtoisten sideaineiden laajaan käyttöön. Esimerkiksi masuunikuonaa voidaan helpommin käyttää seossementeissä kuin alkaliaktivoituissa sideaineissa. Vaihtoehtoisten sideaineiden markkinaosuus voi nousta merkittävästi, jos tutkimuksissa saadaan tulevaisuudessa läpimurto. (Punkki, 2021)

Vähäpäästöisen sementin valmistus voisi alkaa Suomessa 2030-luvulla, jolloin masuunikuonan saatavuus tulee todennäköisesti ehtymään. Äärimmäisen vaikeaa on ennustaa milloin nämä tulevat lopulta tapahtumaan. Investoinnit vähähiiliseen sementin tuotantoon tulisi tehdä viimeistään 2030-luvun alussa, jos halutaan hyödyntää sementin päästövähennykset hiilineutraalisuustavoitteissa. Betoni pystyy olemaan hiilineutraali tai jopa hiilinegatiivinen, kun huomioidaan vähäpäästöiseen sementin karbonatisoituminen. (Punkki, 2021)

### 3.2 Seosaineet

Mineraalisia seosaineita voidaan käyttää betonin side- ja runkoaineena. Seosaineita ovat masuunikuona, lentotuhka, silika, kalkkikivi ja ferrokromikuona. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59) Sideaineina käytettävät seosaineet muodostavat sementtikiveen lujutta, kun ne sekoitetaan emäksisen portlandsementin kanssa (Kosomaa & ym., 2015).

Teräs- ja energiateollisuuden sivuvirtoina masuunikuona, lentotuhka ja silika ovat vähähiilisiä. Sivuvirtoja käyttämällä betonin hiilidioksidipäästöjä saadaan pienennettyä. Seosaineilla voidaan pienentää betonin hydrataatiossa vapautuvaa lämmöntuottoa ja kohentaa kovettuneen betonin tiiviyttä kloridien tunkeutumista vastaan. (Kosomaa & ym., 2015)

Seosainetta masuunikuonaa saadaan raakaraudan valmistuksesta sivutuotteena. Se on rautamalmista jäljelle jäänyttä sulanutta sivukiveä. Lentotuhkaa saadaan kivihiihivoimalaitosten savukaasuista. Se on hienojakoista ja palamatonta kiviainesta. Silikaa saadaan piiraudan valmistuksen savukaasuista. Se on erittäin hienojakoista ja puhdasta piioksidia. Silikalla voidaan merkittävästi tiivistää ja lujittaa betonia. Kalkkikivijauhe saadaan kalkkikivestä, joka on hyvin hienoksi jauhettua. Seosaineet ovat alkuperänsä johdosta puhtaasti epäorgaanisia aineita ja ne eivät sisällä liukenemis- tai haihtumiskykyisiä ainesosia. (Kosomaa & ym., 2015)

SFS-EN 197-1 (2012) standardin mukaiset sementtityypit on jaettu viiteen eri pääryhmään niissä käytettävien seosaineiden perusteella. Sementtityypit ovat:

- 1) CEM I Portlandsementti
- 2) CEM II Portlandseossementti
- 3) CEM III Masuunikuonasementti
- 4) CEM IV Pozzolaanisementti
- 5) CEM V Seossementti

CEM I Portlandsementissä käytetään ainoastaan sementtiklinkkeriä. CEM II Portlandseossementissä klinkkeriä käytetään 65–94 painoprosenttia, jonka lisäksi mitä tahansa hyväksyttyä seosainetta. CEM III Masuunikuonasementissä käytetään klinkkerin lisäksi masuunikuonaa seosaineena. Masuunikuonasementissä masuunikuonan määrä on 36–95 painoprosenttia ja klinkkerin 5–64 painoprosenttia. CEM IV Pozzolaanisementissä seosaineena voidaan käyttää silikaa, lentotuhkaa ja pozzolaania. Seosaineiden määrä on 11–55 painoprosenttia ja klinkkerin 45–89 painoprosenttia. CEM V Seosainesementissä seosaineina voivat olla masuunikuona, lentotuhka ja pozzolaani. Yksittäisen seosaineen määrä on 18–49 painoprosenttia ja klinkkerin 20–64 painoprosenttia. Suomessa tällä hetkellä yleisessä käytössä ovat CEM I, CEM II ja CEM III-tyypin sementit. Sementtien pääryhmät jaetaan edelleen sementtilajeihin seosaineiden ja niiden määrien perusteella.

Taulukossa 2 nähdään yleisesti käytössä ja suunnitteilla olevien sementtiryhmiä koostumukset.

Taulukko 2 Eräiden sementtiryhmiä koostumus (SFS-EN 197-1, 2012)

| Sementtilaji | Koostumus (%) |              |        |            |            |                 |            |      |
|--------------|---------------|--------------|--------|------------|------------|-----------------|------------|------|
|              | Klinkkeri     | Masuunikuona | Silika | Pozzolaani | Lentotuhka | Poltettu liuske | Kalkkikivi | Muut |
| CEM I        | 95-100        | -            | -      | -          | -          | -               | -          | 0-5  |
| CEM II/A-S   | 80-94         | 6-20         | -      | -          | -          | -               | -          | 0-5  |
| CEM II/B-S   | 65-79         | 21-35        | -      | -          | -          | -               | -          | 0-5  |
| CEM II/A-D   | 90-94         | -            | 6-10   | -          | -          | -               | -          | 0-5  |
| CEM II/A-V   | 80-94         | -            | -      | -          | 6-20       | -               | -          | 0-5  |
| CEM II/B-V   | 65-79         | -            | -      | -          | 21-35      | -               | -          | 0-5  |
| CEM II/A-LL  | 80-94         | -            | -      | -          | -          | -               | 6-20       | 0-5  |
| CEM II/A-M   | 80-88         | 12-20        |        |            |            |                 |            | 0-5  |
| CEM II/B-M   | 65-79         | 21-35        |        |            |            |                 |            | 0-5  |
| CEM III/A    | 35-64         | 36-65        | -      | -          | -          | -               | -          | 0-5  |
| CEM III/B    | 20-34         | 66-80        | -      | -          | -          | -               | -          | 0-5  |

### 3.2.1 Masuunikuona

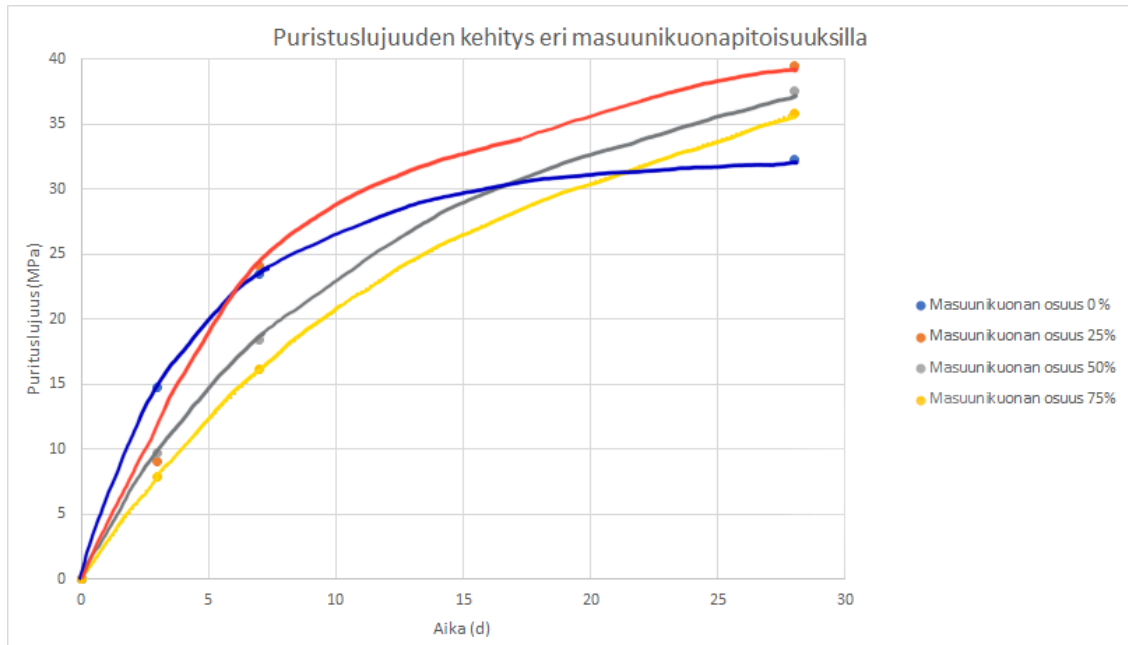
Masuunikuona on raakaraudan valmistuksen sivutuotteena saatavaa masuunissa muodostuneesta emäksisestä silikaattisulatteesta nopeasti jäädyttämällä saatava tuote, millä on piilevät hydrauliset ominaisuudet (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60). Masuunikuona sisältää kalsium-, magnesium- ja aluminosilikaatteja (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019). Suomessa käytetyn masuunikuonan keskimääräinen koostumus nähdään taulukosta 3. Seosaineena käytettävää masuunikuonajauhetta saadaan jauhamalla granuloitu masuunikuona hienoksi (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60). Masuunikuonaa voidaan hyödyntää betonissa suuria määriä ja se on erittäin tehokas seosaine (Iqbal & ym., 2022).

Taulukko 3 Masuunikuonajauheen keskimääräinen koostumus (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019)

|                                | Masuunikuona (%) |
|--------------------------------|------------------|
| CaO                            | 36...42          |
| SiO <sub>2</sub>               | 36...40          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8...10           |
| MgO                            | 10...12          |
| S                              | 1,5...2          |
| Ti                             | 0,9...1,3        |
| K <sub>2</sub> O               | 0,5...1,0        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,5...1,0        |

Masuunikuonajauheen kiintotiheys on 2900...3100 kg/m<sup>3</sup>. Sen raekoko on samaa luokkaa kuin sementillä tai hieman karkeampaa. Masuunikuonan reaktiivisuus riippuu sen raekoosta ja lasimaisuusasteesta. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60) Masuunikuonan aktiivisuus betoninormien mukaan on 1,0 verrattuna sementtiin (SFS 7022, 2019). Masuunikuona notkistaa betonia ja se tarvitsee vähän vettä. Masuunikuonaa käytetään paljon massiivirakenteissa, sillä se pienentää huomattavasti hydratoitumislämpöä (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60).

Masuunikuonalla on vaikutusta betonin lujuudenkehitykseen. Kuvasta 8 nähdään masuunikuonan määrän vaikutusta betonin lujuuden kehitykseen 28 päivän aikana. Masuunikuona pienentää betonin alkulujuutta, mutta kasvattaa loppulujuutta. Masuunikuona parantaa betonin sulfaatinkestävyyttä, ja jos masuunikuonan osuus on yli 70 prosenttia sideaineista, sideaineyhdistelmä luokitellaan sulfaatinkestäväksi. Masuunikuona lisää betonin virumaa ja karbonatisoitumisnopeutta lievästi. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60)



Kuva 8 Masuunikuonan osuuden vaikutus betonin puristuslujuuteen ([Koostettu] Kinnunen, 2016)

Masuunikuona tarvitsee hydraulisten ominaisuuksien heräämiseen kalsiumhydroksidia, jota syntyy esimerkiksi sementin ja veden reaktiossa (Seosaineet sementissä). Masuunikuonan reagoidessa veden kanssa muodostuu pysyvä ja luja reaktiotuote (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019). Masuunikuona kehittää betonissa lujuutta lähes yhtä paljon kuin sementtiklinkkeri (Seosaineet sementissä).

Masuunikuonan käytöllä saadaan hyvä kemiallinen kestävyys, sen tiivistävän vaikutuksen ansiosta, mikä laajentaa masuunikuonabetonin mahdollisuuksia. Tiivis betonirakenne kestää hyvin muun muassa kloridi- ja happorasituksia. (Mattila, 2022) Alkalikiviainesreaktiot voidaan estää käyttämällä riittävästi masuunikuonaa sisältävää sideainetta (Miettinen, 2021). Masuunikuona on lisäksi edullinen sideainevaihtoehto (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019).

Masuunikuona vähentää betonin lujuuskatoa, joka aiheutuu lämpökäsittelystä. Masuunikuonan suurella määrällä on kuitenkin heikentävä vaikutus betonin pakkassuolakestävyyteen. (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019) Yleisesti 50 prosentin masuunikuonan osuutta sideaineen kokonaismäärästä pidetään raja-arvona pakkassuolakestävyyden kannalta (Iqbal & ym., 2022). Masuunikuonan käytöllä kokonaisenergian kulutus saadaan pienennettyä puoleen, kun betonin sideaineen kokonaismäärästä masuunikuonaa on 70 prosenttia (Pitkälä, 2020). Masuunikuonan käytössä on kuitenkin otettava huomioon sen

heikompi alkulujuus erityisesti alhaisissa lämpötiloissa pienemmän hydratoitumislämmön vuoksi. Lisäksi masuunikuonabetoni tarvitsee pidemmän jälkihoidon. (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019)

Masuunikuonaa on hyödynnetty betonirakenteissa Euroopassa jo 100 vuoden ajan. Masuunikuonan vaikutukset betonin säilyvyyteen tunnetaan varsin hyvin. (Iqbal & ym., 2022) Hyvän kemiallisen kestävyuden ansioista Euroopassa merirakenteissa käytetään yleensä masuunikuonaseosmenttiä CEM III (Miettinen, 2021). Venäjällä ja Itä-Euroopassa masuunikuonaa käytettiin ainoana sideaineena kerrostalojen betonissa 1950-luvulla sementtipulan vuoksi. Masuunikuonalla rakennetut kerrostalot ovat edelleen pystyssä, joten teknisesti 70 vuoden ajan sementin korvaaminen muilla sideaineilla on ollut mahdollista. (Veikkola-Virtanen, 2021)

Finnsementti on tuonut viime vuonna 2022 markkinoille uuden vähähiilisen kolmoissementin, jossa käytetään masuunikuonaa (Lyytinen, 2022). Siihen perustuvat betonireseptit ovat hiilidioksidipäästöiltään jopa 40 prosenttia pienemmät kuin CEM I-sementtiin perustuvien (Mattila, 2022). Masuunikuonon saatavuudessa on kuitenkin ollut ongelmia (Lyytinen, 2022).

Masuunikuonan käyttö kasvaa tulevaisuudessa hiilidioksidipäästöjen pienentämispaineen vuoksi, mikä lisää saatavuus ongelmia. Masuunikuonan määrät eivät riitä vastaamaan kysyntään. Kukaan ei tuota masuunikuonaa, vaan sitä syntyy teräsvalmistuksen ohessa. (Pitkälä, 2020) Terästeollisuuden siirtyminen tulevaisuudessa vetyteknologiaan tulee myöskin muuttamaan masuunikuonan koostumusta (Leveelahti, 2022). Suomessa betonivalmistukseen saadaan nykyään kierrätysaineita noin 400 000 tonnia vuodessa (Pitkälä, 2020). Vuosittainen kierrätyspohjaisten seosaineiden käyttö Suomessa oli 2015 noin 350 000 tonnia, josta masuunikuonan osuus oli noin kaksi kolmasosaa (Saarinen, 2015).

Masuunikuonan päästöihin lasketaan tällä hetkellä ainoastaan jauhatuksesta ja kuljetuksesta aiheutuvat päästöt, muttei päästöjä teräksen valmistuksesta (Punkki, 2021). Masuunikuonan ominaispäästöarvo on 0,050 kg CO<sub>2</sub>e/kg, kun CEM I-tyypin sementin ominaispäästöarvo on yli 0,700 kg CO<sub>2</sub>e/kg (Suomen betoniyhdistys, 2022a). Nykyisin sivutuotteisiin usein allokoidaan osa päätuotteiden valmistuksen aiheuttamista päästöistä. Tästä puhutaan masuunikuonan osalta parhaillaan EU-tasolla ja on todennäköistä, että masuunikuonan hiilidioksidipäästöarvo tulee kasvamaan jonkin verran. Tämän vaikutuksesta masuunikuonan tehokkuus päästöjen vähentäjänä laskisi, mutta jatkossakin masuunikuonan päästöt olisivat huomattavasti alhaisemmat kuin portlandsementin. (Punkki, 2021)

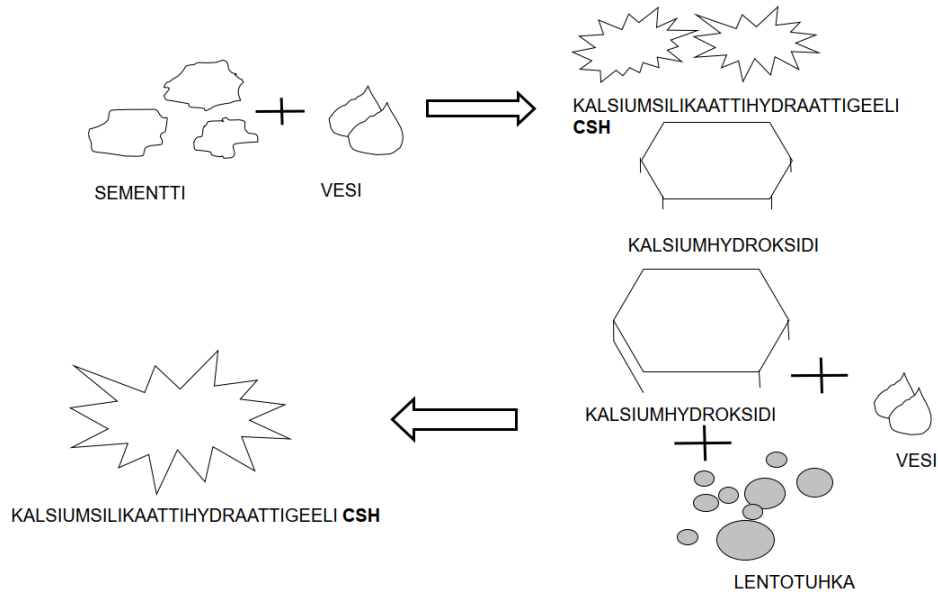
### 3.2.2 Lentotuhka

Lentotuhkaa saadaan erottamalla voimalaitosten kivihiilen polton savukaasuista hienoksi jauhettua pozzolaania (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59). Kivihiili sisältää keskimäärin noin 15 prosenttia palamattomia aineita, joista muodostuu palaessa hienojakoista tuhkaa. Suurin osa hienojakoisesta tuhkasta kulkeutuu savukaasujen mukana vaaleana jauheena. Tätä osaa tuhkasta kutsutaan lentotuhkaksi. (Seosaineet betonissa) Lentotuhkan kiintotiheys on 2100...2500 kg/m<sup>3</sup> (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59.)

Lentotuhka jaetaan kahteen eri ryhmään A ja B sen sisältämän hiilipitoisuuden mukaan. A-luokan hiilipitoisuus on enintään 5 prosenttia ja B-luokan enintään 10 prosenttia. Hii-

lipitoisuus vaikuttaa lentotuhkan vedentarpeeseen B-luokan lentotuhkan vedentarpeen ollessa suurempi. Pienen hiilipitoisuuden lentotuhkaa voidaan käyttää parantamaan betonin työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä. Lentotuhkan ongelmana on suuri vaihtelu hiilipitoisuudessa. Tasaisen betonilaadun saavuttaminen lentotuhkalla on haastavaa. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59)

Lentotuhka voi betonissa toimia kiviaineena tai sideaineena. Lentotuhkan sitova vaikutus liittyy sen pozzolaaniseen reaktioon, joka nähdään kuvassa 9. Reaktio on hitaampi kuin sementin reaktio. Pozzolaanireaktio vaatii tapahtuakseen riittävän vesi- ja kalsiumhydroksidi määrän. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59)

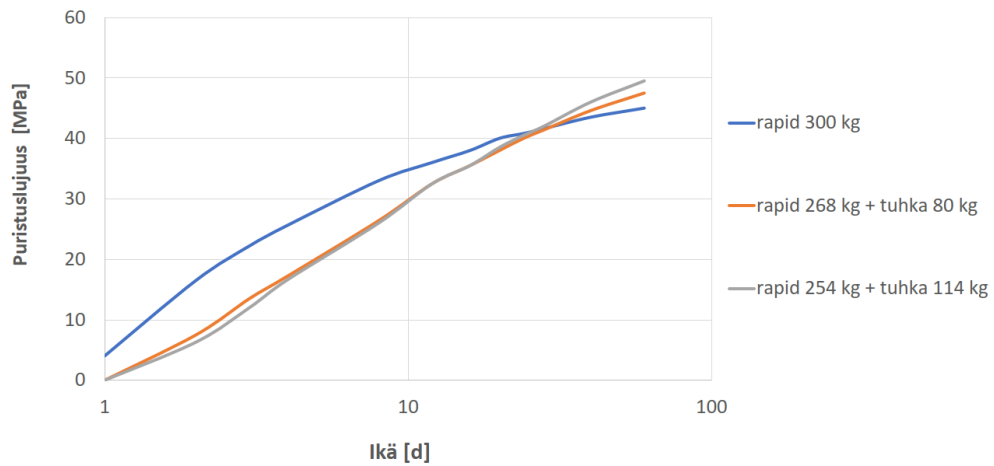


Kuva 9 Lentotuhkan pozzolaanin reaktio (Seosaineet betonissa, 2022)

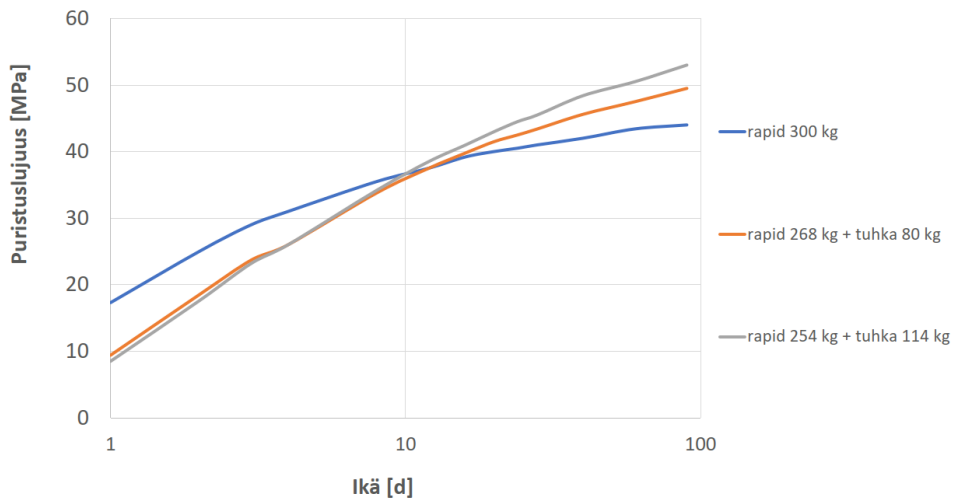
Lentotuhkan aktiivisuuskerroin verrattuna sementtiin on 0,4 tai 1,0 riippuen betonin rasitusluokasta ja muutamasta poikkeuksesta. Aktiivisuuskerroin on 0 siltä osin, kun lentotuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokkia XC0, XC1, XF1 ja XF3 lukuun ottamatta. Kun käytetään lujuusluokan 32,5 sementtiä, lentotuhkan aktiivisuus kerroin on 0,2 rasitusluokissa XC2, XC3, XC4, XF2, XF4, XS-, XD- ja XA-luokissa siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde alittaa arvon 0,33. (Suomen betoniyhdistys, 2019, s. 32)

Lentotuhka laskee betonin hydratoitumislämpöä, kun sillä korvataan sementtiä betonissa. Alhainen lämpötila hidastaa huomattavasti lentotuhkan reaktioita betonissa, minkä vuoksi sen käyttö ei ole suositeltavaa kylmissä olosuhteissa ja esimerkiksi lattiavaluissa hidastuneen sitoutumisen ja lujittumisen vuoksi. Lämpökäsittelyllä voidaan nopeuttaa lentotuhkan reaktioita. Lentotuhkan sisältämä hiili vaikeuttaa betonin huokostamista ja se saattaa muuttaa muiden lisäaineiden toimintaa. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 59–60) Lentotuhkan käyttö betonissa vähentää vedentarvetta ja parantaa betonimassan työstettävyyttä. Lentotuhkan käyttö alentaa betonin alkulujuutta, mutta sen käytöllä voidaan saavuttaa korkeampi loppulujuus. Lentotuhkan vaikutus betonin lujuuskehitykseen eri lämpötiloissa nähdään kuvasta 10. (Seosaineet betonissa, 2022) Käyttämällä lentotuhkaa betonin seosaineena kokonaisenergian kulutusta saadaan pienettyä reilulla kolmanneksella (Pitkälä, 2020).

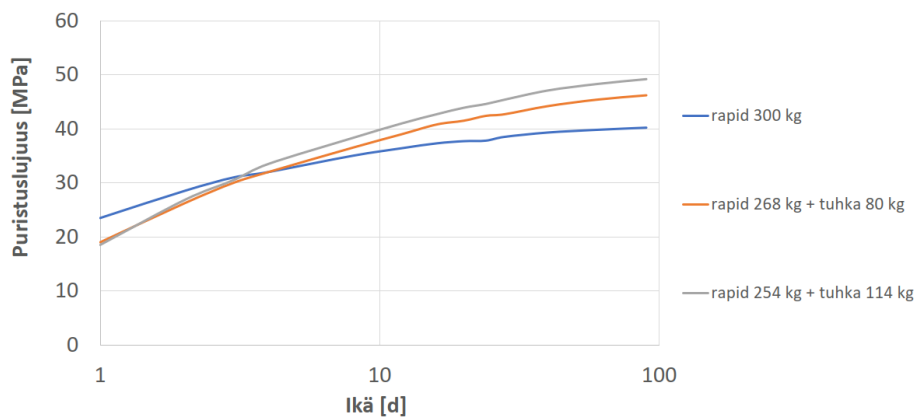
Lujuudenkehitys +5:ssä, vesimäärä 180 l/m<sup>3</sup>



Lujuudenkehitys +20 C:ssa, vesimäärä 180 l/m<sup>3</sup>



Lujuudenkehitys +40 C:ssa, vesimäärä 180 l/m<sup>3</sup>



Kuva 10 Lentotuhkalla seostetun betonin puristuslujuuden riippuvuus korvausprosentista ja lämpötilasta ([Koostettu] Seosaineet betonissa, 2022)



Lentotuhkalla on sama ongelma kuin masuunikuonalla saatavuuden kanssa. Lentotuhkaan ei erikseen tuoteta, vaan se syntyy hiilivoimaloiden sivutuotteena, joita pyritään ajamaan alas niiden suuren hiilijalanjäljen vuoksi. (Pitkälä, 2020) Kivihiiltä myöskin korvataan biopolttoaineilla. Biopolttoaineiden tuhkan käyttömahdollisuudet betonin valmistuksessa ovat heikkommat, koska niin sanottu biotuhka on kivihiilituhkaa epähomogeenisempi ja sen hiili- ja alkalipitoisuus on huomattavasti korkeampi. (Saarinen, 2015)

Betonivalmistukseen voidaan Suomessa tällä hetkellä saada kierrätysaineita noin 400 000 tonnia vuodessa, ei sen enempää (Pitkälä, 2020). Vuosittainen kierrätyspohjaisten seosaineiden käyttö Suomessa oli 2015 noin 350 000 tonnia, josta lentotuhkan osuus oli noin yksi kolmasosa (Saarinen, 2015). Lentotuhkan ominaispäästöarvo on 0,0053 kg CO<sub>2</sub>e/kg, kun CEM I-tyypin sementin ominaispäästöarvo on yli 0,700 kg CO<sub>2</sub>e/kg (Suomen betoniyhdistys, 2022a).

### 3.2.3 Silika

Silika syntyy piiraudan ja alkuaine piin valmistuksessa. Se erotetaan savukaasuista. Silika on erittäin hienojakoista amorfista piidioksidia ja se on pozzolaani kuten lentotuhka. Sen raekoko on alle 1 mikrometri ja kiintotiheys on noin 2200 kg/m<sup>3</sup>. Silikan käyttäminen betonissa lisää betonin vedentarvetta sen suuren hienouden takia, minkä vuoksi sen kanssa on suositeltavaa käyttää veden tarvetta vähentäviä lisäaineita. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60)

Silika kasvattaa huomattavasti betonin loppulujuutta. Silika myöskin parantaa betonin kemiallista kestävyttä, koossapysyvyyttä, tiiveyttä ja vedenpitävyyttä. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60) Silikaa hyödynnetään pääosin korkealujuusbetonien sekä erityistä kemiallista kestävyttä vaativien betonien valmistuksessa. Silikan lujittava ja tiivistävä vaikutus johtuu hienon silikajauheen kyvystä vähentää betonin huokoisuutta sementtipastan ja kiviaineksen välisellä faasirajalla. (Betonitieto) Silikan reaktiotuotteet vähentävät ja pienentävät betonin kapillaarihuokosia, minkä vaikutuksesta betonin vesi- ja kaasutiiviys paranevat. Aggressiiviset aineet eivät pääse tunkeutumaan tällöin betoniin, jolloin betonin kemiallinen kestävyys paranee. (Parmix-Silika, 2019)

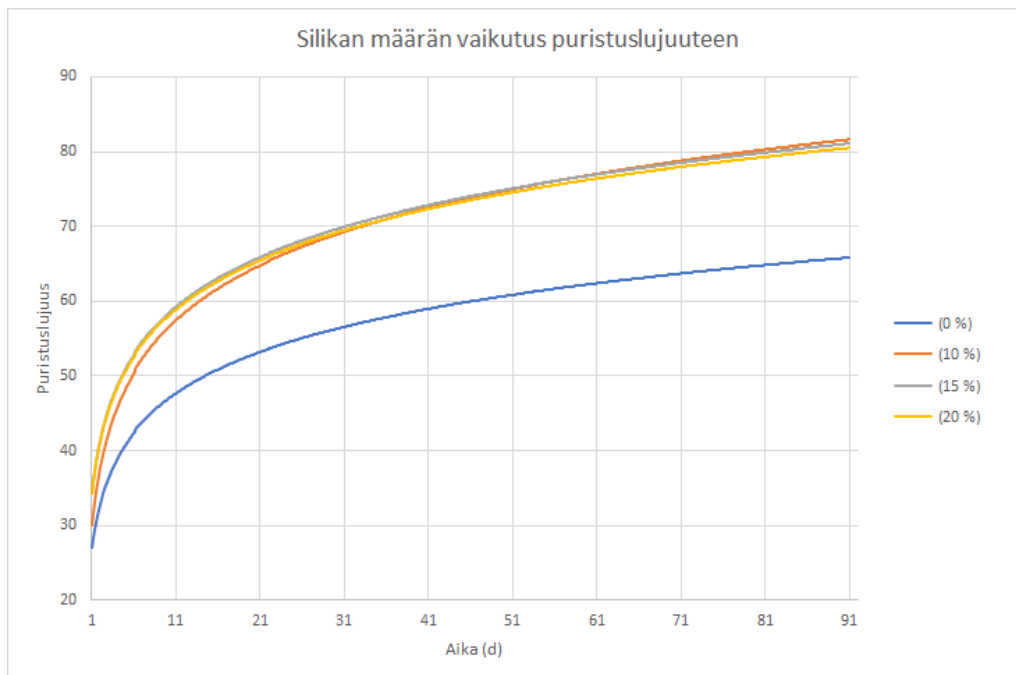
Varsinkin korkealujuusbetoneissa silika tekee betonimassasta kiteistä ja vaikeasti työstettävää. Silika alentaa hieman hydratoitumislämpöä, kun sillä korvataan sementtiä sen verran, että betonin lujuus pysyy samana. Silikan lämmönkehitys on kuitenkin samaa luokkaa kuin sementin. Silikan aktiivisuuseroin on 2,0 verrattuna sementtiin, kun vesi-sementtisuhde on korkeintaan 0,45, ja 1,0, kun vesi-sementtisuhde on korkeampi kuin 0,45. (Suomen betoniyhdistys, 2012, s. 60–61)

Silika reagoi betonissa sementin reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa nopeasti. Välittömästi huokosveden ollessa kylläinen kalsiumhydroksidista silikan pinnalle alkaa muodostua kalsiumsilikaattihydraattia. (Betonitieto) Kalsiumsilikaattihydraatti on tavallisen sementtikiven tapaista. Kalsiumhydroksidin vähentyminen reaktiossa tiivistää varsinkin kiviaineksen ja sementtikiven rajapintaa. (Parmix-Silika, 2019) Reaktion alku on erittäin nopeaa. Noin puolet silikasta reagoi ensimmäisen päivän aikana ja 2/3 kolmen päivän aikana. Kolmen päivän jälkeen reaktio kuitenkin hidastuu selvästi. (Betonitieto)

Silikan vaikutuksesta betonin vedenerottuminen on merkittävästi pienempää kuin normaalilla rakennebetonilla, jonka vuoksi tuoreen betonin pinta kuivaa helposti. Kuivumiseen vaikuttaa lämpötila ja tuulen nopeus. Kuivuminen aiheuttaa plastista halkeilua, pinnan irtoamista kovettuneesta betonista ja betonipinnan pölyämistä. Kuivumisen johdosta on tärkeää suojata silikabetonin pinta muovikalvolla tai jälkihoitoaineella. (Parmix-Silika, 2019)

Betonin pakkaskestävyyteen vaikuttaa kovettuneen betonin huokosrakenne sekä betonin jäätyessä sen sisältämä vesimäärä. Silika pienentää betonin kapillaarihuokosten määrää ja kokoa sekä betonissa olevan jäätyiskykyisen veden määrää. (Parmix-Silika) Silikan vaikutuksesta pakkaskestävyyteen on kuitenkin ristiriitaista tietoa (Varkoi, 2021).

Masuunikuonaan ja lentotuhkaan verrattuna silikalla saadaan betonille korkea varhainen lujuus. Silikabetonin puristuslujuuden kehitys eri prosenttiosuudella verrattuna portlandsementillä valmistetun betonin lujuudenkehitykseen nähdään kuvasta 11. Silikabetonin korkean lujuudenkehityksen syynä on silikahiukkasten kyky asettua hyvin lähellä betonin kiviaineshiukkasia ja näin tiivistää betonia. Portlandsementin hiukkasilla ei ole tätä kykyä ja tämä alue on tunnettu heikkona kohtana betonissa. Silika vähentää kiviaineksen ja sementtipastan rajapinnan huokoisuutta, jolloin se on vahvempi lujuudeltaan ja läpäisevyydeltään. Kun silikan määrä on alle 5 prosenttia sementtimäärästä, silikaa ei ole riittävästi peittämään kaikkia kiviaineshiukkasia ja saavutettu lujuudenkehitys on pienempi. Suurella silikamäärällä ei ole kuitenkaan hyötyä sillä ylimääräinen silika ei pysty asettumaan kiviaineksen pinnalle. (Varkoi, 2021)



Kuva 11 Silikan prosenttiosuuden vaikutus puristuslujuuteen ([Koostettu] Varkoi, 2021)

Silikan käytöllä voidaan vähentää betonin hiilidioksidipäästöjä jopa 14 prosentilla verrattuna portlandsementillä valmistettuun betoniin (Varkoi, 2021). Silikan hiilidioksidipäästöjä vähentävä vaikutus perustuu pienempään ominaispäästöarvoon ja 2,0 aktiivisuuskertoimeen. Silikalle ei kuitenkaan ole saatavilla päästöarvoa. Sille käytetään lentotuhkan

ominaispäästöarvo 0,0053 kg CO<sub>2</sub>e/kg, joka on tuotantoprosessiltaan samanlainen prosessi. CEM I-tyypin sementin ominaispäästöarvo on yli 0,700 kg CO<sub>2</sub>e/kg. (Suomen betoniyhdistys, 2022a)

Silikan kalleuden takia sen käyttö rajoittuu erikoisbetoneihin, joilta halutaan tiettyjä ominaisuuksia kuten erittäin suurta lujuutta ja tiiveyttä (Betonitieto). Silikaa lisäksi voidaan käyttää sementin korvikkeena vain 10 prosenttia sementtimäärästä, jolloin hiilidioksidijalanjäljen pienentyminen ei ole hirveän suurta (SFS 7022, 2019). Näiden syiden vuoksi silikaa ei käytetä yleensä vähähiilisen betonin valmistuksessa.

### 3.3 Fillerikiviaines

Kivijauhe on hienojakoista esimerkiksi kallion louhinnan sivutuotetta tai varta vasten jauhattua kiviperäistä materiaalia, jota voidaan lisätä betonimassaan tarkoituksena saada siihen haluttuja ominaisuuksia. Mineraalisia hienoaineita käytetään sementin lisänä tai korvaavana ainesosana niiden aikaansaaman taloudellisen edun sekä ympäristön kannalta tärkeän teollisuuden jäte- ja sivutuotteiden hyödyntämisen vuoksi. Yleisiä hienokivijauheita ovat muun muassa kalkkikivi- ja kvartsifilleri. Kemiallisesti inerttejä hienoaineita on enimmäkseen hyödynnetty erikoisbetoneissa kuten korkealujuusbetoneissa ja itsetiivistyvien betonien valmistuksessa. (Betonitieto)

Betonivalmistuksessa sementistä voidaan korvata osa fillerikiviaineksella. Fillerikiviainesta voidaan käyttää betonissa säästämään sementtiä ja siten vähentämään betonin hiilidioksidipäästöjä. Sitä myöskin käytetään, kun betoniin halutaan tiettyjä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi itsetiivistyvissä betonissa. Fillerikiviaines on itse reagoimaton tai lähes reagoimaton. Sitä syntyy sekä sivutuotteena kallion murskauksessa että teollisessa jauhausuksessa. (Betonitieto)

Betonilta vaadittavat ominaisuudet, kuten tiivistettävyyden, koossapysyvyys ja tuorelujuus, voivat vaatia suuria määriä hienoainesta. Usein hienoainemäärä betonissa saavutetaan sementtiä käyttämällä, mutta sementin sijaan voidaan käyttää fillerikiviainesta, jolloin tuotantokustannukset ja hiilidioksidipäästöt laskevat. (Betonitieto)

Fillerikiviainesten käyttöä sementin korvaavana aineena on tutkittu normaalilujuuksissa betoneissa varsin vähän. Filleriaineksia käytetään pääosin erikoisbetoneissa kuten itsetiivistyvissä ja korkealujuusbetoneissa, joiden koostumus on huomattavasti erilainen normaaliin rakennebetoniin verrattuna. Sen vaikutuksia betonin ominaisuuksiin kuten pakkas- ja kulutuskestävyyteen sekä kemiallisen kestävyteen on tutkittu vähän. (Betonitieto)

Kemiallisesti reagoimattomien fillerikiviainesten betonia vahvistava vaikutus perustuu niiden kykyyn parantaa betonin huokosrakennetta. Fillerikiviaines täyttää sementtipastan välisiä tyhjiä tiloja tai toimii hydraatit tuotteiden kiteytymiskeskuksina. Betonin veden tarvetta vähentää partikkelien tiivis pakkautuminen, minkä ansiosta betoniin saavutetaan suurempi lujuus. Mahdollisimman tiiviillä betonin pakkautumisella voidaan vähentää sementin käyttöä. (Betonitieto)

Hienoaineita voidaan valmistaa kivien hienontamisen lisäksi kemiallisesti, ja monesti ne ovat metalli- ja kivennäisaineteollisuuden sivutuotteita. Niitä voidaan kierrättää ja käyttää

hyödyksi betoniteollisuudessa. Hienoaineella saavutetaan taloudellinen hyöty pienentyneiden raaka-ainekustannusten ansiosta. Lisäksi hienoaineella saavutetaan ympäristöllisiä hyötyjä, kuten pienentynyt hiilijalanjälki. Hienoaineiden hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin korvattavan portlandsementin. Betoniin seosaineeksi soveltuvia teollisuuden sivutuotteita tuotetaan suuria määriä. (Betonitieto)

Hienojauheiden kutsuminen inertiksi on kiistanalaista, sillä inertiksi mielletyt jauheet saattavat reagoida jonkin verran sementin reaktiotuotteiden kanssa. Inerteilla jauheilla yleisesti kuitenkin tarkoitetaan hienojakoisia aineita, jotka reagoivat betonin normaaleissa lämpötiloissa huomattavasti sementtiä sekä lentotuhkaa ja masuunikuonaa vähemmän. (Betonitieto)

Erittäin hienojakoisella kivijauheella on myös niin sanottu fyysinen vaikutus, jossa hienojakoinen jauhepartikkeli pääsee erittäin lähelle runkoainerakeita toisin sanottua kiviainesrakeen ja sementtipastan rajapintaa, kuten silika. Rajapinta on yleisesti betonin heikoin kohta seinävaikutuksen vuoksi, joka estää sementtirakeiden pakkautumisen tiukasti kiinni kiviainesrakeisiin. Pienet hiukkaset pääsevät pakkautumaan hyvin lähellä kiviainesrakeita, minkä johdosta seinävaikutus vähenee huomattavasti. Lisäksi kivijauheen käytöllä pystytään vähentämään veden erottumista, joka voi tavallisessa betonissa aiheuttaa vesitaskuja kiviainesrakeiden alle. (Betonitieto)

Fillerikiviaines voi, erityisesti yhdessä tehonotkistimien kanssa, parantaa betonissa partikkelien pakkautumista, betonin mekaanisia sekä kestävyys- ja tuoreen massan reologisia ominaisuuksia. Betonin puristuslujuutta voidaan kasvattaa lisäämällä fillerikiviainesta, mutta runsas hienojakoisen materiaalin käyttö tekee betonimassasta kittimäistä. Tehonotkistimen käytön tarve kasvaa hienoainesmäärän kasvaessa. (Betonitieto)

Fillerikiviaineella voidaan korvata betonissa sementtiä. Korvattavaan määrään kuitenkin vaikuttaa fillerikiviaineen hienousaste eli se, kuinka pienikokoista kiviaines on. Kiviaineksen ollessa hienojakoisempaa kuin sementti se pystyy täyttämään pienempiä välitiloja betonimassassa kuin sementtipartikkelit. Betonimassat, joissa on vähemmän sementtiä, hyötyvät enemmän fillerikiviaineen lisäyksestä ja niihin voidaan lisätä sitä enemmän, kuin betonimassoihin, jossa on runsaasti sementtiä. Esimerkiksi itsetiivistyvän betonin valmistuksessa fillerikiviainetta voidaan lisätä enemmän, mikä on taloudellisempaa, kuin itsetiivistyvyyden saavuttaminen sementtiä lisäämällä. (Betonitieto)

Kalkkifilleri on esimerkki fillerikiviaineesta. Kalkkikivi parantaa betonimassan työstävyyttä ja tiivistää betonin huokosrakennetta. Tiivistävän vaikutuksen vuoksi kalkkikivi hidastaa aggressiivisten aineiden tunkeutumista betoniin. Kalkkikiven ansiosta kovettuneen betonin rakenne on tiiviimpi. (Seosaineet sementissä) Kalkkifilleriä voidaan käyttää betonissa 20 prosenttia sementtimäärästä (SFS 7022, 2019).

Kalkkifillerin ominaispäästöarvo on 0,011 kg CO<sub>2</sub>e/kg, kun CEM I-tyypin sementin ominaispäästöarvo on yli 0,700 kg CO<sub>2</sub>e/kg (Suomen betoniyhdistys, 2022a). Kalkkifillerillä ei ole siis niin suurta hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaalia kuin esimerkiksi masuunikuonalla. Kalkkikiven saatavuudessa ei ole kuitenkaan vastaavia ongelmia kuin masuunikuonan ja lentotuhkan kanssa (Punkki, 2021).

### 3.4 Kalsinoidut savet

Betoniteollisuudessa tunnettuja savia ovat smektiitti, palygorskiitti ja kaoliini. Kaoliinia voidaan hyödyntää poltettuna tai raakana. Kalsinoinnissa savea poltetaan. Kalsinoidulla savella on pozzolaanisia ominaisuuksia. Kalsinoitu kaoliini vapauttaa pozzolaanisessa reaktiossa alumiinioksideja ja piioksideja, jotka muodostavat kalsiumalkali-silikaattihydroksidia. Tämä kasvattaa betonin puristuslujuutta ja kestävyyttä. Kalsinoiduilla smektiitillä ja palygorskiitillä on todettu esiintyvän samankaltaisia reaktioita. (Kujala, 2021)

Kalsinoitua kaoliinia kutsutaan metakaoliiniksi (Kujala, 2021). Sitä valmistetaan polttamalla/lämpökäsittelmällä kaoliinia eli savea, joka sisältää kaoliniittia. Kaoliini on alumiinisilikaattien heikosti kovettunut ja märkänä muovailtavissa oleva seos. Se on väriltään vaalea tai harmahtava ja se muodostuu pääosin kaoliinista. Kalsinointi tapahtuu 500–800 celsiusasteessa, jossa kaoliniitin kiderakenne rikkoutuu, mikä synnyttää amorfista materiaalia. Metakaoliini on pozzolaaninen aine kuten lentotuhka. Metakaoliinin kalsinoitumisprosessin kaava on  $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2Si_2O_7 + 2 H_2O$ . (Betonitieto)

Metakaoliini jauhetaan tahdottuun rakeisuuteen kalsinoinnin jälkeen. Metakaoliini aktivoituu sementin hydrataatiossa vapautuvan kalsiumhydroksidin (CaOH) ansiosta. Metakaoliinin aktivoitumiseen voidaan myöskin käyttää muita alkalisia seoksia, kuten natriumhydroksidin (NaOH) tai kalsiumhydroksidin (KOH) sekä natriumsilikaattiliuoksen seosta. (Betonitieto)

Pozzolaanit ovat yleensä sivutuotteita eri teollisista prosesseista, mutta metakaoliini on teollinen tuote, minkä ansiosta sen laatu on paremmin hallittavissa. Metakaoliinin valmistaminen tuottaa vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin portlandsementin valmistus, sillä metakaoliinin kalsinoinnissa hiilidioksidia ei vapaudu. Sen kalsinointi prosessista vapautuu ainoastaan vettä. Verrattuna sementin valmistuksen klinkkerin polttoon kaoliinin kalsinointi vaatii pienempää lämpötilaa, minkä ansiosta prosessin energian kulutus on pienempi. Metakaoliinin aktivointiin voidaan myöskin käyttää natriumhydroksidia tai natriumsilikaattia, joiden valmistus vaatii huomattavasti energiaa. Tällöin ei metakaoliinin käytöllä saavuteta energiansäästöä. (Betonitieto)

Seostamalla sementtiä metakaoliinilla voidaan sementin hiilijalanjälkeä laskea. Sillä voidaan myöskin laskea sementin tuotantokustannuksia. Metakaoliinin avulla on mahdollista kasvattaa betonin puristuslujuutta kasvavan monokarbonaattimäärän ansiosta. Monokarbonaatti syntyy ettringiitin stabiloitumisesta. Metakaoliiniseossementin puristuslujuuteen kuitenkin vaikuttavat merkittävästi vesi-sementtisuhte, mahdollisesti käytettävät lisäaineet ja betonimassan ilmamäärä. Puristuslujuudeltaan metakaoliiniseossementti on käytökelpoinen betoneissa ja voi toimia lujutta kasvattavana seosaineena erityisesti, jos vesi-sementtisuhdetta lasketaan. (Kujala, 2021) Alhaisemmalla vesi-sementtisuhteella saadaan yleisesti korkeampi puristuslujuus.

Metakaoliiniseossementillä betoniin muodostuu hyvin hienoja ja halkaisijoiltaan pieniä huokosia, jotka ehkäisevät sulfaattien pääsyä betonin pintaa pidemmälle ja näin parantavat betonin sulfaatinkestävyyttä. Tämä myöskin parantaa betonin kloriditunkeutuman kestävyyttä. Metakaoliiniseossementti kuitenkin mahdollisesti kasvattaa betonin karbonatisoitumista verrattuna perinteisiin sementtilajikkeisiin. Metakaoliini myöskin kas-

vattaa alkali-silikaattireaktiivisuuskestävyyttä betonissa. Metakaoliinilla ei ole merkittävää vaikutusta betonin pakkaskestävyyteen tai korkean lämpötilan kestävyys. (Kujala, 2021)

Sementti- ja betonistandardit mahdollistavat kaoliinisaven käytön betonirakentamisessa. Kaoliinisaven käytöstä seosaineena on tutkimuksia käynnissä esimerkiksi Finnsementillä. Kaoliinisavea voidaan mahdollisesti käyttää tulevaisuudessa masuunikuonan rinnalla sementissä tai sen korvaajana. (Leveelahti, 2022) Savipohjaisten materiaalien saatavuuden kanssa ei ole vastaavia ongelmia kuin masuunikuonan ja lentotuhkan saatavuuden kanssa (Punkki, 2021).

### 3.5 Vaihtoehtoiset sideaineet

Vaihtoehtoiset sideaineet ovat sideaineita, jotka eivät sisällä portlandsementtiä. Alkaliaktivoituidet kuonat sekä geopolymeerit ovat tunnetuimpia vaihtoehtoisia sideaineita. Geopolymeeriä käytetään usein yleisterminä kuvaamaan vaihtoehtoisia sideaineita, vaikka tarkkaan ottaen sillä tarkoitetaan metakaoliiniin perustuvaa sideaineita, jonka Joseph Davidovits kehitti. (Punkki, 2021)

Vaihtoehtoisia sideaineita on erityyppisiä. Niiden tulisi perustua pii- tai alumiinipohjaisiin raaka-aineisiin kalsiumpohjaisten sijasta, jolloin voitaisiin alentaa hiilidioksidipäästöjä verrattuna portlandsementtiin. Vaihtoehtoisen sideaineen raaka-aineena toimivat teollisuuden sivuvirta- tai jätemateriaali. Tunnettuja vaihtoehtoisia sideaineita ovat muun muassa kalsium-aluminaattisementti, kalsium-silikaattisementti, kalsium-hydrosilikaattisementti, kalsium-sulfoaluminaattisementti, alkaliaktivoituidet sideaineet ja geopolymeerit. (Punkki, 2021)

Osalla vaihtoehtoisista sideaineista voidaan vähentää sideaineen hiilidioksidipäästöjä, mutta osalla tavoitellaan ensisijaisesti muutoksia sementin ja betonin ominaisuuksiin. Vaihtoehtoisilla sideaineilla päästöt saattavat olla portlandsementin tasolla. Esimerkiksi kalsium-aluminaattisementti ei ole vähäpäästöinen sementti, vaan se parantaa betonin tuulenkestoa. (Punkki, 2021)

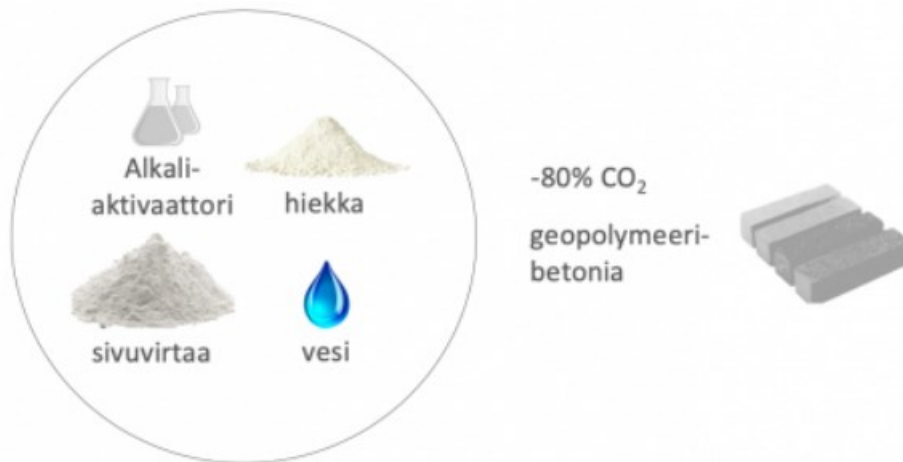
Vaihtoehtoisilla sideaineilla ei päästä nollapäästöihin. Esimerkiksi alkaliaktivoituissa kuonissa päästöjä aiheutuu kuonasta sekä aktivaattorista. Jättemateriaalit myös vaativat prosessointia ennen kuin niitä voidaan käyttää, mikä aiheuttaa päästöjä. Vaihtoehtoisilla sideaineilla voidaan kuitenkin päästä hiilidioksidipäästöissä samalle tasolle runsaasti seostetuiden sementtien, kuten CEM III/C, kanssa. (Punkki, 2021)

Vaihtoehtoisia sideaineita on ollut 1800-luvun lopusta lähtien. Esimerkiksi 1960-luvulla alkaliaktivoituja sideaineita kehitettiin laajasti Ukrainassa, jossa näitä käytettiin vesirakenteiden ja kerrostalojen valmistuksessa hyvällä menestyksellä. Suomessakin kehitettiin 1980-luvulla F-sementti, joka oli muunnos ukrainalaisesta sideaineesta. F-sementtiä tutkittiin runsaasti, mutta sitä ei varsinaisessa käytössä koskaan käytetty. (Punkki, 2021)

Vaihtoehtoisilla sideaineilla voidaan saavuttaa parempi reaktiivisuus, korkeampi puristuslujuus, paremmat kestävyysominaisuudet ja nopeampi kovettuminen verrattuna portland-pohjaisiin sementteihin normaalissa kovetuslämpötilassa (20 °C). ARTIC-ecocrete projektissa osoitettiin, että masuunikuonapohjainen vaihtoehtoinen sideaine kovettuu pakkasessa, jopa -10 °C:ssa. Projektissa vaihtoehtoiset sideaineet olivat reaktiivisempia

ja niillä saavutettiin parempi lujuudenkehitys ja pakkaskestävyys kuin perinteisellä sementillä. Lisäksi huomattiin, että vaihtoehtoisen sideaineen ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä hienoa rautaa sisältävää teollista sivuvirtaa. (Ohenoja, 2021)

Geopolymeeribetonia valmistetaan sekoittamalla yhteen teollisuuden sivuvirtamateriaalia tai luonnonmateriaalia, kemiallinen aktivaattori, hiekkaa ja soraa. Sen valmistus ei siten hirveästi poikkea tavallisen betonin valmistuksesta, jossa sementti, hiekka ja sora sekoitetaan veden kanssa. (Illikainen) Geopolymeerin raaka-aineet nähdään kuvassa 12. Kemiallinen aktivointiaine tarvitaan, jotta geopolymeeri toimii. Sementissä aktivointiaineena toimii klinkkeri. Aktivointiaineena voidaan käyttää myös esimerkiksi vesilasiasia ( $\text{Na}_4\text{SiO}_4$ ). (Leveelahti, 2022)



Kuva 12 Geopolymeeribetonin raaka-aineet (Illikainen)

Vaihtoehtoisten sideainebetonien lopputulos voi olla samanlainen kuin normaalin ainoastaan sementtiä sisältävän betonin. Vaihtoehtoisten sideainebetonien ominaisuudet voivat kuitenkin poiketa huomattavasti tavallisen betonin ominaisuuksista. (Illikainen)

Tutkimukset ovat osoittaneet, että jäte- ja sivuvirtaperäisten materiaalien ominainen vaihtelu on suurta. Tämän vuoksi lujuuskehityksen ja sitomisajan hallinnan vaikeus hankaloittaa joidenkin vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöä. Teollisuus- ja työmaaolosuhteissa vaadittua luotettavuutta ei ole saavutettu muilla kemiallisilla aktivaattoreilla kuin sementtiklinkkerillä. Vaihtoehtoisten sideaineiden reseptiikka saadaan toimimaan laboratorioolosuhteissa, mutta ei muualla luotettavasti. (Leveelahti, 2022)

Lupaava vaihtoehtoinen sideaine on Sveitsissä kehitetty menetelmä, jossa suurin osa sementistä korvataan poltetulla savimineraalilla ja hienonnetulla kalkkikivellä. Sementtiä korvaamalla betonin hiilidioksidipäästöjä saadaan laskettua noin 30 prosentilla verrattuna normaaliin rakennebetoniin. Menetelmässä käytettäviä savimineraaleja ja kalkkikiviä on helposti ja paljon saatavilla lähes kaikkialla maailmassa. Suomen maaperästä löytyvät savimineraalit eivät kuitenkaan sovi tähän tarkoitukseen. (Illikainen)

Vaihtoehtoisten sideaineiden haasteena on raaka-aineiden riittävä saatavuus. Niiden mahdollisuutena on hyödyntää erilaisia teollisuuden sivuvirtoja ja myös jättemateriaaleja. Maasuonikuonaa ja lentotuhkaa voidaan jo helposti hyödyntää normaalissa betonin valmis-

tuksessa, mutta teollisuudessa syntyy runsaasti muitakin kuonia, tuhkia sekä jätemateriaaleja. Vaihtoehtoisten sideaineiden valmistuksessa voidaan hyödyntää käyttämättömiä teollisuuden sivuvirtoja, jotka muuten jäisivät hyödyntämättä. Niiden tutkiminen nähdään ensisijaisen tärkeänä. (Punkki, 2021)

Vaihtoehtoisten sideaineiden käyttöä rajoittaa myös merkittävästi niiden käytön rajoitukset kantavissa rakenteissa. Eurooppalainen standardointi säätelee tarkasti mitä sementti voi sisältää ja mitä raaka-aineita betonissa voidaan käyttää. Tarkan standardoinnin takana on rakentamisen turvallisuuden takaaminen. Ei haluta ottaa pienintäkään riskiä uuden tuntemattoman sideaineen kanssa. Taloudelliset riskit voivat myös olla suuret, jos esimerkiksi kantava rakenne menettää lujuutensa 20 vuoden ikäisenä. Vaihtoehtoinen sideaine voi saada hyväksynnän, vaikka se ei täyttäisikään sementti- ja betonistandardien vaatimuksia, mutta tällaiset prosessit ovat usein raskaita. Keski-Euroopassa on käytössä jonkin verran vaihtoehtoisia sideaineita. (Punkki, 2021)

Vaihtoehtoisten sideaineiden haasteiden vuoksi niiden potentiaalisimmat käyttökohteet ovat ei-kantavissa rakenteissa, kuten erilaisissa betonituotteissa. Ei-kantavissa rakenteissa rajoitukset sideaineen laadulle ovat yleensä lievemmat kuin kantavissa rakenteissa. Vaihtoehtoisilla sideaineilla voidaan saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä yksittäisissä tuotteissa, mutta betonirakentamisen kokonaispäästöihin niillä ei todennäköisesti ole suurta roolia. (Punkki, 2021)

### **3.6 Markkinoilla olevat vähähiiliset betonit**

Vähähiilisten betonien saatavuuteen vaikuttaa muun muassa niiden lujuusluokka, vaadittavat ominaisuudet ja päästöjen vähentämisen suuruus. Esimerkiksi P-lukubetonilaatujen saatavuus on varsin rajoitettua, mutta tyypillisen talonrakennuksen kaikkiin rakenneosiin vähähiilistä betonia on saatavilla ainakin GWP.85 luokassa. (Tompuri, 2022) GWP.85-luokan betoneita on tällä hetkellä hyvin saatavilla myös lisähuokostettuina. Säälle alttiissa parvekkeissa ja julkisivuissa erittäin vähähiilisten betoneiden käyttö ei tällä hetkellä ole todennäköistä. (Lahdensivu, 2022)

Ruduksella on tällä hetkellä laaja valikoima erilaisia vähähiilisiä betoneita. Heiltä löytyy vaihtoehtoja jokaisesta vähähiilisyysluokasta eli GWP.85, GWP.70, GWP.55 ja GWP.40. (Rudus) Vähähiilistä betonia on saatavilla lujuusluokissa C30/37 – C50/60, ja jokaisessa lujuusluokassa on reseptejä, jotka soveltuvat lattioiden, seinien tai muiden erityyppisten rakenteiden valamiseen. (Veikkola-Virtanen, 2019)

Kaikkia vähähiilisyysluokan betoneita on saatavilla rasisitusluokasta riippuen. XF2 ja XF4 rasisitusluokan betoneita on saatavilla GWP.70 luokkaan asti, mutta muita rasisitusluokkia on saatavilla, jos raaka-aineita on tehtaalla. GWP.40 vähähiilisyysluokka on useissa tapauksissa haastava, mutta mahdollinen. Se on varmistettava aina tapauskohtaisesti. Rudus on parhaimmillaan valmistanut C85/95 lujuusluokan vähähiilistä betonia, mikä ei kuitenkaan kuulu BY-vähähiilisyysluokitukseen. (Autio, 2023) Rudus on tuomassa markkinoille uutta CEVO-betonia, joka on vähähiilisyysluokan GWP.40 betonia. CEVO-betonin lujuus on C30/37 ja se kovettuu normaalin betonin tavoin. (Lavento, 2022)



Ruskon betonilta löytyy myöskin betonivaihtoehtoja jokaisesta vähähiilisyysluokasta eli GWP.85, GWP.70, GWP.55 ja GWP.40. Ruskon vähähiilisiä betoneita on käytetty kerrostalojen perustuksissa, nosturin massiiviperustuksessa ja talojen lattioiden valussa. (Veikkola-Virtanen, 2019)

Lujabetonilta löytyy vähähiilistä betonia, jonka hiilidioksidipäästöt ovat jopa 50 prosenttia pienemmät kuin perinteisellä betonilla. Vähähiilisen betonin alkulujuuden kehitys on hieman normaalia betonia hitaampaa loppulujuuden kuitenkin ollessa korkealla tasolla. Lujabetonin vähähiilinen betoni soveltuu monenlaisiin rakennuskohteisiin, kuten talon rakentamisen ja infrarakentamisen eri kohteisiin sekä erityisen hyvin massiivisten rakenteiden betonointiin. Lujabetonilta löytyy myös päästökompensoitua valmisbetonia, jonka hiilidioksidipäästöt ovat nolla. (Veikkola-Virtanen, 2019) Lujabetonin vähähiilisten betonien saatavuus nähdään alla olevasta taulukosta 4.

Taulukko 4 Lujabetonin vähähiilisten betonien saatavuus (Haatainen, 2023)

| Vähähiilinen betoni                    |            |             |             |             |             |       |  |
|--|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|--|
| Lisähinta €/m3 Rakennebetoneille (RN)  |            |             |             |             |             |       |  |
| Lujuus-<br>luokka<br>MN/m <sup>2</sup> | Referenssi | GWP.85      | GWP.70      | GWP.55      | GWP.40      |       |  |
|  | C20/25     | 5,00        | 12,50       | 18,00       | 25,00       | 32,00 |  |
| C25/30                                 | 5,00       | 12,50       | 18,00       | 25,00       | 32,00       |       |  |
| C30/37                                 | 5,00       | 12,50       | 18,00       | 25,00       | Kohteittain |       |  |
| C35/45                                 | 5,00       | 12,50       | 18,00       | 25,00       | X           |       |  |
| C45/55                                 | 5,00       | Kohteittain | Kohteittain | Kohteittain | X           |       |  |
| C50/60                                 | 5,00       | Kohteittain | Kohteittain | Kohteittain | X           |       |  |
| P0                                     | 5,00       | 12,50       | 18,00       | Kohteittain | X           |       |  |
| P30                                    | 5,00       | 12,50       | 23,00       | X           | X           |       |  |
| P50                                    | 5,00       | 12,50       | X           | X           | X           |       |  |

Referenssitasona takaamme maksimissaan määritellyn referenssitason päästötason.  
 Kohteittain = kohdekohtainen hinnoittelu. Saatavuus tarkistettava tehtaalta / myynnistä.  
 X = ei tällä hetkellä saatavilla.  
 P-luku, GWP.55 ja GWP.40 luokissa laadunarvostelulikä aina 91d.  
 Luokittelu perustuu Betoniyhdistyksen määrittelemään luokitteluun. Lisätietoa: <https://vahahiilinenbetoni.fi/>  
 Hinnoittelu koskee myös huokoistettuja betoneita, tällöin hintaan lisätään XF-lisä sekä P-lukubetoneissa P-lukulisä sekä muissa rasitusluokissa kyseistä rasitusluokkaa koskeva lisä.  
 Kysy tarkempia tietoja alueesi myynnistä.

Swerrockilla on mahdollisuus toimittaa käytännössä kaikissa vähähiilisyysluokissa olevia betoneita. Käytännössä vähähiilisyysluokan täyttämisen ei aseta rajoituksia rasitusluokkien täyttämiseen. Ainoastaan P-lukubetoneissa tiukimpien rasitusluokkien ja tiukimpien GWP-luokkien täyttämisen samaan aikaan on haasteellista. Swerrockin saatavuus rasitusluokkien suhteen vastaa aika hyvin taulukossa 9 nähtäviä saatavuusarvioita. (Junnila, 2023)

Finnsementti on tuonut markkinoilla vähäpäästöisiä sementtejä. Sen valmistama kolmois-sementti on CEM III/A-tyyppinen sementti, jossa seosaineena hyödynnetään masuunikuonaa. Kolmoissementin hiilidioksidipäästöt ovat 50 prosenttia alhaisemmat kuin perinteisellä portlandsementillä. (Veikkola-Virtanen, 2019) Finnsementti on myös tuomassa vuoden 2023 aikana markkinoille CEM III/B-tyyppistä sementtiä, jonka hiilidioksidipäästöt ovat vielä pienemmät.

## 4 Vähähiilisen betonin ominaisuudet

### 4.1 Yleistä

Vähähiilisen betonin käyttäminen rakennushankkeessa vaatii aina keskustelua rakennushankkeeseen ryhtyvän kanssa, sillä vähähiilinen betoni toteutetaan yleensä korvaamalla sementtiä masuunikuonalla tai lentotuhkalla. (Lahdensivu, 2022) Korkeampi loppulujuus ja hitaampi lujuuskehitys, erityisesti viileissä olosuhteissa, on ominaista vähähiiliselle betonille seosaineiden vuoksi (Vähähiilinen betoni). Hitaammalla lujuuskehityksellä on vaikutusta rakentamisen, suunnittelun ja hankinnan aikatauluihin (Lahdensivu, 2022).

Kovettumisolosuhteiden hallinta on erityisen tärkeää käytettäessä vähähiilisiä valmisbetoneita työmaalla. Olosuhteita voidaan hallita muun muassa suojaamalla valut kylmältä tai lämmittämällä kovettuvaa betonia. (Vähähiilinen betoni) Vähähiilisen betonin mahdollinen hitaampi lujuudenkehitys ei elementtirakentamisessa vaikuta suoraan työmaan aikatauluun, mutta se vaikuttaa hankinta- ja suunnittelu-aikatauluihin. Aikatauluvaikutusten vuoksi kaikkien osapuolien rakennushankkeessa tulee sitoutua alussa määriteltyihin vähähiilisyystavoitteisiin. (Lahdensivu, 2022)

### 4.2 Rasitusluokat ja säilyvyysominaisuudet

Betonin lujuus- ja työstävyysominaisuuksien lisäksi betonirakenteiden suunnittelussa ja rakentaessa tulee ottaa huomioon betonin säilyvyyteen vaikuttavat tekijät. Säilyvyydellä tarkoitetaan betonirakenteen kyvykkyyttä säilyttää toiminnalliset ominaisuudet ulkoisissa rasituksissa läpi ennalta rajatun ajanjakson eli suunnittelukäyttöiän. Suunnittelukäyttöikä on ajanjakso, jonka aikana betonirakenteen ominaisuudet valitulla todennäköisyydellä pysyvät rakenteelta vaadittavalla tasolla olettaen, että siitä pidetään asianmukaisesti kunnossa. Tavallisesti suunnittelukäyttöikä arvioidaan 95 prosentin varmuustasolla hyödyntäen log-normaalista-jakaumaa. Esimerkiksi kun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta, 5 prosenttia rakennuksesta voi vaurioitua ennen 50:tä ikävuotta, puolet rakennuksesta kestää lähes 150 vuotta ja pitkäikäisimmät rakennuksen kohdat noin 300 vuotta. (Betonitieto)

Suunnittelukäyttöikä on käytännössä ajanjakso, jonka rakenne kestää ilman korjaustarvetta olettaen, että rakennetta huolletaan. Suunnittelukäyttöiän ylittyttyä rakennuksen käyttöikä voidaan jatkaa korjaustoimenpiteillä. Rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan rakennukselle valitaan käyttöikäsuunnittelussa tavoiteikä, jonka mukaan suunnittelija määrittelee rakennuksen suunnittelukäyttöiän. Tärkeimmille rakennusosille valitaan kullekin omat suunnittelukäyttöiät. Pidemmän ajan valinnalla vaurioiden todennäköisyyttä voidaan olennaisesti pienentää. (Betonitieto)

Suunnittelija määrittelee suunnittelukäyttöiän lisäksi rakenteiden rasitusluokat. Rasitusluokka kuvaa millaisiin ympäristöolosuhteisiin rakenne joutuu käyttöiän aikana. Suunnittelukäyttöiän vaatimusten täyttyminen todetaan epäsuorasti betonin laatua koskevien parametrien, rakennemittojen ja muiden käyttöikään vaikuttavien tekijöiden avulla. (Betonitieto) Käyttöikä ja rasitusluokka vaikuttavat esimerkiksi betonin vähimmäislujuuteen ja vähimmäissementtimäärään (SFS 7022, 2019).

Suunnittelijan tehtävänä on valita betonirakenteen rasisitusluokka rasisitustekijöiden suhteen. Rasisitustekijöitä ovat:

1. karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio
2. kloridin aiheuttama korroosio
3. merivedessä olevien kloridien aiheuttama korroosio
4. jäätymis-/sulamisrasitus
5. kemiallinen rasisitus

Rasisitusluokka valitaan ympäristönolosuhteiden mukaan ja betonirakenteella voi olla monta eri rasisitusluokkaa. (Suomen betoniyhdistys, 2019, s. 16). Ei korroosiota tai syöpmisen riskiä on rasisitusluokka X0. Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio on rasisitusluokat XC1, XC2, XC3 ja XC4. Kloridien aiheuttama korroosio, kloridit muualta kuin merivedestä on rasisitusluokat XD1, XD2 ja XD3. Kloridien aiheuttama korroosio, kloridit merivedestä on rasisitusluokat XS1, XS2 ja XS3. Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä on rasisitusluokat XF1, XF2, XF3 ja XF4. Kemiallinen rasisitus on rasisitusluokat XA1, XA2 ja XA3. (SFS-EN 206, 2021) Rasisitusluokat vaikuttavat siihen, mitä sementtityyppiä betonissa voidaan käyttää (SFS 7022, 2019).

Betonirakenteen rasisitusluokan tulee mahdollisimman hyvin vastata ympäristön todellisia rasisituksia ja olosuhteita. Rasisitusluokkaa ei tule ylimitoittaa, koska se kasvattaa rakentamisen kustannuksia. Tarpeettoman ankarat rasisitusluokat voivat lisäksi aiheuttaa betonin muiden ominaisuuksien heikentymistä ja siten kokonaisuutena huonontaa rakenteen laatua. Vaatimustasoa alhaisempi vesi-sementtisuhdevaatimus voi tehdä betonin siirrosta ja valusta hankalaa. Myöskin rakenteen halkeiluriski saattaa kasvaa autogeenisen kutistumisen tai betonin liiallisen lämpiämisen johdosta. (Suomen betoniyhdistys, 2017, s.13)

Siihen kuinka betonirakenne säilyttää lujuutensa, muotonsa ja laatunsa suunnittelukäyttöään ajan vaikuttavat betonin koostumus, betonirakenteen valmistustekniikka ja betonirakennetta ympäröivä olosuhde. Suunnittelu- ja rakennusvaiheessa tulee ottaa huomioon eri rasisitustekijät, jotka voivat heikentää betonirakenteen säilyvyysominaisuuksia kohdistumalla itse betoniin tai betonirakenteen raudoituksiin. Tulee muistaa, että betonirakenne harvoin vaurioituu ainoastaan yhden yksittäisen tekijän aiheuttamana. (Betonitieto)

Vähähiilisen betonin rasisitusluokkiin ja säilyvyysominaisuuksiin vaikuttaa betonissa käytetyt seosaineet. Paljon käytetty masuunikuona esimerkiksi parantaa betonin kemiallista kestävyyttä ja tiivyyttä, mutta huonontaa betonin pakkassuolakestävyyttä. Vähähiilistä betonia on turvallista käyttää ainakin rasisitusluokissa X0, XC1 ja XC2, eli säältä suojaossa olevissa rakenteissa ja perustuksissa. (Lahdensivu, 2022)

SFS 7022 standardiin ollaan tekemässä tällä hetkellä 2023 päivitystä. Päivityksessä CEM III/A-tyyppiset sementit sallitaan myös rasisitusluokissa XF2 ja XF4. Tämä mahdollistaa CEM III/A sementin käytön kaikissa rasisitusluokissa betoninormien mukaisessa betonin valmistuksessa. Esimerkki tämän hetken saatavilla olevasta CEM III/A sementistä on Finnsementin kolmoissementti. (Heikkilä, 2022)

Pakkassuolarasisitusluokkia lukuun ottamatta masuunikuonasementin säilyvyysominaisuudet ovat yhtä hyviä tai jopa parempia kuin muilla sementtilaaduilla. Kuonasementillä voidaan estää alkalikiviainesreaktio. Kuonasementtibetonin kloriditunkeumavastus on suuri sekä kemiallinen kestävyys erittäin hyvä. (Heikkilä, 2022)

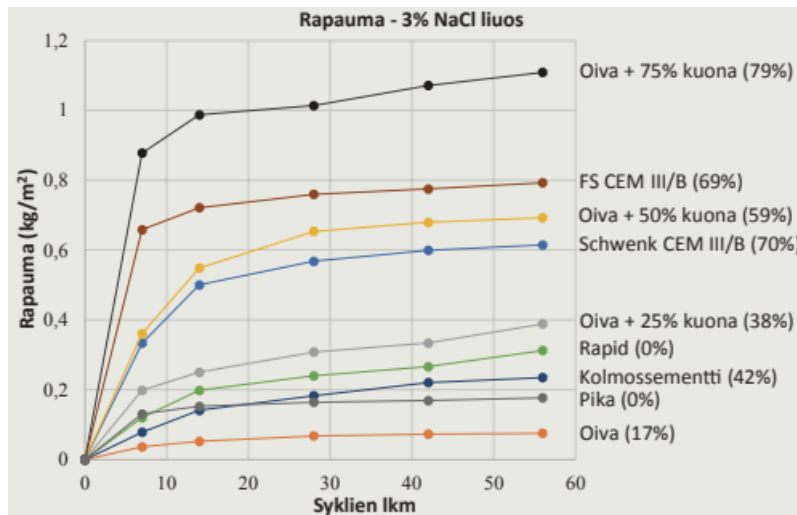
Iqbal (2022) tutki diplomityössään vähähiilisen betonin säilyvyysominaisuuksia. Tutkimus koostui yhdeksästä betonista, joissa käytettiin eri sideaineita. Betoneissa käytetyn sideaineen masuunikuonamäärät vaihtelivat 0 prosentista 79 prosenttiin. Betonien vesi-sideainesuhde (0,45) ja kiviaineisten määrä pidettiin vakiona. Tavoiteilmamäärä oli 5,0 prosenttia ja painuma 150 millimetriä. Betonin notkeutta säädettiin tarvittaessa tehonotkistimen avulla. Betonien koostumukset nähdään taulukosta 5.

Taulukko 5 Koebetonien koostumus Iqbalin kokeissa

| Tunnus      | Sideaineet                               | Sementti (kg/m <sup>3</sup> ) | Kuonajauhe (kg/m <sup>3</sup> ) | Kuonan osuus sideaineesta (%) | Tehonotkistin (%) sideaineen painosta |
|-------------|--|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| C-I-0       | Pika (CEM I 52,5 R)                      | 430                           | 0                               | 0                             | 0,35                                  |
| C-II-A-0    | Rapid (CEM II/A-LL 42,5 R)               | 430                           | 0                               | 0                             | 0,18                                  |
| C-II-B-0    | Oiva (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)          | 430                           | 0                               | 17                            | 0,18                                  |
| C-II-B-25   | Oiva + 25 % kuona                        | 323                           | 107                             | 38                            | 0,12                                  |
| C-II-B-50   | Oiva + 50 % kuona                        | 215                           | 215                             | 59                            | 0,06                                  |
| C-II-B-75   | Oiva + 75 % kuona                        | 107                           | 323                             | 79                            | 0,00                                  |
| C-III-A-0   | Kolmossementti (CEM III/A 52,5 L)        | 430                           | 0                               | 42                            | 0,10                                  |
| C-III-B-0   | Finnssementti CEM III/B (CEM-III/B 42,5) | 430                           | 0                               | 69                            | 0,00                                  |
| C-III-B-L-0 | Schwenk CEM III/B (CEM-III/B 32,5 N)     | 430                           | 0                               | 70                            | 0,00                                  |

Pakkasenkestävyys testattiin laattakokeella. Pakkassuolakestävyys testattiin CEN/TS 12390-9 mukaisesti ja pakkasenkestävyys ilman klorideja CEN/TR 15177 mukaisesti. Testeissä määritettiin koekappaleiden rapauma ja suhteellinen dynaaminen kimmomoduuli. Koekappaleita vanhennettiin CO<sub>2</sub>-kammiossa, jonka jälkeen määriteltiin koekappaleiden karbonatisoitumissyvyys ja niille tehtiin laattakokeet. Betonien säilyvyysominaisuuksia myöskin arvioitiin kapillaarisen vedelläimu- ja painekyllästyskokeen avulla. (Iqbal & ym., 2022)

Iqbalin (2022) pakkassuolakokeiden rapautumisen tulokset on esitetty kuvassa 13. Tuloksista nähdään, että pakkassuolakestävyys laskee masuunikuonan prosenttiosuuden kasvaessa. Betoninormien BY65 rapautumisarvot rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaihtelevat välillä 0,25...0,65 kg/m<sup>2</sup>, kun taas P-lukubetonien rapautumisarvot ovat vielä tiukemmat. Iqbalin (2022) saamat tulokset seuraavat ohjeistusta, jonka mukaan 50 prosentin masuunikuonan osuus on kriittinen pakkassuolakestävyuden kannalta. Koekappaleet, joissa oli masuunikuonaa yli 50 prosenttia sideaine määrästä, antoivat selvästi suuremmat rapauma-arvot kuin alla 50 prosenttia masuunikuonaa sisältävät sideaineet.



Kuva 13 Pakkassuolakokeiden rapaumatulokset (Iqbal & ym., 2022)

Iqbal (2022) tutki pakkassuolakestävyuden lisäksi pakkasenkestävyyttä. Kaikki tutkitut betonit täyttivät betoninormeissa BY65 raja-arvot pakkasenkestävälle betonilla. Tutkimuksen perusteella vanhentamisen vaikutus pakkasenkestävyyteen on vähäinen ja useammalle betonille vanhentaminen paransi kokeen tuloksia. Masuunikuonan määrällä ei ole siis kriittistä vaikutusta betonin pakkasenkestävyyteen. Masuunikuonaa sisältävää vähähiilistä betonia voidaan käyttää pakkasrasituksessa.

Iqbalin (2022) kokeissa koekappaleiden karbonatisoitumissyvyys mitattiin vanhentamiskokeen yhteydessä. Hänen tulosten perusteella masuunikuona kasvattaa selkeästi betonin karbonatisoitumista. Suuren masuunikuonan määrän sisältävien koekappaleiden karbonatisoitumissyvyys oli kaksi kertaa suurempi kuin koekappaleiden, jotka eivät sisältäneet ollenkaan masuunikuonaa.

Masuunikuona heikensi selvästi betonin pakkassuolakestävyyttä Iqbalin (2022) kokeissa. Koekappaleiden vanhentaminen kasvatti rapauma-arvon moninkertaiseksi, jonka perusteella on tärkeää tutkia tarkemmin karbonatisoitumisen vaikutuksia masuunikuonabetonien pakkassuolakestävyteen. Masuunikuonan määrällä on voimakas vaikutus betonin P-lukuun, jonka Iqbalin (2022) koetulokset vahvistavat. Työssä havaittiin, että korkeampien P-lukujen saavuttaminen masuunikuonabetoneilla tulee olemaan haastavaa. Masuunikuonaa tulee erityisesti pakkassuolarasitetuissa rakenteissa käyttää harkiten.

Vähähiilistä betonia valmistetaan tällä hetkellä pääosin käyttämällä masuunikuonaa sementin sijasta. SFS 7022 (2019) standardin mukaisesti masuunikuonaseossementtiä, jonka masuunikuonan määrä voi olla jopa 80 prosenttia sideainemäärästä, voidaan käyttää XF2- ja XF4-rasitusluokkia lukuun ottamatta kaikissa rasitusluokissa. Muita seosaineita ei voida betonissa käyttää niin suurina määrinä kuin masuunikuonaa.

Kaikki rasitusluokat voidaan toteuttaa vähähiilisellä betonilla, kunhan pysytään standardin rasitusluokkien sideaineseoksien puitteissa. Rajoituksia tulee eniten pakkassuolarasituksista (XF2 ja XF4) koska niissä on tiukimmat rajoitukset sallituista seostussuhteista. (Autio, 2023)

### 4.3 Lujuuskehitys

Betonin kriittisin rakennetekninen ominaisuus on kyky kestää suuria puristusrasituksia. Puristuslujuuden perusteella betoni luokitellaan lujuusluokkiin. Suunnittelussa käytetyt mekaaniset ominaisuudet saadaan lujuusluokan perusteella. Puristuslujuus on helppoa testata ja monet betonin ominaisuudet kuten vetolujuus, taivutusvetolujuus, kimmokerroin ja säilyvyys ovat siihen verrannollisia. (Betonitieto)

Puristuslujuus arvioidaan yleensä 28 vuorokauden iässä, mutta myös 91 vuorokauden ikä on mahdollinen. Lujuusarvot betonille ilmoitetaan tavallisesti täysin kehittyneistä lujuuksista eli standardiolosuhteissa (20°C) säilytetyistä betonikappaleiden lujuustestituloksista. Betonin puristuslujuus määritellään eurokoodin mukaisesti joko lieriökokeella tai kuutiokokeella saaduista puristuslujuuskoetuloksista. (Betonitieto)

Nuoren betonin lujuutta halutaan arvioida muun muassa siksi, että tiedetään, milloin rakenteen muotti voidaan purkaa ja millaisia riskejä on betonin varhaisvaiheen halkeilulle. Betonin lujuudenkehitysnopeuteen vaikuttavat sementin tyyppi ja mahdollisesti käytetyt seosaineet, betonin lämpötila sekä jälkihoito-olosuhteet. Lujuudenkehitystä voidaan arvioida käyttämällä tietokonesovelluksia, joilla voidaan arvioida lujuudenkehitystä etukäteen tai laskea määrättyllä hetkellä rakenteesta mitattujen lämpötilojen avulla sen hetkinen betonin lujuus. (Betonitieto)

Muottipurkulujuuden lisäksi työmaalla ja elementtituotannon kannalta on tärkeää tietää betonin jäätymlujuus. Jäätymlujuus on betonin lujuus, jonka saavuttamisen jälkeen betoni voi jäätyä kerran tai muutaman kerran ilman että se vaurioituu niin paljon, että kehittyvä hydratoituminen ei voisi korjata vaurioita. Talvibetonoinnissa tämä siis tarkoittaa sitä, että rakenneosan lämmittäminen voidaan lopettaa, mutta muottia ei voida purkaa ennen kuin muottipurkulujuus on saavutettu. Jäätymlujuuden minimiarvo on 5,0 MPa riippumatta betonin lujuusluokasta. (Betonitieto)

Muottien tukirakenteet voidaan purkaa, kun voidaan todentaa betonin kovettuneen niin paljon, että rakenteet kestävät niille tulevat rasitukset mahdollisten varatukien kanssa ja rakenteeseen ei synny liian suuria muodonmuutoksia. Betonin lujuuden tulee olla vähintään 60 prosenttia nimellislujuudesta eli lujuusluokasta. Lujuus voi mahdollisesti olla eri, jos niin on suunnitelmissa tai muulla erillisellä selvityksellä esitetty. Muottipurkulujuus voidaan osoittaa laskelmilla. Rakenteen toimiessa muotin purkuvaiheessa samalla tavalla kuin valmiina, on mahdollista hyödyntää samoja laskumenetelmiä kuin valmiin rakenteen laskelmia tehtäessä. Riittää kun lasketaan kuinka suuri osuus suunnittelukuormista kuormittaa rakennetta muottien purkuvaiheessa. (Betonitieto)

Suurin osa vähähiilisistä betoneista perustuu sementin korvaamiseen masuunikuonalla. Masuunikuonan käyttö vääjäämättä hidastaa betonin lujuudenkehitystä. Lujuudenkehitys ja betonin sitoutuminen ovat riippuvaisia kemiallisista reaktioista, jotka tapahtuvat kahden ensimmäisen vuorokauden aikana. Hitaampi lujuudenkehitys aiheuttaa haasteita vähähiilisen betonin käytölle sekä työmaalla että elementtiteollisuudessa. Masuunikuonalla on kuitenkin positiivinen vaikutus loppulujuuteen, joka on yleensä korkeampi kuin esimerkiksi CEM I-tyyppin sementeillä. (Orfanoudaki & ym., 2022) Betonin lujuudenkehitys riippuu voimakkaasti lämpötilasta, sementtityypistä ja vesi-sementtisuhteesta (Suomen betoniyhdistys, 2017).

Kun sideainemäärästä masuunikuonaa on 25 prosenttia, betoni saavuttaa 28 vuorokauden iässä vertailubetonin lujuuden (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019). Masuunikuonan määrän ollessa yli 40 prosenttia sideainemäärästä betonin lujuudenkehitykselle on suositeltavaa varata mahdollisuuksien mukaan 91 vuorokautta normaalin 28 vuorokauden sijaan. Pidempi lujuudenkehitysaika on erityisen tärkeää huomioida kylmissä olosuhteissa, sillä lämpötilan laskeminen hidastaa hydrataatiota. (Tompuri, 2022) Kylmissä olosuhteissa käytettävät sementit ovat yleensä nopeasti kovettuvia matalan lämpötilan vuoksi (Miettinen, 2021). Masuunikuonaa sisältävän betonin lämpökäsittely nostaa varhaislujuutta. Lämpökäsittely ei kuitenkaan aiheuta niin suurta loppulujuuden lujuskatoa kuin normaalille rakennebetonille. (Masuunikuonajauhe KJ400, 2019)

Finnsementin markkinoille tuoma kolmossementti CEM III/A 52,5 L sisältää masuunikuonaa noin 40–45 prosenttia sideainemäärästä. Sen alkulujuudenkehitys on melko samanlainen kuin portlandsementillä sen pienemmän vedentarpeen vuoksi. (Miettinen, 2021) Kolmossementin vuorokauden lujuus on samaa tasoa kuin Oiva-sementillä CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (Heikkilä, 2022). Kolmossementillä muotti voidaan purkaa kolmen vuorokauden kohdalla, joka on tavanomainen purkuvauhti holveille. Kolmossementillä voidaan valmistaa rakenteita kesällä samalla tavalla kuin muillakin sementeillä. (Rytsy & Härkönen, 2022) Tarvittavan alkulujuuden saavuttaminen elementtituotannossa vaatii toimenpiteitä jälkihoidon suhteen (Heikkilä, 2022).

Kolmossementin antama alkulujuus on riittävä kaikkeen valmisbetonirakentamiseen. Kolmossementin 2 vuorokauden lujuus on noin 21 MPa ja 28 vuorokauden keskimäärin 59 MPa. Kolmossementin hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin jopa 40 prosenttia alhaisemmat kuin CEM I-sementillä, jolloin sillä voidaan saavuttaa vähähiilisyysluokan GWP.70 betonireseptejä. (Mattila, 2022)

Esimerkiksi Ruduksella vähähiilisyysluokan GWP.85 ja GWP.70 betonit arvostellaan 28 päivän ikäisinä (Autio, 2023). Tällä hetkellä Rudukselta löytyvien vähähiilisyysluokkaa GWP.55 ja GWP.40 olevien betonilaatujen lujuuskehitys on hitaampaa kuin normaalin rakennebetonin. Alhaisempaa lujuuskehitystä voidaan käyttää massiivirakenteissa, joissa muuten ongelmana voisi olla rakenteen ylikuumentuminen betonin lujuusreaktion aikana. (Veikkola-Virtanen, 2019) Rudus on tuomassa markkinoille uutta CEVO-betonia markkinoille, jonka vähähiilisyysluokitus on GWP.40 ja lujuusluokka C30/37. CEVO-betonin lujuuskehitys on samaa luokkaa tai jopa nopeampaa kuin tavallisen rakennebetonin. Sen muotipurkulujuus saavutetaan pääosin vuorokaudessa. (Lavento, 2022)

Orfanoudaki (2022) tutki diplomityössään CEM III/A ja CEM III/B-tyyppisten kuonasementtien lujuudenkehityksen kiihdyttämistä kiihdyttimillä. Tavoitteena oli saada vastaava lujuudenkehitys kuin CEM II/B-tyypin sementillä. Diplomityössä käytetyt sementit nähdään taulukosta 6 ja käytettyjen kiihdyttimien ominaisuudet taulukosta 7.



Taulukko 6 Käytetyt sementit ja niiden kuonamäärät (Orfanoudaki & ym., 2022)

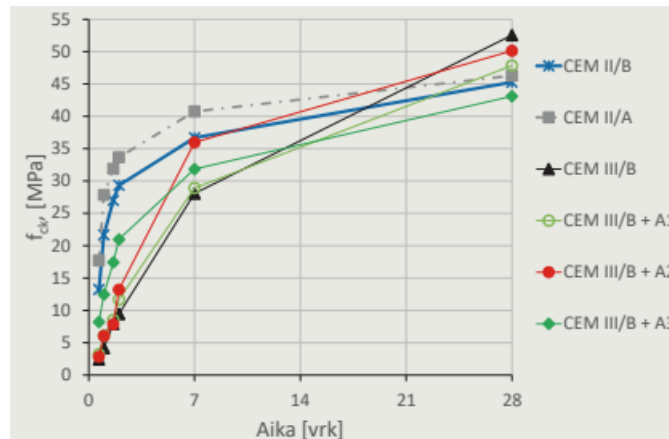
| Sementti                   | Kuonamäärä (%) |
|----------------------------|----------------|
| CEM I (Pika)               | 0              |
| CEM II/A (Rapid)           | 0              |
| CEM II/B (Oiva)            | 17             |
| CEM III/A (Kolmossementti) | 42             |
| CEM III/B                  | 70             |

Taulukko 7 Kiihdyttimien perusominaisuudet (Orfanoudaki & ym., 2022)

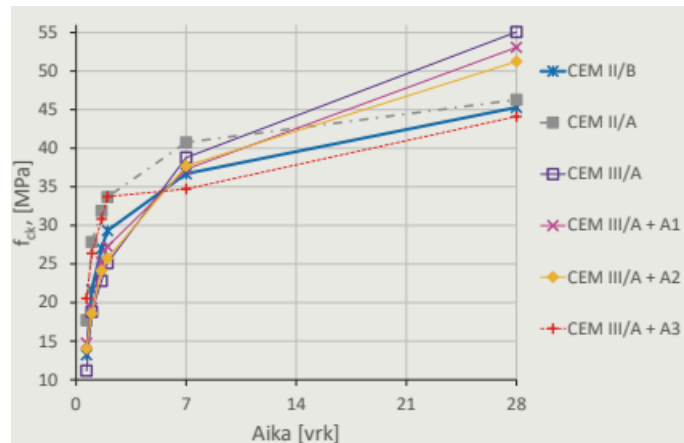
| Kiihdytin | Veden osuus [%] | Tiheys [g/cm <sup>3</sup> ] |
|-----------|-----------------|-----------------------------|
| A1        | 79,2            | 1,13                        |
| A2        | 51,9            | 1,53                        |
| A3        | 0               | 1,59                        |

Orfanoudakin (2022) tutkimuksissa kiihdyttimen lisääminen betoniseoksiin aikaisti hydrataatiopiikin ajankohtaa, mutta kiihdytin ei kasvattanut maksimilämpötilaa betonissa. CEM III/A-tyyppin sementillä oli selvästi voimakkaampi piikki hydratiolämmössä kuin CEM III/B-tyyppin sementillä, mikä on oletettavaa eri masuunikuonan osuuksien vuoksi. Vastaavat lämmöntuottotulokset CEM III/A-tyyppin sementin ja CEM II/B-tyyppin sementin välillä saavutettiin käyttämällä kiihdytintä A1.

Orfanoudakin (2022) betonikokeissa vesi-sideainesuhde oli 0,40 ja sementtimäärä 430 kg/m<sup>3</sup>. Koekappaleiden lujuudet mitattiin 16, 24, 39 ja 48 tunnin ikäisinä käyttäen 150 millimetrin kuutioita. Lisäksi määritettiin puristuslujuus 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä käyttäen 100 millimetrin kuutioita. Tulokset korjattiin vastaamaan 150 millimetrin kuutiolujuuksia. Kuvasta 14 nähdään lujuudenkehitys CEM III/B-tyyppin sementillä ja kuvasta 15 CEM III/A-tyyppin sementillä.



Kuva 14 Lujuudenkehitys CEM III/B-sementillä eri kiihdyttimillä (Orfanoudaki & ym., 2022)

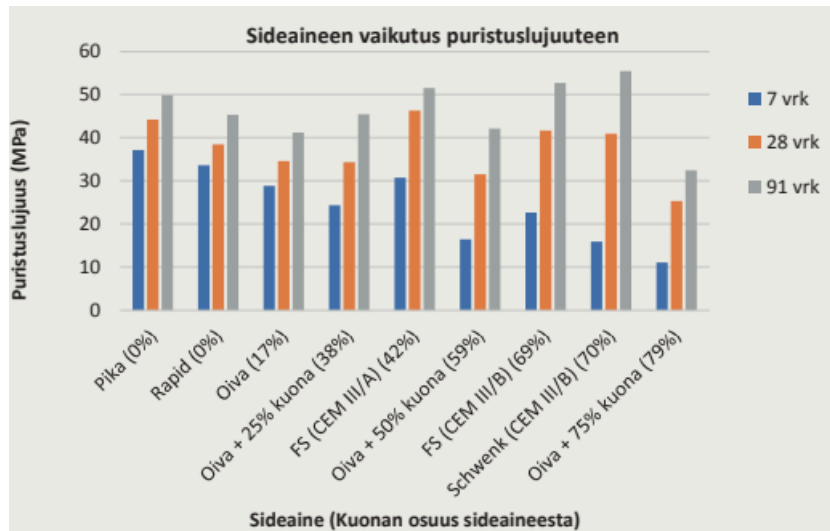


Kuva 15 Lujuudenkehitys CEM III/A-sementillä eri kiihdyttimillä (Orfanoudaki & ym., 2022)

Ainoastaan kiihdyttimellä A3 saavutettiin parannus betonikoekappaleiden alkulujuuteen alle kahden vuorokauden ikäisinä, mutta A3 kiihdytin laski 7 ja 28 vuorokauden lujuuksia. Kiihdytin A3 kasvatti sementillä CEM III/A alkulujuudet sementin CEM II/A tasolle, mutta 7 ja 28 vuorokauden lujuuksissa jäätin alemmalle tasolle. Kiihdytin A3 lähes tuplasi CEM III/B sementillä valmistetun betonin alkulujuuden verrattuna samaiseen sementtiin ilman kiihdytintä. CEM III/B sementillä jäätin kiihdyttimen kanssa alle sementin CEM II/B tason. (Orfanoudaki & ym., 2022)

Orfanoudakin (2022) tutkimusten perusteella kiihdyttimen avulla voidaan kiihdyttää CEM III/A. ja CEM III/B-sementtien hydraatioita, mutta kiihdyttimellä ei ole juurikaan vaikutusta maksimilämpötiloihin. Diplomityössä käytetyistä kiihdyttimistä yhdellä oli selkeästi vaikutusta alkulujuuksiin, mutta se laski lujuuksia 7 ja 28 vuorokauden ikäisillä testikappaleilla. Kiihdyttimen avulla CEM III/A-sementin alkulujuus saatiin kiihdytettyä CEM II/B-sementin tasolle. Kiihdyttimillä on siis positiivisia ja negatiivisia vaikutuksia betonien lujuudenkehitykseen.

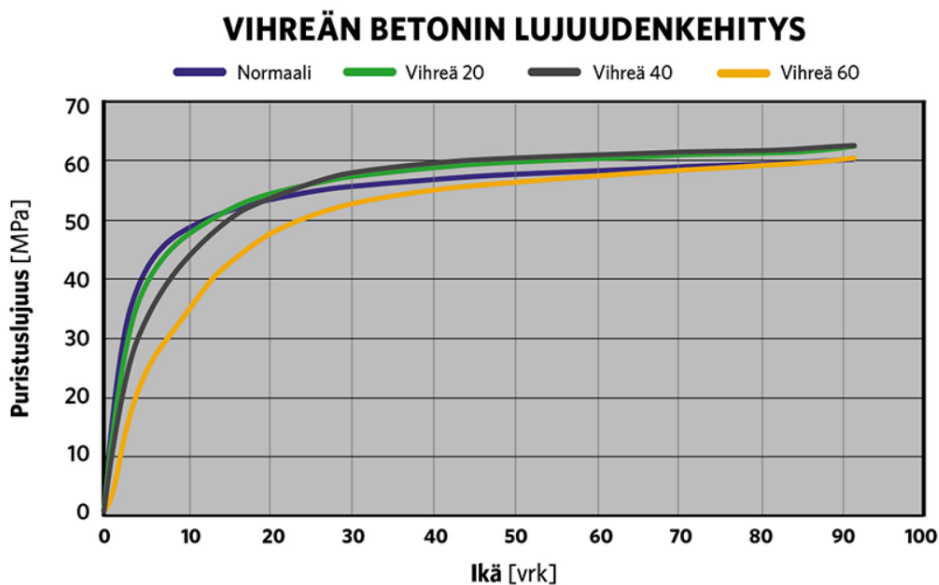
Iqbal (2022) tutki diplomityössään vähähiilisen betonin säilyvyysominaisuuksia. Tutkimus koostui yhdeksästä betonista, joissa käytettiin eri sideaineita. Tutkimusta käsiteltiin tarkemmin jo kappaleessa 4.2. Iqbal testasi betonikoekappaleiden puristuslujuuden 7, 28 ja 91 vuorokauden ikäisinä käyttäen 100 millimetrin koekuutioita. Puristuslujuuksien tulokset nähdään kuvasta 16. Iqbalin tuloksista nähdään, että puristuslujuus 7 vuorokauden ikäisenä laski masuunikuonamäärän kasvaessa. Poikkeuksena mittaustuloksissa oli kolmossementti, jolla saavutettiin jo varsin korkea lujuus 7 vuorokauden ikäisenä. Korkein puristuslujuus 28 vuorokauden ikäisenä saavutettiin kolmoissementillä ja muutenkin masuunikuonamäärän vaikutus 28 vuorokauden kohdalla oli jo vähäisempi. CEM III/B-typin sementeillä saavutettiin korkeimmat lujuudet 91 vuorokauden ikäisenä.



Kuva 16 Sideaineen vaikutus betonin puristuslujuuteen Iqbalin (2022) kokeissa

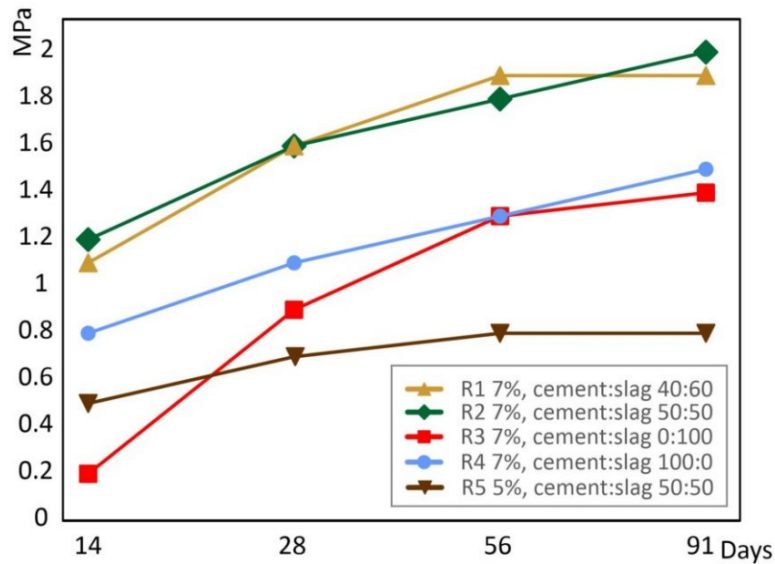
Iqbalin (2022) kokeissa lujuuksiin vaikutti myös sementin erilaiset normaalilujuudet, jotka vaihtelivat välillä 32,5...52,5 MPa. Iqbalin (2022) tulosten perusteella voidaan huomata masuunkuonan hidastava vaikutus lujuudenkehitykseen. Masuunkuonan tehokkuuskerroin loppulujuuden suhteen on kuitenkin korkea. Korkein loppulujuus saavutettiin masuunkuonamäärän ollessa 70 prosenttia sideaineen määrästä.

Vähähiilisen betonin lujuudenkehitykseen vaikuttaa seosaineiden hitaampi lujuudenkehitys ja sideaineoptimointi. Ruduksen vähähiilisten betoneiden lujuudenkehityksiä eri vähähiilisyysluokilla nähdään kuvasta 17. Esimerkiksi GWP.70 vähähiilisyysluokan betonia voidaan lämpimissä olosuhteissa hyödyntää normaalin rakennebetonin tavoin, sillä se kovettuu lopulliseen lujuuteensa vain hieman hitaammin kuin normaali rakennebetoni. Vähähiilisyysluokan GWP.40 betonin lujuudenkehitys on hitaampaa ja sille tulee käyttää lujuudenvarmistusikää 91 vuorokautta. Sitä voidaan parhaiten käyttää erikoisratkaisuksi massiivisiin rakenteisiin, kuten sillankansiin tai holvien palkkeihin. (Rudus Pro, 2021)



Kuva 17 Ruduksen vihreän betonin lujuuskehitys (Rudus Pro, 2021)

Solismaa ym. (2021) testasivat kokeissaan erilaisia kaivostäyttöreseptien lujuudenkehityksiä. Resepteinä käytettiin erilaisia sementin ja kuonan suhteita. Sideaineprosentti oli R1-R4 resepteissä 7 prosenttia ja R5 reseptissä 5 prosenttia. Sementti-kuona-suhteet olivat R1 (40:60), R2 (50:50), R3 (0:100), R4 (100:0) ja R5 (50:50). Koekappaleiden puristuslujuudet testattiin ensimmäisen kerran 14 vuorokauden ikäisenä. Puristuslujuusmitausten tulokset nähdään kuvassa 18.



Kuva 18 Puristuslujuudet Solismaan & ym. (2021) kokeissa

Solismaan ym. (2021) puristuslujuuskokeiden tulosten perusteella sementin osittainen korvaaminen kuonalla (näytteet R1 ja R2) paransi koemateriaalien lujuusominaisuuksia. Kokeesta huomataan, että sementin korvaaminen kokonaan masuunikuonalla heikentää varhaislujuutta, mutta 56 vuorokauden ikäisenä puristuslujuus on samaa luokkaa kuin pelkkää sementtiä sidosaineena sisältänyt resepti. Solismaan ym. (2021) tulosten perusteella sementin korvaaminen kokonaan masuunikuonalla voi olla mahdollista, jos nopeaa kovettumista ei tarvita.

#### 4.4 Kuivuminen

Betonin kuivumisella voi olla huomattava vaikutus työmaan aikatauluun ja toimintaan. Kuivumisen merkitys kasvaa nopeutuvan rakennustuotannon, kuten tahtituotannon, myötä. Kuivumisongelmat ovat varsin nähtävillä betonin päällystämässä, jossa päällystysmateriaali voidaan asentaa vasta, kun vaadittu betonin kuivuus on saavutettu. Betoniin jäävä kosteus ei pääse haihtumaan esimerkiksi muovimaton tai parketin lävitse, minkä vuoksi pintarakenne tai sitä kiinnipitävä liima alkaa vaurioitua. Tästä syntyy huonoimillaan ihmisen terveydelle haitallisia mikrobeja ja kemiallisia emissioita. (Järvinen, 2022)

Betonia valettaessa sen suhteellinen kosteus on noin 100 prosenttia. Betonilaadusta riippuen betonin kosteuspitoisuus painoprosenttina voi valuttaessa vaihdella muutamasta prosentista jopa 15 prosenttiin. Betonin kovettuessa tapahtuu kemiallista kuivumista. Kemiallisessa kuivumisessa valmistuksessa käytetty seosvesi sitoutuu kemiallisesti sementin hydratoitumisreaktioissa. Kemiallisen kuivumisen suuruuteen vaikuttaa betonin vesi-

sideainesuhde. Mitä alhaisempi suhde on, sitä suurempi on kemiallisen kuivumisen osuus kokonaiskuivumisesta. Kemiallisesti sitoutuneen veden määrä normaaleilla rakennebetoneilla on kuitenkin yleensä niin alhainen, että kemiallinen kuivuminen laskee betonin suhteellisen kosteuden vain noin 98 prosenttiin. (Betonitieto)

Betonin kuivuminen vaatii kemiallisen kuivumisen lisäksi haihtumiskuivumista. Betonin kuivuminen siis jaetaan kemialliseen kuivumiseen ja haihtumiskuivumiseen. Betonin ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus siihen, miten suuri osuus eri kuivumismuodoilla on. Kun betonin vesi-sideainesuhde on alhainen, voi betonin suhteellinen kosteus laskea pelkän kemiallisen kuivumisen vaikutuksesta jopa 90 prosenttiin. Tällaista betonia kutsutaan itsestään kuivuvaksi betoniksi. (Betonitieto)

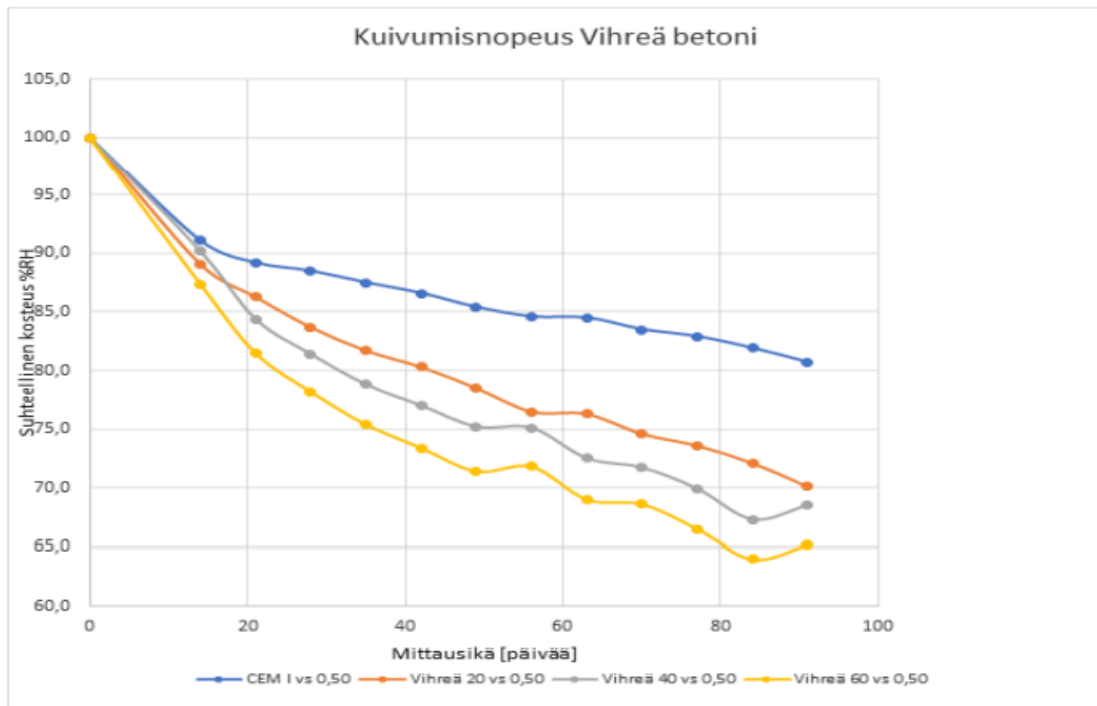
Betonirakenteen rakennekosteuden kuivuminen on hidas prosessi. Kuivumisnopeus riippuu betonin ominaisuuksista, jälkihoidosta, rakenteen paksuudesta ja haihtumispinta-alasta, rakenteen lämpötilasta, ympäröivän tilan suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. (Betonitieto) Kuivumista nopeuttaa alhainen vesi-sementtisuhde, betonimassan huokostaminen ja mahdollisimman karkean kiviaineksen käyttö (Suomen betoniyhdistys, 2017, s. 50). Betonirakenteen kuivuminen jatkuu niin kauan kuin rakenteen sisällä sekä rakenteen ja ympäristön välillä on kosteuspiitoisuusero. Esimerkiksi välipohjarakenteen kokonainen kuivuminen voi kestää yli 10 vuotta. (Betonitieto)

Sisätiloissa olevan betonirakenteen kuivuminen voi kestää useita vuosia riippuen muun muassa rakenteen paksuudesta ja sisäilman kosteudesta. Betonilattioilta vaaditaan rakentamisaikaista kuivumista. Lattian ei kuitenkaan tarvitse kuivua tasapainotilaan sitä ympäröivän huonetilan kanssa, mikä tarkoittaisi keskimäärin 50...60 suhteellista kosteusprosenttia. Päämääränä on, että betonirakenne kuivuu niin paljon, ettei kosteudesta ole haittaa rakenteen pintaan asetettaville muille materiaaleille. (Betonitieto)

Kun rakennepaksuus kasvaa, hidastuu rakenteen kuivuminen merkittävästi. Paksummassa rakenteessa rakenteen sisällä olevalla kosteudella on pidempi matka siirtyä päätäkseen haihtumiskykyiseen pintaan. Rakenteen paksuuden kaksinkertaistuessa tai kuivumisen toiseen suuntaan estyessä kuivumisaika voi kasvaa jopa nelinkertaiseksi. Liittolevyrakenteissa ja muovien päälle valettaessa kuivuminen pääsee tapahtumaan vain yhteen suuntaan. Kuorilaattarakenteissa ja ontelolaatan päälle valetuissa pintalattioissa kuivuminen tapahtuu alaspäin merkittävästi hitaammin kuin ylöspäin. Maanvaraisissa lattioissa rakenteen kuivumiseen vaikuttaa merkittävästi maaperän huokosilman suhteellinen kosteus ja lämpötila ja siten sen vesihöyrypitoisuus. Jos maaperän vesihöyrypitoisuus on korkeampi kuin betonirakenteen huokosilman, kosteus ei haihdu alaspäin vaan päinvastoin rakenne voi kostua. (Betonitieto)

Vähähiilisten betonilaatujen kuivumisnopeudesta ei ole tällä hetkellä paljon kokemuksia työmailta. Rakentamisen kosteudenhallinnassa ja erityisesti lattioiden päällystämisen aikatauluissa vähähiilisten betonilaatujen kuivumisnopeudella voi olla suuri merkitys. (Lahdensivu, 2022) Tutkimusta vähähiilisten betonien kuivumisesta tehdään kuitenkin koko ajan.

Ruduksella vähähiilisen betonin kehitystyön yhteydessä huomattiin, että vähähiilisen betonin kuivuminen voi olla jopa nopeampaa kuin vastaavan normaalin betonin. Vähähiilisen betonin kuivumiskutistuma myöskin osoittautui pieneksi. (Rudus Pro, 2021) Alla olevasta kuvasta 19 nähdään Ruduksen tekemä koe vähähiilisten betonien kuivumisnopeudesta heidän tuotteilla. Ruduksen tutkimuksessa 100 mm paksu vähähiilisellä betonilla valmistettu betonilaatta kuivuu ensimmäisten päivien jälkeen nopeammin kuin CEM I-sementistä valmistettu betonilaatta. Tutkimus tehtiin laboratorio-olosuhteissa huonelämpötilassa, mikä vaikeuttaa tutkimustulosten soveltamista työmaalle. (Järvinen, 2022)



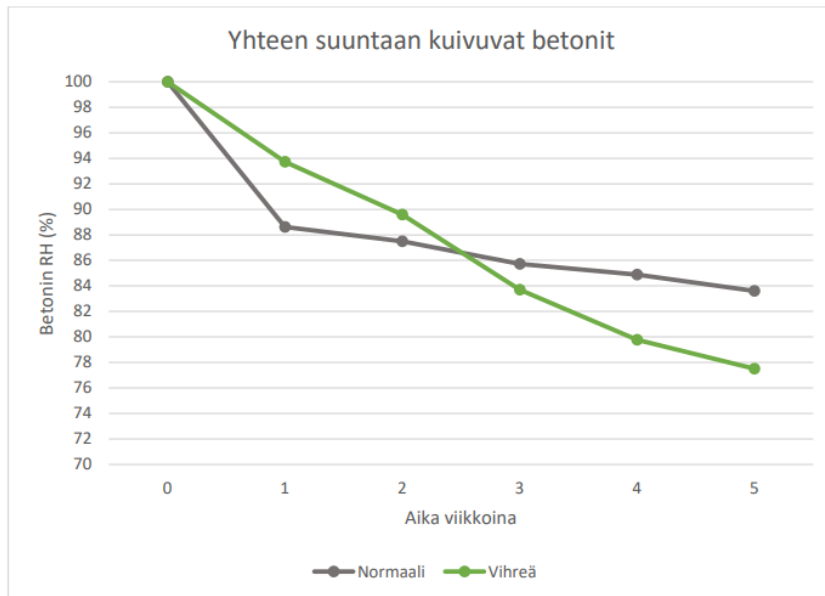
Kuva 19 Vihreän betonin kuivuminen (Järvinen, 2022)

Betonin kuivuminen on aina huomattavasti hitaampaa kylmissä olosuhteissa. Kylmällä ilmalla on suurempi vaikutus masuunikuonaa sisältävän betonin lujuudenkehitykseen, minkä vuoksi voidaan olettaa, että myös kuivuminen voi heikentyä normaalia CEM I-betonia enemmän lämpötilan laskiessa. Kylmyyden vaikutusta vähähiilisen masuunikuonabetonin kuivumiseen ei ole kuitenkaan vielä tutkittu. (Järvinen, 2022)

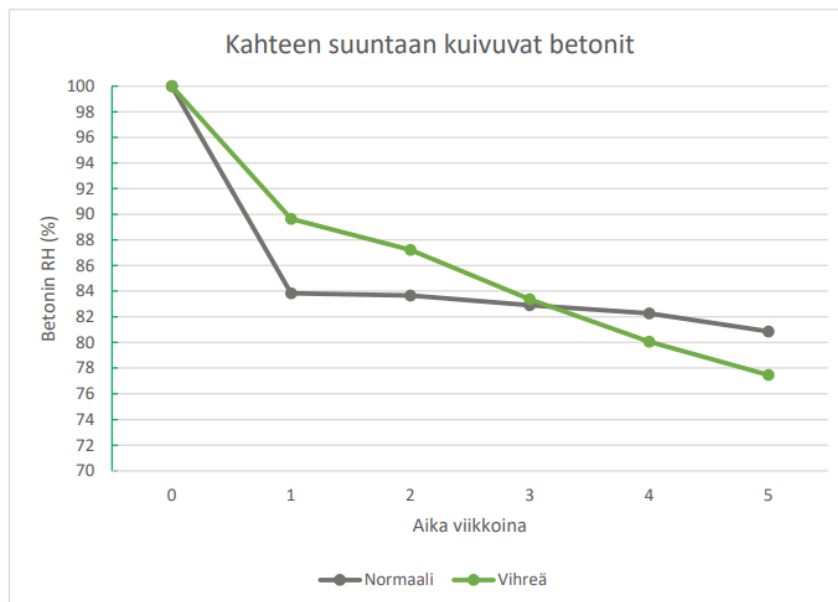
Lujuudenkehityksen nopeus vaikuttaa betonin kemialliseen kuivumiseen. Kemiallisen kuivumisen osuus on kuitenkin betonin kuivumisesta pienempi kuin haihtumiskuivumisen. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että masuunikuonabetoni ei huomattavasti kuiva normaalia CEM I-sementtiä sisältävää betonia hitaammin matalassa lämpötilassa.

Nikkilä (2022) opinnäytetyössään vertaili Rapid-sementillä (CEM II/A-LL) ja Kolmossementillä (CEM III/A) valmistettujen laattojen kuivumisnopeutta. Rapid-sementti on nopeasti kovettuva portlandseossementti. Kolmossementti on masuunikuonasementti, jossa masuunikuonan osuus on 40–46 prosenttia. Betonilaatat tehtiin yhteen ja kahteen suuntaan kuivuviksi. Lujuusluokka betoneilla oli sama, mutta vesi-sideainesuhte vähähiilisellä betonilla oli 0,52 ja normaalilla lattiabetonilla 0,54. Betonit kuivuivat tutkimuksessa huonelämpötilassa. Tutkimus tehtiin suhteellisen ihanteellisissa olosuhteissa betonin kuivumista ajatellen.

Nikkilä (2022) huomasi opinnäytetyössään eroavaisuuksia betonimassojen kuivumisten välillä. Normaalin rakennebetonin kuivuminen oli nopeampaa ensimmäisen viikon aikana kahteen suuntaan kuivuvassa ja yhteen suuntaan kuivuvassa laatoissa. Laattojen kuivumisnopeudet nähdään kuvista 20 ja 21. Vähähiilinen betoni kuitenkin kuivui nopeammin 3 viikon jälkeen valusta. Normaalin betonin kuivuminen oli nopeaa ensimmäisellä viikolla, jonka jälkeen se merkittävästi hidastui. Vähähiilisen betonin kuivuminen oli tasaista koko tutkimuksen ajan.



Kuva 20 Yhteen suuntaan kuivuvan betonilaatan kuivuminen Nikkilän (2022) opinnäytetyössä



Kuva 21 Kahteen suuntaan kuivuvan betonilaatan kuivuminen Nikkilän (2022) opinnäytetyössä

Nikkilä (2022) esittää syyksi normaalin betonin nopeammalle kuivumiselle ensimmäisellä viikolla betonin suuremman eksotermisen reaktion. Masuunikuona on piilevästi hydraulinen, minkä vuoksi se tarvitsee vesi-sementtiseoksen alkaliaktivaattoriin. Tämän vuoksi lämmöntuotto ei ole yhtä voimakasta kolmossementillä kuin Rapid-sementillä. Vähähiilisen betonin nopeampaa kuivumista viikoilla 4–5 Nikkilä (2022) selittää vähähiilisen betonin erilaisella lujuudenkehityksellä. Nikkilän (2022) mukaan kuivuminen ja lujuudenkehitys korreloivat keskenään. Masuunikuonabetoni saavuttaa lujuutta enemmän 4 viikon jälkeen valusta, minkä vuoksi se myös kuivuu nopeammin silloin.

Nikkilä (2022) toteaa työn lopputuloksena, ettei vähähiilinen betoni kuivu sen hitaammin kuin lujuusluokaltaan vastaava yleisesti käytössä oleva lattiabetoni. Nikkilän tulosten perusteella vähähiilisen betonin kuivuminen alkaa hitaammin, mutta pääsee samoihin suhteellisen kosteuden lukemiin normaalin lattiabetonin kanssa muutamassa viikossa. Koe suoritettiin ihanteellisissa olosuhteissa betonin kuivumista ajatellen, minkä vuoksi betonin suhteellinen kosteus saatiin lähellä useissa materiaaleissa vaadittavaa 80 suhteellista kosteusprosenttiarvoa lyhyellä aikavälillä. Työmaaolosuhteissa kuivuminen voi kestää kauemminkin olosuhteista riippuen.



## 5 Vähähiilisen betonin huomioiminen rakenneosissa

### 5.1 Yleistä

Rakennesuunnittelija ilmoittaa suunnitelmissaan betonin lujuuden, rasitusluokan ja vähähiilisyysluokan. Suunnittelija ei ota kantaa, millä tavalla betoni valmistetaan, kuten mitä mahdollista seosainetta betonissa käytetään. Betonin valmistaja päättää betonin seosaineista. Valmistajista riippuen betonireseptit voivat olla erilaisia samanlaisille betoneilla, jotka täyttävät suunnittelijan antamat parametrit.

Vähähiilistä betonia ei ole välttämättä viisasta käyttää rakennuksen jokaisessa osassa. Tiettyjä betoneita käytetään rakennuksessa niin vähän, ettei niiden korvaamisella saada aikaan suuria hiilidioksidipäästövähennyksiä. Betonirunkoisen rakennuksen runko muodostaa noin kaksi kolmasosaa kyseisen rakennuksen päästövähennyspotentiaalista, jolloin vähähiilisen betonin käyttö rungossa on viisasta. (Tompuri, 2022)

Suunnittelussa tulee miettiä, missä rakenteissa vähähiilistä betonia on viisasta käyttää ja varmistaa mahdollisuuksien mukaan vähähiilisen betonin saatavuus. Esimerkiksi P-luku betonin saatavuus vähähiilisenä on toistaiseksi varsin rajoitettua, mutta tyypillisen talonrakennuksen kaikkiin rakenneosiin on nykyisin saatavilla vähähiilisiä vaihtoehtoja. (Tompuri, 2022)

Mahdollisimman suuret päästövähennykset saavutetaan, kun rakennuskohteen suuret betonivolyymit toteutetaan vähähiilisyysluokituksen mukaisilla betonilaaduilla. Rakennuskohteen pienemmissä betonimäärissä voidaan vaadittaessa käyttää korkeampaa päästoluokkaa tai päästölukittelematonta betonia ilman, että sillä on merkittävää vaikutusta kokonaispäästöihin. Tapauskohtaisesti on arvioitava betonirakenteiden osuuksia, jotka tulisi valmistaa päästölukitellulla betonilla. (Suomen betoniyhdistys, 2022b)

Kun betonirakenteiden massasta vähintään 80 prosenttia on päästölukiteltuja, saavutetaan huomattavia päästövähennyksiä. Tämä pystytään yleensä saavuttamaan valmistamalla rakennuskohteen kantavat sisärakenteet vähähiilisellä betonilla. Vähähiilisyysluokitusta on suositeltavaa hyödyntää rakennekohtaisesti, mutta suunnitteluvaiheessa on viisasta tarkastella laajempia kokonaisuuksia. (Suomen betoniyhdistys, 2022b)

Vähähiilistä betonia voi suositella käytettäväksi massiivisissa valuissa, sisällä tehtävissä betonirakenteissa sekä elementtirakenteissa. Vähähiilisen betonin pienemmän lämmöntuottavuuden vuoksi se on laadullisesti parempi ratkaisu massiivisissa rakenteissa. Normaali sementti voi tuottaa massiivirakenteessa liikaa lämpöä. (Härkönen, 2021)

Kylmissä olosuhteissa olosuhteiden hallinta on tärkeää, kun käytetään vähähiilistä betonia, alhaisen lämmöntuoton ja mahdollisen hitaan lujuudenkehityksen vuoksi. Helpompaa voi olla käyttää nopeasti kovettuvaa betonia, jonka lujuus kehittyy tarpeeksi paljon ennen kuin rakenne kylmenee liikaa ja lujuusreaktio pysähtyy. (Härkönen, 2021)

Vähähiiliset betonielementit eivät eroa käyttäjän näkökulmasta tavanomaisista betonielementeistä muuten kuin hiilijalanjäljen osalta. Vähähiiliset betonielementit täyttävät laatuvaatimukset ja niitä voidaan käyttää tavanomaisten tuotteiden tapaan. Vähähiilisiä betonielementtejä on saatavilla valtaosassa tuotevalikoimissa. (Härkönen, 2021)

Rakennesuunnittelussa tulee ottaa huomioon todennäköinen vähähiilisen betonin vaikutus työmaan aikatauluun. Vähähiilisen betonin vähähiilisyys saavutetaan korvaamalla osa sementistä teollisuuden sivuvirroista saatavilla sideaineilla, kuten masuunikuonalla ja lentotuhkalla, joiden vaikutuksesta betonin kovettumisajat pidentyvät. (Tompuri, 2022) Vähähiilistä betonia on kuitenkin saatavilla korkeimmissa vähähiilisyysluokissa 28 päivän laadunvarmistusikällä, jolloin sillä ei ole enempää aikatauluvaikutusta kuin normaallilla rakennebetonilla.

## 5.2 BY-vähähiilisyysluokitus

Ympäristöselosteella voidaan esittää rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöt. Ympäristöseloste perustuu eurooppalaiseen standardiin, joka sisältää lukuisia indikaattoreita hiilidioksidipäästöjen lisäksi. Ympäristöseloste edellyttää myöskin ulkopuolista verifiointia. Valmisbetonituotannossa hiilidioksidipäästöjen esittäminen ympäristöselosteella on työlästä ja kallista suuren tuotevariaation vuoksi. (Vuori & Punkki, 2022) Ympäristöselostetta on kuitenkin käytetty työmailla vähähiilisen asuinkerrostalon työkaluna (Tompuri, 2022).

Ympäristöselosteen ohella on luotu BY-vähähiilisyysluokitus betonin hiilidioksidipäästöjen tarkasteluun (Vuori & Punkki, 2022). Ennen luokitusta vähähiilisten betonien vertailu ja määrittäminen on ollut hankalaa (Tompuri, 2022). BY-vähähiilisyysluokitus on halvempi ja yksinkertaisempi tapa esittää eri betoneiden hiilidioksidipäästöarvot. Luokituksen ansiosta vähähiilinen betoni on helpompi valita suunnitteluvaiheessa. BY-vähähiilisyysluokituksen tavoitteena on olla kansallinen tapa eri betonilaatujen hiilidioksidipäästöjen ilmoittamiseen sekä betoneiden luokitteluun hiilidioksidipäästöjen perusteella. Sen ansiosta hiilidioksidipäästöt eri betonilaaduille voidaan laskea luotettavasti ja arvoja voidaan vertailla. (Vuori & Punkki, 2022)

Vähähiilisyysluokittelu on ollut Norjassa käytössä jo vuodesta 2015 asti, ja se päivitettiin vuonna 2020. Norjassa luokituksen avulla betonin päästöjä on saatu alennettua noin 20 prosentilla. BY-vähähiilisyysluokituksen mahdollisuudet päästöjen vähentämiseen ovat samaa luokkaa kuin Norjassa, kun saadaan rakentamisen koko ketju omaksumaan luokitus, vaikka pelkkä luokitus ei sitä takaakaan. Vähähiilisyysluokituksen ansiosta vähähiilisyystavoitteiden edistäminen betonialalla on helpompaa. BY-vähähiilisyysluokituksen käyttö on tällä hetkellä vapaaehtoista. (Tompuri, 2022)

BY-vähähiilisyysluokitus on ensisijaisesti tarkoitettu valmisbetonille. Betonielementeissä tulee arvioida betonin päästöjen lisäksi elementin sisältämien muiden materiaalien, kuten raudotteiden ja eristeiden, päästöjen osuutta päästövähennyskokonaisuudesta, minkä vuoksi BY-luokitus ei sovellu sellaisenaan elementeille. (Tompuri, 2022)

Suunnittelulla on hyvin suuri merkitys siihen, kuinka laajalti BY-vähähiilisyysluokitusta rakennushankkeissa vaaditaan ja käytetään. Luokituksen ansiosta rakennesuunnittelijan on helppo vaatia vähähiilistä betonia ilman että joutuu ottamaan kantaa yksittäisen valmistajan puolesta. Vähähiilisen betonin määrittelyn voi tehdä objektiivisesti mainitsematta markkinointinimiä suunnitelmissa. (Tompuri, 2022)

BY-vähähiilisyysluokitukseen kuuluu 16 eri betonilaatua ja viisi vähähiilisyysluokkaa. Betonilaadut ja vähähiilisyysluokkien raja-arvot nähdään taulukossa 8. Betonilaatujen päästöjen laskenta tehdään betoniasemakohtaisen reseptin mukaan. Laskennassa otetaan

huomioon raaka-aineiden kuljetus, betonin valmistukseen tarvittava energiankulutus, sekä valmistuksessa muodostuva hukka (Tompuri, 2022)

Taulukko 8 Betonilaadut ja luokkien raja-arvot BY-vähähiilisyysluokituksessa. (Vuori & Punkki, 2022)

| BETONI                  | Ref.taso |        |        |        |        |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|
|                         | GWP.REF  | GWP.85 | GWP.70 | GWP.55 | GWP.40 |
| C20/25 - Ei huokostettu | 210      | 180    | 145    | 115    | 85     |
| C25/30 - Ei huokostettu | 230      | 195    | 160    | 125    | 90     |
| C30/37 - Ei huokostettu | 255      | 215    | 180    | 140    | 100    |
| C35/45 - Ei huokostettu | 285      | 240    | 200    | 155    | 115    |
| C45/55 - Ei huokostettu | 320      | 270    | 225    | 175    | 130    |
| C50/60 - Ei huokostettu | 340      | 290    | 240    | 185    | 135    |
| C30/37 - Huokostettu    | 290      | 245    | 205    | 160    | 115    |
| C35/45 - Huokostettu    | 330      | 280    | 230    | 180    | 130    |
| C45/55 - Huokostettu    | 375      | 320    | 265    | 205    | 150    |
| C50/60 - Huokostettu    | 395      | 335    | 275    | 215    | 160    |
| C30/37 P0               | 270      | 230    | 190    | 150    | 110    |
| C30/37 P30              | 300      | 255    | 210    | 165    | 120    |
| C35/45 P0               | 300      | 255    | 210    | 165    | 120    |
| C35/45 P30              | 330      | 280    | 230    | 180    | 130    |
| C35/45 P50              | 340      | 290    | 240    | 185    | 135    |
| C45/55 P50              | 375      | 320    | 265    | 205    | 150    |

Vähähiilisyysluokkia merkitään tunnuksella GWP.NN. GWP-tunnus tulee sanoista Global Warming Potential. NN-tunnuksessa on päästötaso verrattuna referenssitason. (Vuori & Punkki, 2022) BY-vähähiilisyysluokituksessa referenssitasona, johon verrataan, toimii 2021 normaalin betonin keskimääräiset päästöt. Referenssitason merkintä on GWP.REF, ja eri tavoitetasoja merkitään GWP.85, GWP.70, GWP.55 ja GWP.40. Esimerkiksi merkintä GWP.40 tarkoittaa, että betonin hiilidioksidipäästöt ovat korkeintaan 40 prosenttia verrattuna referenssitason. Päästöjen laskelmien tulokset ovat yksikössä kg CO<sub>2e</sub> / betoni-m<sup>3</sup>, joka ilmaisee valmistuksessa vapautuvan hiilidioksidin määrän betonikuutiometrissä. (Tompuri, 2022)

Suunnittelussa tulee varmistaa vähähiilisen betonin saatavuus ja mahdollisten ominaisuuksien muuttuminen. Esimerkiksi vähähiilisen P-lukubetonin saatavuus on toistaiseksi varsin rajoitettua ja alhaisimmissa päästöluokissa lujuuskehitys on hitaampaa. (Vuori & Punkki, 2022) Vähähiilisiä betonivaihtoehtoja on tällä hetkellä saatavilla tyypillisen talonrakennuksen kaikkiin rakenneosiin. Taulukosta 9 nähdään eri vähähiilisten betoneiden arvioituja saatavuuksia vuonna 2022. Päästötavoitteiden kannalta oleellinen merkitys on sillä, mitä rakenneosia vähähiilisyysvaatimus koskee. Esimerkiksi betonirunkoisessa rakenteessa, jos koko runko valmistetaan vähähiilisestä betonista, päästövähennyspotentiaali on noin kaksi kolmasosaa. (Tompuri, 2022)

Taulukko 9 Vähähiilisen betonin arvioitu saatavuus vuonna 2022 (Vuori & Punkki, 2022)

| BETONI                  | Ref.taso |        |        |        |        |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|
|                         | GWP.REF  | GWP.85 | GWP.70 | GWP.55 | GWP.40 |
| C20/25 - Ei huokostettu | Green    | Green  | Green  | Yellow | Red    |
| C25/30 - Ei huokostettu | Green    | Green  | Green  | Yellow | Red    |
| C30/37 - Ei huokostettu | Green    | Green  | Green  | Yellow | Red    |
| C35/45 - Ei huokostettu | Green    | Green  | Green  | Yellow | Red    |
| C45/55 - Ei huokostettu | Green    | Green  | Green  | Yellow | Red    |
| C50/60 - Ei huokostettu | Green    | Green  | Green  | Yellow | Red    |
| C30/37 - Huokostettu    | Green    | Green  | Yellow | Red    | Red    |
| C35/45 - Huokostettu    | Green    | Green  | Yellow | Red    | Red    |
| C45/55 - Huokostettu    | Green    | Green  | Yellow | Red    | Red    |
| C50/60 - Huokostettu    | Green    | Green  | Yellow | Red    | Red    |
| C30/37 P0               | Green    | Yellow | Yellow | Red    | Red    |
| C30/37 P30              | Green    | Yellow | Yellow | Red    | Red    |
| C35/45 P0               | Green    | Yellow | Yellow | Red    | Red    |
| C35/45 P30              | Green    | Yellow | Yellow | Red    | Red    |
| C35/45 P50              | Green    | Yellow | Yellow | Red    | Red    |
| C45/55 P50              | Green    | Yellow | Yellow | Red    | Red    |

■ Todennäköisesti yleisesti saatavilla  
■ Todennäköisesti saatavissa useilta valmistajilta<sup>1</sup>  
■ Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta<sup>1</sup>  
■ Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saatavuus varmistettava etukäteen

Betonin valmistaja tarvitsee vähähiilisyysertifikaatin, joita myöntää Suomessa Inspecta Sertifiointi Oy. Vähähiilisyysertifikaatin hakemisen pohjavaatimuksena on valmisbetonin tai betonielementtien tuotehyväksynnän sertifikaatti. Betonin valmistajalla tulee olla käytössä BY-vähähiilisyyslaskuri tai muu verifioitu laskentatyökalu, jonka betoniyhdistys on hyväksynyt, jotta valmistaja voi saada vähähiilisen betonin sertifiointin. Sertifikaatin saaminen edellyttää myös alkutarkastusta, jossa varmistetaan valmistajan valmiudet BY-vähähiilisyysluokituksen käyttöön. Tarkastuksessa myöskin todennetaan ainakin yhden vähähiilisen betonikoostumuksen laskenta, lähtötietojen oikeellisuus ja vähähiilisen betonin koostumuksen nimeäminen ja jäljitettävyyden. Jatkossa tarkastuskäyntejä tehdään kaksi kertaa vuodessa, jolloin todennetaan laskelmien ajantasaisuus, lähtötietojen oikeellisuus sekä toteutumista käytännön tuotannossa. Ensimmäinen valmisbetonitehdas, joka sai vähähiilisyysertifikaatin lokakuussa 2022, on Lujabetoni Oy:n Helsingin tehdas. (Tompuri, 2022)

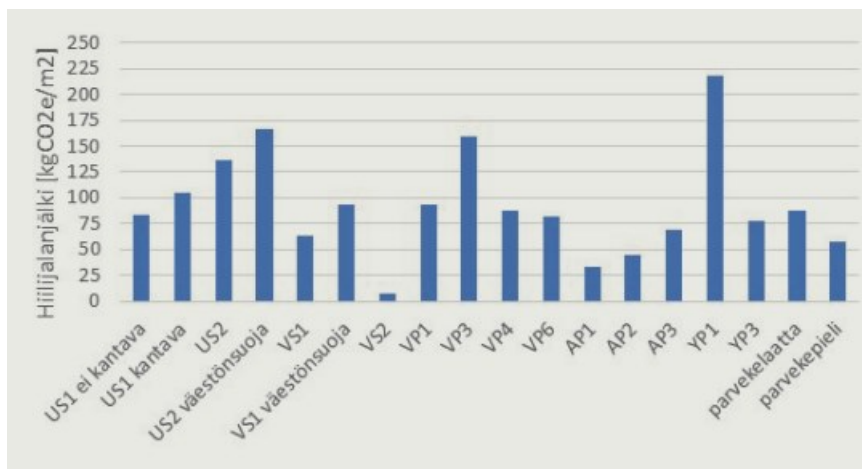
### 5.3 Hiilidioksidin vähentämispotentiaali rakentamisessa

Rakennuksen runkoon sitoutuneen hiilijalanjäljen osuus on noin 60 prosenttia koko rakennukseen sitoutuneesta hiilen hiilijalanjäljestä toimisto- ja asuinkerrostalorakentamisessa. Kun otetaan mukaan julkisivut ja yläpohja, sitoutuneen hiilen osuus nousee noin 80 prosenttiin. Energiaintensiivisten materiaalien käytöllä on suurin vaikutus sitoutuneen hiilen määrään. Energiaintensiivisiä materiaaleja ovat muun muassa betonirakenteet sekä lämmöneristeet. Pohjavahvistuksilla, jossa hyödynnetään energiaintensiivisiä rakennusmateriaaleja, voi olla merkittävä ilmastovaikutus infrarakentamisessa. Rakennuksen rakentamisvaihe on ajallisesti lyhyt verrattuna rakennuksen käyttövaiheeseen, minkä vuoksi niin sanottu hiilipiikki muodostuu lyhyelle ajanjaksolle. Hiilipiikki voi valtakunnan tasolla olla merkittävä aktiivisen rakennustoiminnan seurauksena. (Rudus Pro, 2021)

Lahdensivu (2022) on laskenut asuinkerrostalon hiilidioksidijalanjäljen lähteet ja tutkinut, kuinka vähähiilisellä betonilla hiilijalanjälkeä voidaan pienentää. Laskemisessa käytetyn asuinrakennuksen välipohjien ontelolaattojen betonin lujuusluokka oli C40/50 ja muiden betonirakenteiden C30/37. Lahdensivu suoritti laskennan jokaiselle rakennetyy-

pille erikseen. Paalut ja perustukset laskettiin yhtenä kokonaisuutena. Laskennassa otettiin huomioon elinkaaren vaiheet A1–A5 ja C1–C4. Laskenta suoritettiin 50 vuoden elinkaarelle ympäristöministeriön julkaiseman ohjeen mukaan.

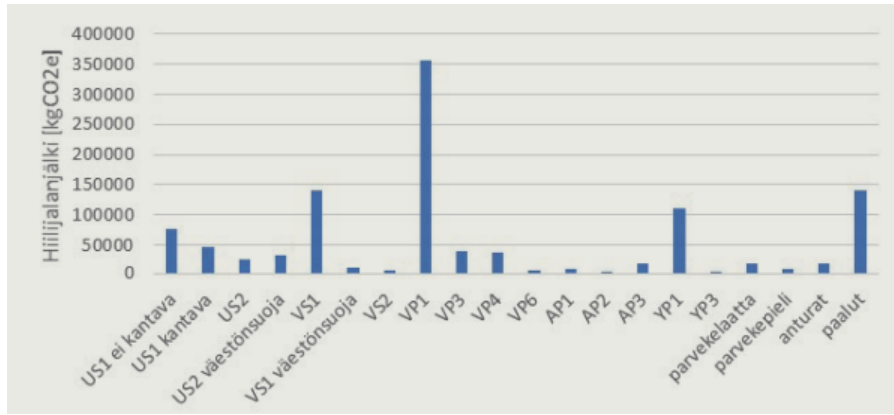
Eri rakennetyyppien hiilijalanjälkien välillä on suurta vaihtelua. Hiilijalanjälki rakennetyypeittäin nähdään kuvassa 22. Suurin hiilijalanjälki on yläpohjalla. Yläpohjan kantavana rakenteena on ontelolaatta ja lämmöneristeenä kevytsoraa. Sen hiilijalanjäljestä suurimman osan muodostaa kevytsoran valmistus ja toisena ontelolaatan valmistus. Toiseksi suurin hiilijalanjälki rakennetyypeistä on väestönsuojan seinärakenteella. Väestönsuojan seinärakenne sisältää runsaasti raudoitusta, mikä selittää suurta hiilijalanjälkeä. Eri kantavilla välipohjarakenteilla on suhteellisen korkeat hiilijalanjäljet, jotka muodostuvat pääosin betonin valmistuksen hiilijalanjäljestä. Pienimmät hiilijalanjäljet ovat kevyillä väliseinillä sekä maanvaraisilla betonilatioilla. (Lahdensivu, 2022)



Kuva 22 Betonielementtiasuinkerrostalon rakennetyyppien hiilijalanjälki (Lahdensivu, 2022)

Rakennusta tulee tarkastella kokonaisuutena. Yksittäisten rakennetyyppien hiilijalanjäljestä saa käsityksen, mihin materiaalia ja hiiltä on sitoutunut, mutta rakennetyyppien määrä ratkaisee hiilijalanjäljen vähentämisen potentiaalin. Kokonaisuuden kannalta suurimman hiilijalanjäljen omistavan yläpohjan tai toiseksi suurimman väestönsuojan hiilijalanjälki eivät välttämättä ole merkittäviä. (Lahdensivu, 2022)

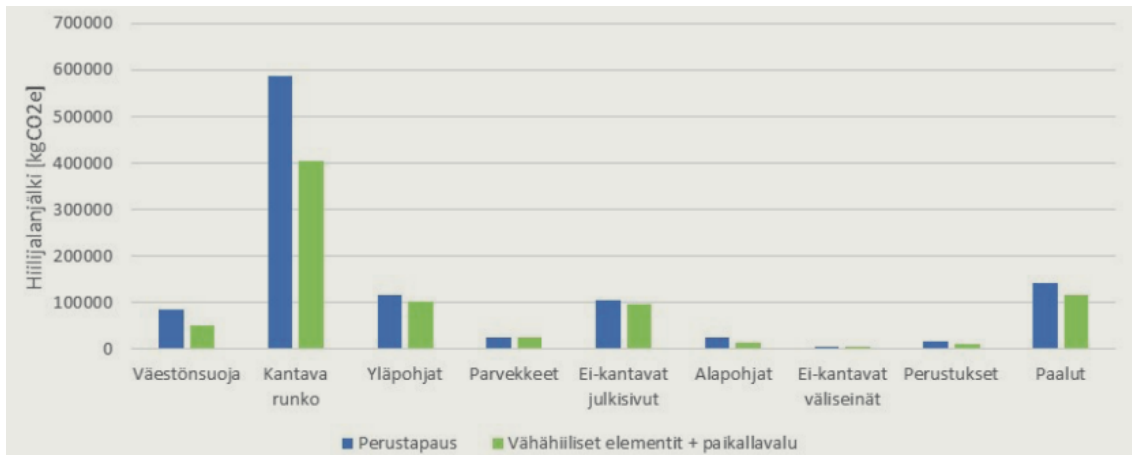
Kun tarkastellaan kokonaismäärän mukaan hiilijalanjälkeä, korkein hiilijalanjälki muodostuu välipohjista, mikä nähdään kuvasta 23. Välipohjarakenne muodostuu ontelolaatoista ja yläpinnassa olevasta tasoitteesta. Tämän vuoksi vähähiilisen betonin käytöllä on välipohjissa merkittävä hiilijalanjäljen vähennyspotentiaali verrattuna esimerkiksi yläpohjaan tai ulkoseiniin, joissa myös lämmöneristeellä on korkea hiilijalanjälki. (Lahdensivu, 2022)



Kuva 23 Rakennustyypien kokonaishiilijalanjälki (Lahdensivu, 2022)

Hiilijalanjälki on rakennuksen tasolla korkealla sellaisissa rakennetyypeissä, joita on rakennuksessa paljon ja joissa on runsaasti betonia. Välipohjien jälkeen suurin kokonaishiilijalanjälki on paaluilla. Paalujen käyttöön vaikuttaa perustamistapa, johon voidaan vaikuttaa vain rakennuspaikan valinnalla. Asuinkerrostaloja rakennetaan usein alueilla, joissa paalutus on tarpeen. Kolmanneksi suurin kokonaishiilijalanjälki on kantavilla väliseinillä. Väliseinien rakennetyypillä on suhteellisen pieni hiilijalanjälki, mutta suuren määrän vuoksi kokonaishiilijalanjälki nousee korkeaksi. Väestönsuojan seinän korkeasta rakennetyypin hiilijalanjäljestä huolimatta kokonaishiilijalanjälki jää pieneksi pienen tarvittavan määrän vuoksi. (Lahdensivu, 2022)

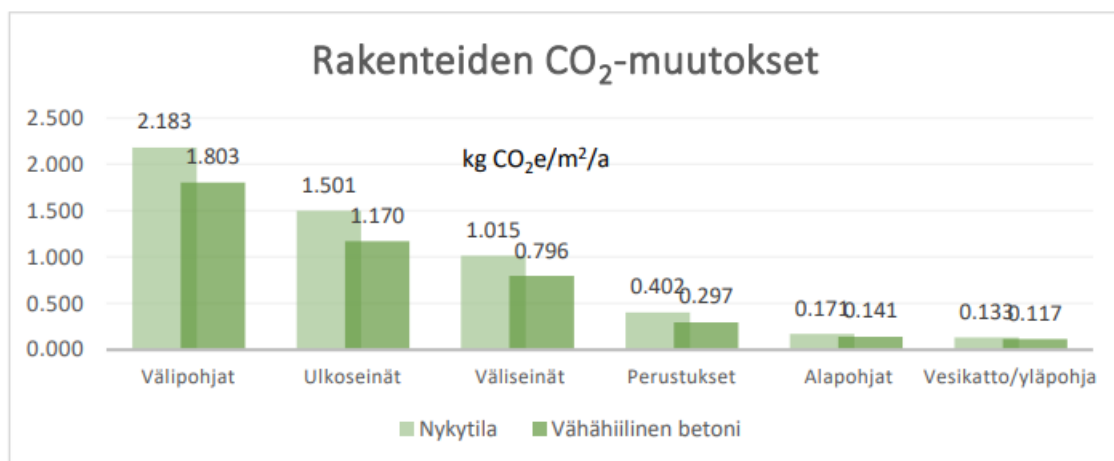
Vähähiilistäminen kannattaa kohdentaa sellaisiin rakenneosiin, joilla on kokonaisuuden kannalta suuri merkitys. Kuvassa 24 nähdään, kuinka Lahdensivun esimerkkiasuintalossa voidaan vähähiilisen betonin käytöllä vähentää hiilijalanjälkeä eri rakenteissa. Kuvan laskelemissa vähähiilistä betonia on käytetty kaikissa säältä suojassa olevissa rakenteissa. Esimerkkilaskelmassa vähähiilisen betonin avulla saadaan kokonaishiilijalanjälkeä pienennettyä 24 prosentilla. Yksittäisissä rakenneosissa voidaan päästä yli 40 prosentin vähennyksiin, kuten ontelolaattavälipohjissa ja paikallavaletuissa seinissä. Kantavan rungon osuus rakenteiden kokonaishiilijalanjäljestä on ilman hiilivähennystä 53 prosenttia. Myös vähähiilisellä betonilla toteutettuna kantavan rungon osuus on suurin, 45 prosenttia, mutta kokonaispäästöt ovat laskeneet rungon osalta noin kolmanneksen. (Lahdensivu, 2022)



Kuva 24 Esimerkki vähähiilisen betonin pienentämästä hiilijalanjäljestä (Lahdensivu, 2022)

Järvinen (2022) tutki diplomityössään kerrostalon hiilijalanjälkeä ja kuinka paljon sitä voidaan pienentää talviolosuhteissa. Tutkimuskohteena toimi 13-kerroksinen asuinkerrostalo. Rakennuksen elinkaarta tarkasteltiin 50 vuoden ajanjaksolta. Vähähiilisellä betonilla rakennuksen elinkaari päästöjä saatiin tiputettua 6,7 prosenttia. Noin 3,2 prosenttia päästövähennyksistä tuli paikallavalurakenteista ja 3,5 prosenttia elementtirakenteista.

Kun Järvinen (2022) vertaili ainoastaan tuotevaiheen A1–A3 hiilidioksidipäästöjä, vähähiilisellä betonilla saatiin laskettua hiilidioksidipäästöjä 18,4 prosentilla. Alla olevasta kuvasta 25 nähdään hiilidioksidipäästöjen muutos rakenteittain Järvisen diplomityössä. Rakenteiden hiilidioksidipäästöissä on mukana myös pintarakenteet, kuten muovimatot, tasausvalut, rappaukset ja laminaatit. Ulkoseinissä on mukana myös kuorielementit ja väliseinissä kipsilevyseinät.



Kuva 25 Päästövähennys vähähiilisellä betonilla Järvisen (2022) diplomityössä

Vähähiilisellä betonilla saatiin Järvisen (2022) diplomityössä laskettua elinkaaren hiilidioksidipäästöjä lämmitettyä nettopinta-alaa kohden 52 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Joissakin tutkimuksissa on saatu vähähiilisellä betonilla laskettua hiilidioksidipäästöjä jopa 100 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Järvinen selittää pienempää hiilidioksidipäästöjen vähennystä ainakin talvibetonoinnilla. Talvibetonoinnissa on hyvin vaikeaa päästä esimerkiksi vähähiilisyysluokkaan GWP.70.

Talvella ei ole huomattavaa vaikutusta elementtirakentamisen hiilidioksidipäästöihin, minkä vuoksi potentiaalinen päästöjen vähentäminen kesärakentamisen vaikutuksesta olisi tullut ainoastaan paikallavalurakentamisesta Järvisen (2022) työssä. Korkeampi ulkolämpötila mahdollistaa kesällä nopeamman lujudenkehityksen seossementeillä, minkä vuoksi kesällä paikallavalubetonin hiilijalanjälki pystyttäisiin jopa puolittamaan. Alla olevasta kuvasta 26 nähdään paikallavalussa vähähiilisen betonin hiilidioksidivähennyspotentiaali vuoden ajasta riippuen.



Kuva 26 Paikallavalubetonin päästövähennyspotentiaali vuoden ajasta riippuen (Järvinen, 2022)

Järvisen (2022) diplomityössä elementtirakentamisessa käytetyn betonin hiilidioksidipäästöt olivat huomattavasti suuremmat kuin paikallavaluissa. Tämä johtui suurilta osin elementeissä käytetystä CEM I-sementistä, lisäaineista ja yleisesti suuremmista sideainemääristä, joiden tarkoituksena on saada betoni kovettumaan mahdollisimman nopeasti muotistanostolujuuteen, joka on noin 50 prosenttia suunnittelulujuudesta.

Elementtitehtailla on mahdollisuudet hyödyntää yhtä vähähiilistä betonia kuin työmaalla, mutta pienipäästöisen betonin käyttö tulee hidastamaan tuotantonopeutta. Elementtirakentamisen hyödyt vähähiilisestä näkökulmasta tulevat esiin erityisesti talviolosuhteissa, sillä elementtitehtaalla voidaan saada hyvät valuolosuhteet aikaiseksi rakennuksen normaalilla lämmityksellä esimerkiksi sähköä tai kaukolämpöä hyödyntämällä. (Järvinen, 2022)

Työmaalla joudutaan talvisin käyttämään lämmittämiä, jotka toimivat polttoöljyllä tai kaasulla, jotta paikallavalettu betoni pysyy riittävän lämpimänä lujittumisen varmistamiseksi. Järvisen (2022) diplomityön esimerkkikohteessa välipohjan lämmittäminen öljylämmityksellä vastaisi noin 12 prosenttia välipohjan betonin päästöistä. Vähähiilisempää betonia käytettäessä öljylämmittämisen osuus nousi jo noin 18 prosenttiin välipohjan betonin päästöistä. Prosenteissa ei ole huomioitu vähähiilisemmän betonin hitaampaa lujudenkehitystä, jolloin lämmitys aika on pidempi, mutta myös polttoöljyn päästöjä voidaan vähentää käyttämällä biopolttoainetta.

Betonivalujen ollessa riittävän suuret on vähähiilisyys edullisempaa ja tehokkaampaa toteuttaa. Talvella tehtävissä betonivaluissa joudutaan suurempien kustannusten ja aikatauluhaasteiden eteen. Tämän vuoksi kesärakentaminen on paremmassa valossa hiilidioksidipäästöjen näkökulmasta. Maantieteellisestikin vähähiilisen betonin hyödyntäminen voi olla vaikeampaa sijainnista riippuen. Esimerkiksi Rovaniemellä rakennettaessa vähähiilisen betonin käyttö on vaikeampaa kuin Helsingissä jo alhaisemman keskimääräisen lämpötilan johdosta. Myös esimerkiksi Saksassa hyödynnetään paljon enemmän erittäin



vähähiilistä CEM III-luokan sementtiä, koska kylmät ulkolämpötilat eivät häiritse betonitöitä samalla tavalla kuin Suomessa. (Järvinen, 2022)

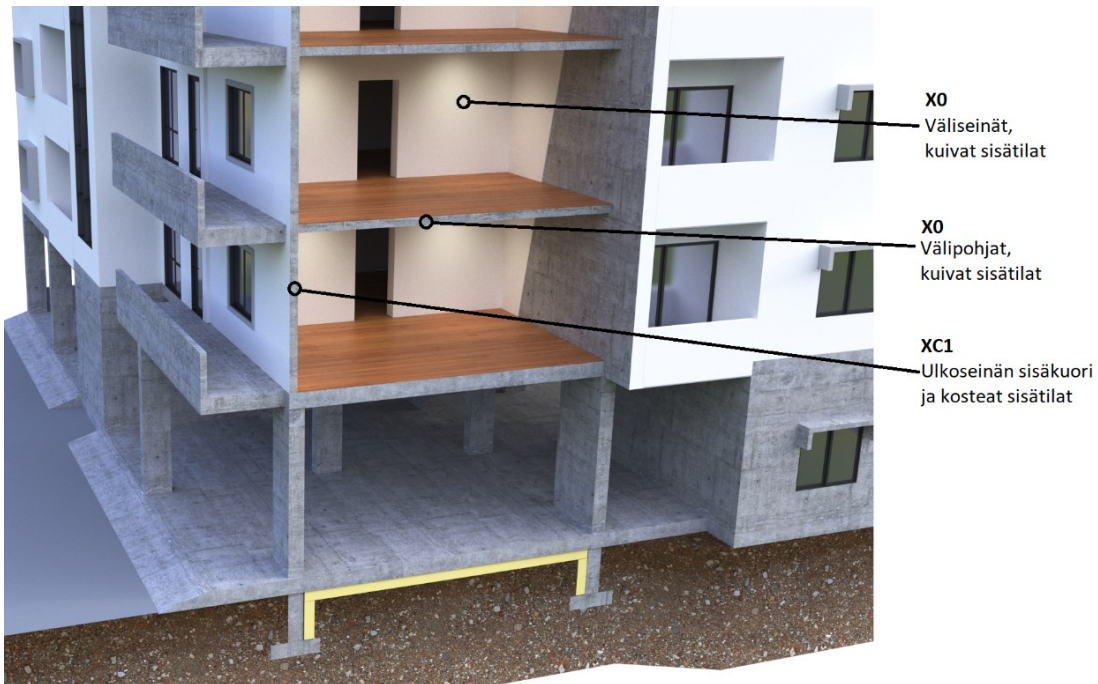
Betonin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen kannattaa aloittaa ensin suurimmista betonivaluista, joissa voidaan saavuttaa helpoiten merkittävimmät päästövähennykset. Pienissä betonivaluissa, kuten väliseinäelementtien saumoissa, käytetyllä betonilla on vain erittäin vähäinen merkitys kohteen hiilidioksidipäästöihin, minkä vuoksi näissä käytettyihin betoneihin on turha tehdä suurempia muutoksia. (Järvinen, 2022)

Varminta on hakea vähähiilisyyttä sellaisissa rakenteissa, joilla ei ole merkittävää työmaan aikataulullisia haasteita, kuten rakennuksesta irralliset tukimuurit tai arkkitehtoniset rakenteet. Näiden osuus kokonaisbetonin kulutuksesta ovat kuitenkin pienet. Määrällisesti järkevintä on korvata rungossa betoni vähähiilisellä vaihtoehdolla. Rungolla on kuitenkin merkittävä vaikutus työmaan aikatauluun, jolloin myös mahdollisen epäonnistumisen aiheuttamat kustannukset ovat suuret. Laadunvalvonnalla on merkittävä rooli ensimmäisten valujen yhteydessä. (Järvinen, 2022)

## 5.4 Sisä rakenteet

Sisä rakenteissa kosteus on pääosin pientä ja lämpötila ei laske pakkasen puolelle. Sisä rakenteet eivät ole aggressiivisessa ympäristössä. Sisä rakenteilla ei ole pakkasrasitusta eikä yleensä kloridirasitusta. Kloridirasitus on mahdollista sisä rakenteille uimahalleissa ja pysäköintitasolle, mutta nämä ovat harvinaisia kohteita. (Timonen-Nissi, 2019)

Kun puhutaan normaalista asuinrakennuksesta, rasitusluokat ovat sisätiloissa X0 ja XC1. X0 rasitusluokassa on raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni, jossa ei esiinny korroosion tai syöpymisrasituksen riskiä. X0 rasitusluokkaan kuuluu myöskin erittäin kuivat lämmitetyt sisätilat raudoituksella. XC1 rasitusluokassa rakenne on kuiva tai jatkuvasti märkä ja rakenteen betoni voi sisältää raudoitusta tai muita metalliosia. XC1 rasitusluokkaan kuuluvat esimerkiksi kylpyhuoneet, porraskäytävät ja kerroksellisen seinärakenteen sisäkuori. (SFS-EN 206, 2021; Timonen-Nissi, 2019) Talon rungon X0 ja XC1 rasitusluokan rakenteet näkyvät kuvassa 27.



Kuva 27 Talon sisärakenteiden rasitusluokat ([Muokattu] Betoniyhdistys, 2023)

X0 ja XC1 rasitusluokkaan kuuluvat rakenteet, joissa ympäristöolosuhteet eivät mitenkään rajoita rakenteen käyttöikä. Koska rasitusluokissa betonille ei ole vauriomekanismeja, varsinaista käyttöikäsuunnittelua betonirakenteelle ei voida tehdä. Rakenteen käyttöiäksi voidaan valita 50, 100 tai 200 vuotta. (Suomen betoniyhdistys, 2017, s.17)

Rasitusluokat vaikuttavat betonimassassa sallittuihin sementtityyppeihin. Rasitusluokissa X0 ja XC1 voidaan käyttää kaikkia sementtityyppejä, mistä huomataan, ettei sisärakenteiden rasitusluokat ole erityisen vaativia. Rasitusluokissa sallitut seosainemäärät nähdään taulukosta 10. (Suomen betoniyhdistys, 2023) Seosaineita voidaan käyttää suuria määriä sisärakenteiden rasitusluokissa, jolloin niiden avulla betonin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen pieneksi on mahdollista.

Taulukko 10 Seosaineiden sallitut määrät tyypillisissä sisärakenteiden rasitusluokissa X0 ja XC1 (Suomen betoniyhdistys, 2023)

**Esimerkkejä sallituista seosaineiden enimmäislisäyksistä  
%-osuuksina sideaineen painosta (1). Käyttöikä 50...200 vuotta**

| Seosaine                   | Tyypilliset rasitusluokat<br>sisärakenteissa X0 tai XC1 |
|----------------------------|---|
| Silika                     | 10  |
| Lentotuhka                 | 50  |
| Masuunikuona               | 95  |
| Vähimmäis-<br>lujuusluokka | C20/25  |

(1) Sementin sisältämä seosaineiden määrä tulee ottaa huomioon betoniin lisättävien seosaineiden osuuksia laskettaessa, jos käytetään muuta sementtiä kuin CEM I.

X0 ja XC1 rasisluokkien valmistus vähähiilisenä betonina ei tuota suurta ongelmaa. Rasisluokat eivät ole vaativia, jolloin vähähiilisten betonien reseptien tekeminen on mahdollisesti helpohkoa. Esimerkiksi masuunikuona toimii hyvin sideaineena näissä rasisluokissa, vaikka mahdollisesti se kasvattaa betonin karbonatisoitumista. Saatavuuteen vaikuttaa enemmän laadunvarmistamisikä, raaka-aineiden saatavuus ja haluttu vähähiilisyysluokka. Kaikilla valmisbetonitehtailla ei ole vaadittuja raaka-aineita valmistaa ainakaan alhaisempia vähähiilisyysluokan betonilaatuja, jolloin olisi hyvä varmistaa saatavuus, kun se on mahdollista. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

X0-luokan puristuslujuuden vähimmäisvaatimus on C12/15 ja XC1 luokan C20/25 (SFS 7022). Vähähiilisyysluokan betonien lujuudet ovat C20/25-C50/60. C85/95 lujuista vähähiilistä betonia on valmistettu, mutta se menee BY vähähiilisyysluokituksen vaatimus-tyrille (Autio, 2023).

Laadunvarmistusiän ollessa 28 päivää sisärakenteiden vaatimia rasisluokan betoneita on saatavissa vähähiilisyysluokan lujuuksissa GWP.70 asti. Jos laadunvarmistusikä voi olla 91 päivää, alle C30/37 lujuusluokan betoneita on helpommin saatavilla jopa GWP.40 luokassa ja lujempia laatuja GWP.55 luokassa. Yli C30/37 lujuisia betoneita on saatavilla vähähiilisyysluokassa GWP.40, mutta se on varmistettava aina tapauskohtaisesti. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

X0 ja XC1 rasisluokkien saatavuus riippuen vähähiilisyysluokituksesta, puristuslujuudesta ja laadunvarmistusiästä nähdään alla olevasta taulukosta 11. Laajemmat taulukot vähähiilisten betoneiden saatavuudesta löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 11 Rasisluokkien X0 ja XC1 betonien saatavuus 50...200 vuoden suunnitteluiällä 3/2023

| Puristuslujuus | Laadunvarmistusikä | GWP.REF | GWP.85 | GWP.70<br>(1) | GWP.55<br>(1) | GWP.40<br>(1) |
|----------------|--------------------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| C20/25         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |
| C25/30         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |
| C30/37         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |
| C35/45         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |
| C40/50         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |
| C45/55         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |
| C50/60         | 28 d               |         |        |               |               |               |
|                | 91 d               |         |        |               |               |               |

|  |   |
|--|---|
|  | Todennäköisesti yleisesti saatavilla                                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (2)                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (2)                  |
|  | Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (2) |
|  | Todennäköisesti ei vielä saatavilla (2)                                 |

(1) Betonin hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon

(2) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

Päästöluokan alentaminen tarkoittaa seosaineiden määrän kasvua. Seosaineena käytetään pääosin masuunikuonaa, sillä sitä voidaan lisätä betonimassaan suuria määriä. Masuunikuona kuitenkin hidastaa betonin alkulujuuden kehitystä, mutta kasvattaa loppulujuutta sementtiä enemmän. Betonimassan kovettumista voidaan mahdollisesti nopeuttaa kiihdyttimillä tai kovettuvan betonimassan lämmittämällä.

Hitaamman lujuudenkehityksen ja pienemmän hydratoitumislämmön vuoksi alhaisen vähähiilisyysluokan betoni vaatii tarkempaa olosuhteiden hallintaa kylmissä olosuhteissa kuin normaali rakennebetoni. Talvibetonissa on vaikeaa päästä GWP.70 arvoon. Masuunikuonaa sisältävä betoni vaatii kylmissä olosuhteissa enemmän lämmitystä kuin normaalirakennebetoni, johon kuuluu enemmän energiaa, joka kasvattaa hiilidioksidipäästöjä. (Järvinen, 2022)

Hitaampi betonin lujuudenkehitys voidaan ottaa huomioon suunnittelussa. Rakennetta voidaan kuormittaa ennen betonin arvosteluikää, joka on 28 tai 91 päivää. Betonin puristuslujuus kasvaa normaalisti 28 ja 91 vuorokauden välillä 10...30 % sideaineen koostumuksesta riippuen. Suunnittelijan on tietenkin varmistettava, ettei kuormitukset ennen arvosteluikää ylitä alhaisempaa lujuustasoa. (Suomen betoniyhdistys, 2017)

Moni osa talo- ja toimistorakennuksesta kuuluu sisärakenteisiin, kuten runko, johon kuuluu paljon betonia. Sisärakenteiden hiilijalanjälki koko rakennuksen hiilijalanjäljestä on suuri. Runkoon on sitoutunut noin 60 prosenttia rakennuksen hiilijalanjäljestä. Sisärakenteet kannattaa valmistaa vähähiilisestä betonista. Rasitusluokat eivät ole erityisen vaativia ja vähähiilistä betonia on helpohkosti saatavilla rakenteisiin. Rakennuksen hiilijalanjälkeä voidaan merkittävästi vähentää käyttämällä vähähiilistä betonia sisärakenteissa, kuten välipohjissa ja kantavissa seinissä.

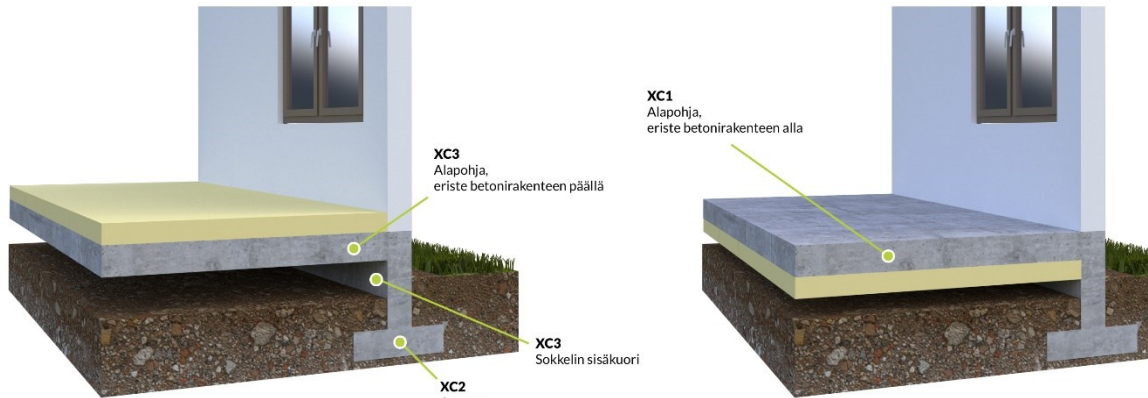
Elementtejä löytyy markkinoilta vähähiilisenä myös sisärakenteisiin. Vähähiilisillä seinä- ja laattaelementeillä voidaan vähentää betonirakenteisen rungon hiilidioksidipäästöjä jopa kolmanneksella. Vähähiilisiä seinäelementtejä voidaan tällä hetkellä käyttää ainoastaan väliseinä- ja sisäkuorirakenteisiin. (Parman vähähiiliset seinäelementit)

Vähähiilisiä ontelolaattoja voidaan helposti käyttää ala-, ylä- ja välipohjarakenteissa, sillä ne ovat teknisesti samankaltaisia kuin normaalit ontelolaatat. Vähähiilisiä ontelolaattoja on saatavilla tällä hetkellä laattatyypeillä P20–P37. Vähähiiliset ontelolaatat eivät sovellu erikoisrasitusluokkiin, kuten sulfaatinkestävyyttä vaativiin rakenteisiin. (Parman vähähiilinen ontelolaatta)

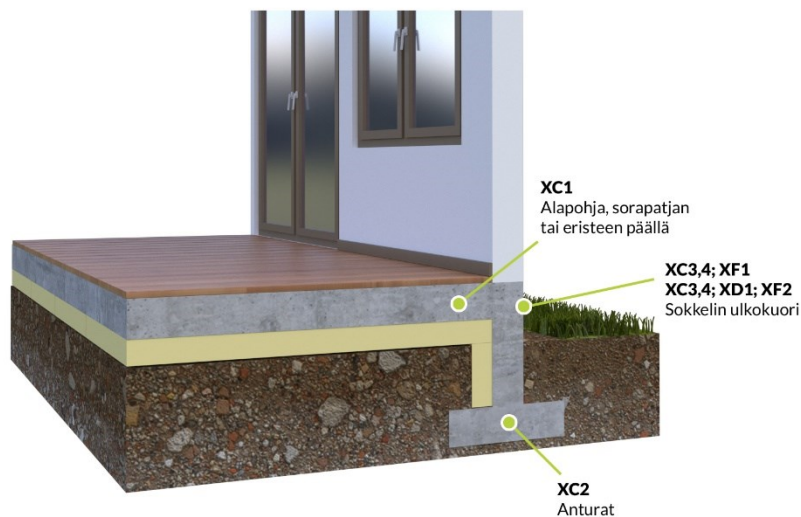
## 5.5 Perustusrakenteet

Perustusrakenteista suurin osa sijaitsee maan alla ja osa maanpinnan lähetyvillä. Maan alla sijaitsevat rakenteet, kuten anturat, sijaitsevat tarpeeksi syvällä maan alla, jolloin lämpötilat pysyvät suhteellisen tasaisina ja lämpötila ei laske pakkasen puolelle. Maan alla on pääosin aina kosteutta ja maa on harvoin kuiva. Maan alla olevien perustusrakenteiden rasitusluokka on pääosin XC2. Maanpinnalla kosteus ja lämpötila vaihtelevat. Tuulettuvassa alapohjassa, jossa eriste on alapohjan päällä, rasitusluokka on XC3. Jos eriste on alapohjan ja maanpinnan välissä rasitusluokka on XC1, jota käsiteltiin sisärakenteiden kappaleessa 5.4. Sokkelin sisäkuoren rasitusluokka on XC3 ja ulkokuoren rasitusluokka voi olla XC3,4; XF1, jota käsitellään pakkasrasituksen alaisten rakenteiden kappaleessa

5.6, tai XC3,4; XD1; XF2, jota käsitellään pakkasuolarasituksen alaisten rakenteiden kapaleessa 5.7. Perustusrakenteiden rasisitusluokat näkyvät alla olevista kuvista 28 ja 29.



Kuva 28 Tyypilliset rasisitusluokat perustusrakenteissa tuulettuvassa alapohjassa (Betoniyhdistys, 2023)



Kuva 29 Tyypilliset rasisitusluokat perustusrakenteissa maanvaraisessa alapohjassa (Betoniyhdistys, 2023)

XC2 rasisitusluokassa rakenne on kostea ja harvoin kuiva. XC2 rasisitusluokkaan kuuluvat useimmat perustukset, siltojen perustukset ja siirtymälaatat. XC3 rasisitusluokassa rakenne on kohtalaisen kostea. XC3 rasisitusluokkaan kuuluvat esimerkiksi sokkelin sisäkuori ja tietyissä tapauksissa alapohja. Rasisitusluokkien betoni voi sisältää raudoitusta tai muita metalliosia. (SFS-EN 206, 2021; Timonen-Nissi, 2019) Karbonatisoituminen on hidasta XC2-rasisitusluokan olosuhteissa (Suomen betoniyhdistys, 2017, s. 17). Perustuksen rasisitusluokat liittyvät karbonatisoitumiseen, jota on käsitelty luvussa 2.3.

Rasisitusluokat rajoittavat sallittuja sementtityyppejä. XC2 ja XC3 rasisitusluokissa voidaan käyttää portlandsementtiä, portlandseossementtiä ja masuunikuonasementtiä. Rasisitusluokissa sallitut seosainemäärät nähdään taulukosta 12. (Suomen betoniyhdistys, 2023) Seosaineita voidaan käyttää suuria määriä perustusrakenteiden yleisissä rasisitusluokissa,

jolloin niiden avulla betonin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen pieneksi on mahdollista.

Taulukko 12 Seosaineiden sallitut määrät tyypillisissä perustusrakenteiden rasitusluokissa XC2 ja XC3 (Suomen betoniyhdistys, 2023)

**Esimerkkejä sallituista seosaineiden enimmäislisäyksistä  
%-osuuksina sideaineen painosta (1). Käyttöikä 50...200 vuotta**

| Seosaine                   | Tyypilliset rasitusluokat perustusrakenteissa |        |
|----------------------------|---|--------|
|                            | XC2   | XC3    |
| Silika                     | 10  |        |
| Lentotuhka                 | 30  |        |
| Masuunikuona               | 80  |        |
| Vähimmäis-<br>lujuusluokka | C20/25  | C30/37 |

(1) Sementin sisältämä seosaineiden määrä tulee ottaa huomioon betoniin lisättävien seosaineiden osuuksia laskettaessa, jos käytetään muuta sementtiä kuin CEM I.

XC2 ja XC3 rasitusluokissa betonin valmistaminen vähähiilisenä ei tuota suuria haasteita. Rasitusluokat eivät ole mahdollittoman vaativia, jolloin vähähiilisen betonin valmistaminen ei ole suuri ongelma. Muun muassa masuunikuona toimii hyvin sideaineena XC2 ja XC3 rasitusluokissa, vaikka se mahdollisesti kasvattaa betonin karbonatisoitumista. Saatavuuteen vaikuttaa enemmän laadunvarmistamisikä, raaka-aineiden saatavuus ja haluttu vähähiilisyysluokka. Kaikilla valmisbetonitehtailla ei ole vaadittuja raaka-aineita valmistaa ainakaan alhaisempia vähähiilisyysluokan betonilaatuja, jolloin olisi hyvä varmistaa saatavuus, kun se on mahdollista. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

XC2 luokan puristuslujuuden vähimmäisvaatimus on C20/25 ja XC3 luokan C30/37 (SFS 7022). Vähähiilisyysluokan betonien lujuudet ovat C20/25-C50/60. C85/95 lujuista vähähiilistä betonia on valmistettu, mutta se menee BY vähähiilisyysluokituksen vaatimusten ympärille (Autio, 2023).

Laadunvarmistusiän ollessa 28 päivää perustusrakenteiden rasitusluokkien betonia on saatavilla vähähiilisyysluokan lujuuksissa GWP.70 asti ilman pakkasrasitusta. Jos laadunvarmistusikä voi olla 91 päivää, alle C30/37 lujuusluokan betoneita on helpommin saatavilla jopa GWP.40 luokassa ja lujempia laatuja GWP.55 luokassa. Yli C30/37 lujuisia betoneita on saatavilla vähähiilisyysluokassa GWP.40 mutta se on varmistettava aina tapauskohtaisesti. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

XC2 ja XC3 rasitusluokkien saatavuus riippuen vähähiilisyysluokituksesta, puristuslujuudesta ja laadunvarmistusiästä nähdään alla olevasta taulukosta 13. Laajemmat taulukot vähähiilisten betoneiden saatavuudesta löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 13 Rasitusluokkien XC2 ja XC3 betonien saatavuus 50...200 vuoden suunnitteluiällä 3/2023

| Puristus-<br>lujuus | Laadunvar-<br>mistus ikä | GWP.REF | GWP.85 | GWP.70<br>(1) | GWP.55<br>(1) | GWP.40<br>(1) |
|---------------------|--------------------------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| C20/25              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C25/30              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C30/37              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C35/45              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C40/50              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C45/55              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C50/60              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |

|  |   |
|--|---|
|  | Todennäköisesti yleisesti saatavilla                                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (2)                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (2)                  |
|  | Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (2) |
|  | Todennäköisesti ei vielä saatavilla (2)                                 |

(1) Betonin hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon

(2) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

Päästöluokan alentaminen tarkoittaa seosaineiden määrän kasvua. Seosaineena käytetään pääosin masuunikuonaa, sillä sitä voidaan lisätä betonimassaan suuria määriä. Masuunikuona kuitenkin hidastaa betonin alkulujuuden kehitystä, mutta kasvattaa loppulujuutta sementtiä enemmän. Betonimassan kovettumista voidaan mahdollisesti nopeuttaa kiihdyttimillä tai kovettuvan betonimassan lämmittämällä.

Hitaamman lujuudenkehityksen ja pienemmän hydratoitumislämmön vuoksi alhaisen vähähiilisyysluokan betoni vaatii tarkempaa olosuhteiden hallintaa kylmissä olosuhteissa kuin normaali rakennebetoni. Talvibetonissa on vaikeaa päästä GWP.70 arvoon. Masuunikuonaa sisältävä betoni vaatii kylmissä olosuhteissa enemmän lämmitystä kuin normaalirakennebetoni, johon kuluu enemmän energiaa, joka kasvattaa hiilidioksidipäästöjä. (Järvinen, 2022)

Hitaampi betonin lujuudenkehitys voidaan ottaa huomioon suunnittelussa. Rakennetta voidaan kuormittaa ennen betonin arvosteluikää, joka on 28 tai 91 päivää. Betonin puristuslujuus kasvaa normaalisti 28 ja 91 vuorokauden välillä 10...30 % sideaineen koostumuksesta riippuen. Suunnittelijan on tietenkin varmistettava, ettei kuormitukset ennen arvosteluikää ylitä alhaisempaa lujuustasoa. (Suomen betoniyhdistys, 2017)

Perustusten osuus talo- ja toimistorakennuksen kokonaishiilidioksidijalanjäljestä ei ole hirveän suuri. Perustuksiin kuuluu huomattavasti vähemmän betonia kuin rakennuksen runkoon. XC2 ja XC3 rasisluokan vähähiilistä betonia on kuitenkin varsin helposti saatavilla, jolloin voi olla kannattavaa hyödyntää sitä perustusrakenteiden valmistamiseen.

## 5.6 Pakkasrasituksen alaiset rakenteet

Betonin pakkasenkestävyys on kovettuneen betonin kyky vastustaa toistuvien jäätymissulamissykliä rappauttavaa vaikutusta betonin ollessa kostea. Kysymys on kestoajasta tietyissä olosuhteissa. Pakkaskestävyys ei ole mikään absoluuttinen ominaisuus. (Betonitieto)

Pakkasrasitus johtuu betonin huokoisuudesta. Betoni imee itseensä vettä kosteassa ympäristössä. Veden jäätyessä huokoisissa syntyy huokoisiin painetta, joka pystyy rappauttamaan betonia. Betoniin muodostuva ylipaine veden jäätyksen johdosta aiheuttaa sisäisiä säröjä ja halkeamia. Ylipaine johtuu veden tilavuuden laajentumisesta sen jäätyessä. Vesi jäätyessään laajenee noin 9 tilavuusprosenttia. Betonin vaurioituminen pakkasrasituksesta voidaan huomata lujuuden menetyksenä, tilavuuden kasvuna, läpäisevyyden lisääntymisenä tai pinnan rapautumisena. Pinnan rapautuminen esiintyy halkeiluna ja lohkeamisena. Edetessään pakkasrapautuminen johtaa betonin lujuuden ja koossapysyvyyden menetykseen. Suomen olosuhteissa pakkasrapautuminen ja pakkassuolarapautuminen ovat merkittäviä rapautumisilmiöitä. (Betonitieto)

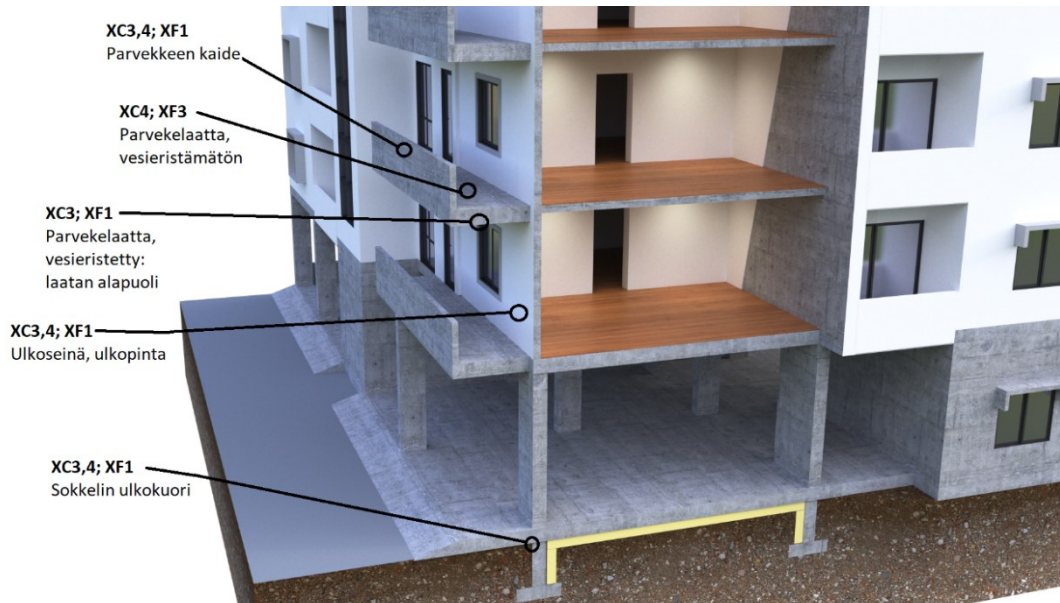
Veden aiheuttama pakkasrapautuminen muodostaa betoniin pääsääntöisesti poikittaista säröilyä. Tätä säröilyä ei pysty näkemään rakenteesta paljaalla silmällä, vaan sen huomaamiseen vaaditaan poranäytteiden tutkimista. Säröilyn/halkeilun johdosta betonin vetolujuus menetetään. Esimerkiksi parvekerakenteissa pitkälle edennyt pakkasrapauma on turvallisuusriski. (Betonitieto)

Pakkasrasituksen alaiset rakenteet ilman suolarasitusta jaetaan kahteen eri luokkaan: pystysuoriin rakenteisiin ja vaakasuoriin rakenteisiin. Pystysuorat rakenteet kuuluvat XF1 rasisluokkaan ja vaakasuorat rakenteet XF3 rasisluokkaan. XF1 rasisluokassa on kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita. XF3 rasisluokassa on suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita. Rasisluokkaan XF1 kuuluvat esimerkiksi julkisivut ja sokkelit sekä suolaamattomien teiden siltojen osat, kuten kansilaatta, palkit, maa- ja välituet. Rasisluokkaan XF3 kuuluvat esimerkiksi parvekkeet, siltapilarit ja muut rakenteet sisävesien vesirajassa, patorakenteet, makean veden altaat sekä suolaamattomien teiden siltojen osat, kuten reunapalkit, siirtymälaatat, pilarimaiset välituet, rengaskehäsiltojen peruslaatat ja vesistösiltojen suojaamattomat vedenvaihtelualan rakenteet. (SFS-EN 206, 2021; Timonen-Nissi, 2019)

Pakkasrasituksen kanssa betonilla on yleensä myös jokin muu rasisluokka, kuten XC3 tai XC4, eikä vain XF-rasisluokka. Esimerkiksi XC3,4; XF1 rasisluokkayhdistelmä on rakenteella, joka on osittain sateelta suojattu pystyrakenne pakkasrasituksella. (Suo-



men betoniyhdistys, 2017) XF-rasitusluokka on kuitenkin vaativampi kuin XC-rasitusluokka, minkä vuoksi se on määräävä betonin valmistuksessa (SFS 7022, 2019). Kuvasta 30 nähdään talon rakentamisessa pakkasrasituksen alaiset rakenteet.



Kuva 30 Talon pakkasrasituksen rasitusluokat ([Muokattu] Betoniyhdistys, 2023)

Rasitusluokat rajoittavat sallittuja sementtityyppejä. XF1 ja XF3 luokissa voidaan käyttää portlandsementtiä, portlandseossementtiä ja masuunikuonasementtiä. (SFS 7022, 2019) XF1 ja XF3 rasitusluokissa sallittuja sementtejä ovat yhtä lukuun ottamatta samat kuin XC-rasitusluokassa sallitut sementtityypit. Pakkasrasituksessa vaadittava sementin määrä on suurempi verrattuna XC-rasitusluokkaan ja betoniin vaaditaan tietty ilmamäärä. Rasitusluokissa sallitut seosainemäärät nähdään taulukosta 14. (Suomen betoniyhdistys, 2023) Seosaineet mahdollistavat betonin hiilidioksidipäästöjen vähentämisen ja näin vähähiilisen betonin valmistamisen.

Taulukko 14 Seosaineiden sallitut määrät tyypillisissä pakkasrasituksen rasitusluokissa talon rakentamisessa (Suomen betoniyhdistys, 2023)

**Esimerkkejä sallituista seosaineiden enimmäisliäyksistä %-osuuksina sideaineen painosta (1)**

| Käyttöikä 50 vuotta  |                        |                |
|--|------------------------|----------------|
| Tyypilliset rasitusluokat pakkasrasituksessa talon rakenteissa |                        |                |
|  | Pystyrakenteet         | Vaakarakenteet |
| Seosaine   | XC3; XF1 ja XC3,4; XF1 | XC4; XF3       |
| Silika   | 10                     |                |
| Lentotuhka   | 30                     |                |
| Masuunikuona   | 80                     |                |
| Vähimmäislujuusluokka  | C30/37                 |                |

(1) Sementin sisältämä seosaineiden määrä tulee ottaa huomioon betoniin lisättävien seosaineiden osuuksia laskettaessa, jos käytetään muuta sementtiä kuin CEM I.

Vähähiilisen betonin saatavuuteen vaikuttavat pakkasrasituksen rasisitusluokkien lisäksi laadunvarmistusikä, raaka-aineiden saatavuus ja haluttu vähähiilisyysluokka. Kaikilla valmisbetonitehtailla ei ole vaadittuja raaka-aineita valmistaa ainakaan alhaisempia vähähiilisyysluokan betonilaatuja, jolloin olisi hyvä varmistaa saatavuus, kun se on mahdollista. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

XF1 ja XF3 rasisitusluokkien puristuslujuuden vähimmäisvaatimus on C30/37, joka on sama kuin XC3 ja XC4 rasisitusluokissa (SFS 7022). Vähähiilisyysluokan betonien lujuudet ovat C20/25-C50/60. C85/95 lujuista vähähiilistä betonia on valmistettu, mutta se menee BY vähähiilisyysluokituksen vaatimusten ympärille (Autio, 2023).

Laadunvarmistusiän ollessa 28 päivää pakkasrasituksen rasisitusluokkien betoneita on kaikissa vähähiilisyysluokan lujuuksissa saatavilla GWP.70 asti. Jos laadunvarmistusikä voi olla 91 päivää, yli C30/37 lujuusluokan betoneita pakkasrasitusluokissa on saatavilla GWP.55 luokkaan asti. Betonia on saatavilla vähähiilisyysluokassa GWP.40 mutta se on varmistettava aina tapauskohtaisesti. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

Pakkasrasitusluokkien saatavuus riippuen vähähiilisyysluokituksesta, puristuslujuudesta ja laadunvarmistusiästä nähdään alla olevasta taulukosta 15. Laajemmat taulukot vähähiilisten betoneiden saatavuudesta löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 15 Esimerkiksi rasisitusluokkien XC3; XF1, XC3,4; XF1 ja XC4; XF3 betonien saatavuus 50 vuoden suunnitteluiällä 3/2023

| Puristuslujuus | Laadunvarmistus ikä | GWP.REF | GWP.85 | GWP.70<br>(1) | GWP.55<br>(1) | GWP.40<br>(1) |
|----------------|---------------------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| C30/37         | 28 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
|                | 91 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
| C35/45         | 28 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
|                | 91 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
| C40/50         | 28 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
|                | 91 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
| C45/55         | 28 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
|                | 91 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
| C50/60         | 28 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |
|                | 91 d                | ■       | ■      | ■             | ■             | ■             |

|   |   |
|---|---|
| ■ | Todennäköisesti yleisesti saatavilla                                    |
| ■ | Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (2)                    |
| ■ | Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (2)                  |
| ■ | Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (2) |
| ■ | Todennäköisesti ei vielä saatavilla (2)                                 |

(1) Betonin hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon

(2) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

Päästöluokan alentaminen tarkoittaa seosaineiden määrän kasvua. Seosaineena käytetään pääosin masuunikuonaa, sillä sitä voidaan lisätä betonimassaan suuria määriä. Masuunikuona kuitenkin hidastaa betonin alkulujuuden kehitystä, mutta kasvattaa loppulujuutta sementtiä enemmän. Betonimassan kovettumista voidaan mahdollisesti nopeuttaa kiihdyttimillä tai kovettuvan betonimassan lämmittämällä.

Hitaamman lujuudenkehityksen ja pienemmän hydratoitumislämmön vuoksi alhaisen vähähiilisyysluokan betoni vaatii tarkempaa olosuhteiden hallintaa kylmissä olosuhteissa kuin normaali rakennebetoni. Talvibetonissa on vaikeaa päästä GWP.70 arvoon. Masuunikuonaa sisältävä betoni vaatii kylmissä olosuhteissa enemmän lämmitystä kuin normaali rakennebetoni, johon kuuluu enemmän energiaa, joka kasvattaa hiilidioksidipäästöjä. (Järvinen, 2022)

Hitaampi betonin lujuudenkehitys voidaan ottaa huomioon suunnittelussa. Rakennetta voidaan kuormittaa ennen betonin arvosteluikää, joka on 28 tai 91 päivää. Betonin puristuslujuus kasvaa normaalisti 28 ja 91 vuorokauden välillä 10...30 % sideaineen koostumuksesta riippuen. Suunnittelijan on tietenkin varmistettava, ettei kuormitukset ennen arvosteluikää ylitä alhaisempaa lujuustasoa. (Suomen betoniyhdistys, 2017)

Julkisivut ja parvekkeet kuuluvat pakkasrasituksen alaisiin rakenteisiin. Julkisivujen osuus talo- ja toimistorakennusten hiilidioksidipäästöistä on noin 10 prosentin luokkaa. Parvekkeiden osuus hiilidioksidipäästöistä on todella pieni verrattuna rungon päästöihin. XC3; XF1, XC3,4; XF1 ja XC4; XF3 rasitusluokkien betoneita on saatavilla vähähiilisenä betonina. Pakkasrasituksen alaisissa rakenteissa ei kannata käyttää pientä vähähiilisyysluokan betonia, sillä saatavuus on huono. Hiilidioksidipäästöjen vähennystä voidaan saada esimerkiksi GWP.70 betonilla, mutta päästöjen vähennys on vähäisempää kuin rungossa pienemmän betonin menekin vuoksi. Jos rakennukselta ei vaadita merkittäviä hiilidioksidipäästöjen vähennyksiä, voi olla helpompaa käyttää normaalia pakkasrasituksen kestävää betonia.

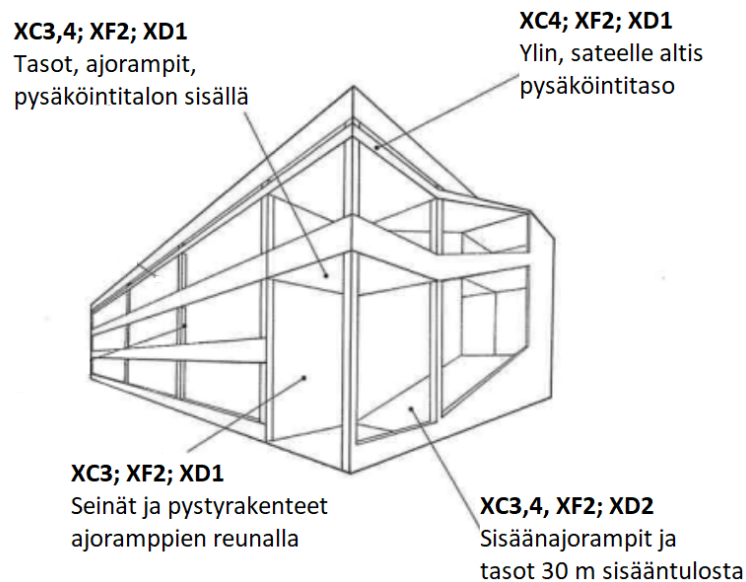
## **5.7 Pakkassuolarasituksen alaiset rakenteet**

Suola lisää huomattavasti betonirakenteisiin kohdistuvia pakkasrasituksia. Suolat tulevat rakenteeseen pääosin merivedestä sekä lumen ja jään sulattamiseen käytettävistä tiesuolista. Kloridien vaikutuksesta vedelläkyllästysaste nousee ja kriittinen kyllästysaste laskee. Vedelläkyllästysasteella tarkoitetaan sitä osuutta, joka betonin kokonaishuokostilavuudesta on täyttynyt vedellä. Vedelläkyllästysaste kasvaa, koska alhaisissa lämpötiloissa ja kloridisuolojen läsnä ollessa betoniin pystyy imeytymään lähes jatkuvasti kosteutta rakenteen pinnalta ja ilmasta. Kriittinen kyllästysaste alenee, sillä kloridisuolojen vaikutuksesta kasvaa jäätympaine ja betonin kyky vastustaa näitä paineita. Kloridisuolat vaikuttavat myös sementtikiveen kemiallisesti, minkä vuoksi betonin pakkaskestävyys heikenee. (Betonitieto)

Pakkassuolarasituksen alaiset rakenteet jaetaan kahteen eri luokkaan: pystysuoriin rakenteisiin ja vaakasuoriin rakenteisiin. Pystysuorat rakenteet kuuluvat XF2 rasitusluokkaan ja vaakasuorat rakenteet XF4 rasitusluokkaan. XF2 rasitusluokassa on kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet. XF4 rasitusluokassa on suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi. Rasitusluokkaan XF2 kuuluu esimerkiksi meluseinät ja sokkelit tien vieressä sekä suolattavien teiden siltojen osat, kuten päällysraken-

teen palkit ja kansilaatat, maa- ja välituet. Rasisitusluokkaan XF4 kuuluu esimerkiksi pysäköintitasot, päällysteet, autotallit, suolattavien teiden siltojen reunapalkit, siirtymäläatat, betonikaiteet, rengaskehän peruslaatat, välituet kun sillan alittavaa tietä suolataan sekä meressä olevan sillan suojaamattomat rakenteet tasolta nw-1 ylöspäin. (SFS-EN 206, 2021; Timonen-Nissi, 2019)

Pakkassuolarasituksen kanssa betonilla on yleensä myös jokin muu rasisitusluokka, kuten XC3 ja XD1 rasisitusluokat, eikä vain XF-rasisitusluokkaa. Esimerkiksi XC3; XF2; XD1 rasisitusluokka yhdistelmä on rakenteella, joka on sateelta suojattu rakenne kloridirasituksella ja lievällä pakkas-suolarasituksella. XD-luokka on vaativampi kuin XC-luokka, minkä vuoksi XC-luokalla ei ole merkitystä. (Suomen betoniyhdistys, 2017) XF-rasisitusluokka on vaativampi kuin XD-rasisitusluokka, minkä vuoksi se on määräävä betonin valmistuksessa (SFS 7022, 2019). Alla olevasta kuvasta 31 nähdään esimerkiksi kylmän pysäköintitalon pakkassuolarasituksen alaiset rakenteet.



Kuva 31 Parkkitalon pakkassuolarasituksen rasisitusluokat ([Muokattu] Suomen betoniyhdistys, 2017)

Rasisitusluokat vaikuttavat betonimassassa sallittuihin sementtityyppeihin. XF2 ja XF4 rasisitusluokissa voidaan käyttää portlandsementtiä ja portlandseossementtiä. Pakkassuolarasituksessa masuunikuonasementtiä ei voida käyttää, toisin kuin muissa rasisitusluokissa. (SFS 7022, 2019) SFS 7022 standardia päivitetään tällä hetkellä alkuvuodesta 2023. Päivitetystä standardista CEM III/A-tyyppiset sementit sallitaan myös rasisitusluokissa XF2 ja XF4. Tämä mahdollistaa CEM III/A sementin käytön kaikissa rasisitusluokissa betoninormien mukaisessa betonin valmistuksessa. (Heikkilä, 2022)

Pakkassuolarasituksen alaisen rakenteen rasisitusluokassa sallittuja sementtejä on vähiten muihin rasisitusluokkiin verrattuna. Pakkassuolarasituksessa vaadittava sementin määrä ja ilmamäärä ovat suurempia kuin XF1 ja XF3 rasisitusluokissa. Rasisitusluokissa sallitut seosainemäärät nähdään taulukosta 16. (Suomen betoniyhdistys, 2023) Seosaineiden käyttö mahdollistaa betonin hiilidioksidipäästöjen vähentämisen ja vähähiilisen betonin valmistamisen.

Taulukko 16 Seosaineiden sallitut määrät tyypillisissä pakkassuolarasituksen rasitusluokissa (Suomen betoniyhdistys, 2023)

**Esimerkkejä sallituista seosaineiden enimmäislisäyksistä %-osuuksina sideaineen painosta (1)**

| Käyttöikä 50 vuotta  |                 |                |
|--|-----------------|----------------|
| Esimerkki tyypillisistä rasitusluokista pakkassuolarasituksen alaisista rakenteista parkkitalossa ja melukaiteessa |                 |                |
|  | Pystyrakenteet  | Vaakarakenteet |
| Seosaine   | XC3,4; XF2; XD1 | XC3; XF4; XD3  |
| Silika   |                 | 10             |
| Lentotuhka   |                 | 30             |
| Masuunikuona   |                 | 50             |
| Vähimmäislujuusluokka  | C30/37          | C35/45         |

(1) Sementin sisältämä seosaineiden määrä tulee ottaa huomioon betoniin lisättävien seosaineiden osuuksia laskettaessa, jos käytetään muuta sementtiä kuin CEM I.

Pakkassuolarasitus on vaativin rasitusluokka vähähiiliselle betonille ja se tuottaa haasteita (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023). 50 prosentin masuunikuonan osuutta pidetään kriittisenä pakkassuolakestävyuden kannalta. Tutkimuksissa on todettu, että suurempi määrä vaikuttaa negatiivisesti betonin pakkassuolakestävyyteen. (Iqbal, 2022)

Vähähiilisen betoni, saatavuuteen vaikuttavat pakkassuolarasituksen rasitusluokan lisäksi raaka-aineiden saatavuus ja haluttu vähähiilisyysluokka. Kaikilla valmisbetonitehtailla ei ole vaadittuja raaka-aineita valmistaa vähähiilisyysluokan betonilaatuja, jolloin olisi hyvä varmistaa saatavuus, jos se on mahdollista. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

XF2 rasitusluokan puristuslujuuden vähimmäisvaatimus on C30/37, kun käyttöikä on 50 vuotta, ja C35/45, kun käyttöikä on 100 vuotta. XF4 rasitusluokan puristuslujuuden vähimmäisvaatimus on C35/35, kun käyttöikä on 50 vuotta, ja C40/50, kun käyttöikä on 100 vuotta. (SFS 7022) Vähähiilisyysluokan betonien lujuudet ovat C20/25-C50/60. C85/95 lujuista vähähiilistä betonia on valmistettu, mutta se menee BY vähähiilisyysluokituksen vaatimusten ympärille (Autio, 2023).

Pakkassuolarasituksen täyttävää vähähiilistä betonia on saatavilla varmasti tällä hetkellä ainoastaan vähähiilisyysluokkaan GWP.70 asti. Betonin laadunvarmistusikä voi tällöin olla 28 päivää. Joissakin tapauksissa se kuitenkin on 91 päivää. (Autio, 2023; Haatainen, 2023; Junnila, 2023)

Pakkassuolarasitusluokkien saatavuus riippuen vähähiilisyysluokituksesta, puristuslujuudesta ja laadunvarmistusiästä nähdään alla olevasta taulukosta 17. Laajemmat taulukot vähähiilisten betoneiden saatavuudesta löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 17 Esimerkiksi rasitusluokkien XC3,4; XF2; XD1 ja XC4; XF4; XD3 betonien saatavuus 50 vuoden suunnitteluiällä 3/2023

| Puristus-<br>lujuus | Laadunvar-<br>mistus ikä | GWP.REF | GWP.85 | GWP.70<br>(1) | GWP.55<br>(1) | GWP.40<br>(1) |
|---------------------|--------------------------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| C30/37              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C35/45              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C40/50              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C45/55              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |
| C50/60              | 28 d                     |         |        |               |               |               |
|                     | 91 d                     |         |        |               |               |               |

|  |   |
|--|---|
|  | Todennäköisesti yleisesti saatavilla                                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (2)                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (2)                  |
|  | Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (2) |
|  | Todennäköisesti ei vielä saatavilla (2)                                 |

(1) Betonin hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon

(2) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

Päästöluokan alentaminen tarkoittaa seosaineiden määrän kasvua. Seosaineena käytetään pääosin masuunikuonaa, sillä sitä voidaan lisätä betonimassaan suuria määriä. Masuunikuona kuitenkin hidastaa betonin alkulujuuden kehitystä, mutta kasvattaa loppulujuutta sementtiä enemmän. Betonimassan kovettumista voidaan mahdollisesti nopeuttaa kiihdyttimillä tai kovettuvan betonimassan lämmittämällä.

Hitaamman lujuudenkehityksen ja pienemmän hydratoitumislämmön vuoksi alhaisen vähähiilisyysluokan betoni vaatii tarkempaa olosuhteiden hallintaa kylmissä olosuhteissa kuin normaali rakennebetoni. Talvibetonissa on vaikeaa päästä GWP.70 arvoon. Masuunikuonaa sisältävä betoni vaatii kylmissä olosuhteissa enemmän lämmitystä kuin normaalirakennebetoni, johon kuluu enemmän energiaa, mikä kasvattaa hiilidioksidipäästöjä. (Järvinen, 2022)

Hitaampi betonin lujuudenkehitys voidaan ottaa huomioon suunnittelussa. Rakennetta voidaan kuormittaa ennen betonin arvosteluikää, joka on 28 tai 91 päivää. Betonin puristuslujuus kasvaa normaalista 28 ja 91 vuorokauden välillä 10...30 % sideaineen koostumuksesta riippuen. Suunnittelijan on tietenkin varmistettava, ettei kuormitukset ennen arvosteluikää ylitä alhaisempaa lujuustasoa. (Suomen betoniyhdistys, 2017)

Pakkassuolarasitus on niin vaativa, ettei vähähiilisellä betonilla voi tällä hetkellä saada suuria hiilidioksidipäästöjä. Jos rakenteessa on vain vähän pakkassuolarasituksen alaista

rakennetta, on viisasta käyttää normaalia pakkasuolarasituksen kestäväää betonia eikä vähähiilistä betonia. Kun määrät ovat suuret, kuten mahdollisesti suolattavan tien viereisessä meluseinässä, voi käyttää esimerkiksi GWP.70-luokan vähähiilistä betonia hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Merkittäviä päästöjen vähennyksiä ei kuitenkaan luultavasti saa vähähiilisellä betonilla. Talo- ja toimistorakennuksessa pakkasuolarasituksen alaisia rakenteita on pääosin niin vähän, ettei niissä ole kannattavaa käyttää vähähiilistä betonia.

Infrarakentamisessa pakkasuolarasituksen alaisissa rakenteissa käytetään P-luku betonia. Se on Väyläviraston käytössä oleva pakkasenkestävyyslukumenetelmä. P-lukumenettelyn perustana on monien vuosikymmenten aikana tehdyt laboratorio- ja kenttäkokeiden antamat pakkasenkestävyyskokeiden tulokset. Menettelyssä otetaan huomioon myös betonitekniiikan lisätutkimuksien mukanaan tuomat tarkennukset ja eurooppalaisissa ja kansallisissa betoninormiuudistuksessa tapahtuneet kehitykset. (Betonitieto)

P-lukumenetelmä vaatii, että betoni täyttää rakennesuunnitelmissa kuvaillut puristuslujuus- ja pakkasenkestävyysvaatimukset sekä muut vaaditut betonin laatuvaatimukset. P-lukumenetelmässä edellytetään pakkasenkestävän betonin ennakkokokeita. Menetelmässä pakkasenkestävä betoni on suhteutettava vaadittujen vaatimusten mukaisesti sementtilaatujen, sideainemäärien, seosaineiden, lisäaineiden, kiviaineksen hienoainemäärän ja vähimmäisilmamäärän suhteen. Betoni tulee myös jälkihoitaa siten, että jälkihoitolla saavutetaan vähintään seitsemän vuorokauden kosteajälkihoitoa vastaava taso. P-lukua käytetään enimmäkseen Väyläviraston hallinnoimissa kohteissa ja joissain muissa vaativissa kohteissa tilaajan niin vaatiessa. (Betonitieto)

P-luku tuottaa haasteita vähähiiliselle betonille sen vaativuuden vuoksi. P-lukubetoneissa tiukimpien rasitusluokkien ja tiukimpien GWP-luokkien täyttäminen samaan aikaan on haasteellista. P-luku betoneiden laadunvarmistusikä on tällä hetkellä 91 päivää. P0-luku betonia on saatavilla vähähiilisyysluokassa GWP.70 ja kohteittain GWP.55. P30-luku betonia on saatavilla vähähiilisyysluokassa GWP.70 ja P50 on saatavilla GWP.85. (Haatainen, 2023; Junnila, 2023) Taulukot vähähiilisten betoneiden saatavuudesta löytyvät liitteestä 1.

P-lukubetonia vähähiilisenä voidaan tällä hetkellä käyttää infrarakentamisessa, jos 91 päivän laadunvarmistusikä on mahdollinen. Tämä vaatii tarkempaa ajankäyttöä ja suunnittelua. Jos rakenne on jälkijännitetty, 91 päivän laadunvarmistusikä hidastaa huomattavasti työmaan toimintaa ja aiheuttaa haasteita. Vähähiilisen betonin käyttäminen infrarakentamisessa on tällä hetkellä haastavaa ja vaatii projektilta valmiuksia sen hyödyntämiseen.

## 6 Johtopäätökset

Diplomityön pääasiallisena tavoitteena oli arvioida miten vähähiilinen betoni vaikuttaa suunnitteluun uudisrakentamisessa. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja asiantuntijoiden haastatteluna, ja työn lopputuloksena syntyi taulukot auttamaan suunnittelijaa valitsemaan vähähiilisyysluokka. Työssä keskityttiin seosaineilla valmistetun vähähiilisen betonin ominaisuuksiin, joita tällä hetkellä pääosin käytetään. Seosaineista masuunikuonalla on suurin käyttöaste vähähiilisen betonin valmistuksessa, sillä sitä voidaan käyttää suuria määriä rasisluokasta riippuen osan sementin korvikkeena. Muita seosaineita ei voida käyttää niin suuria määriä betonistandardien perusteella, minkä vuoksi hiilidioksidipäästövähennykset eivät ole niin suuret. Seosaineista on kokemusta pitkältä ajalta ja niistä on saatavilla paljon luotettavaa tutkimusaineistoa, minkä vuoksi niiden käyttö on helppoa ja luotettavaa.

Masuunikuonabetonin käyttöön liittyy haasteita, jotka tulee ottaa huomioon niiden käyttöä harkittaessa. Masuunikuonabetoni ei sovellu erityisen hyvin viileisiin olosuhteisiin, joissa vaaditaan usein nopeaa lujittumista mahdollisen jäänymiskestävyuden vuoksi. Masuunikuonabetonin vaikutuksesta saattaa työmaan aikataulu venyä sen hitaamman lujudenkehityksen vuoksi ja kustannuksen voivat nousta mahdollisten erilaisten lisätoimenpiteiden johdosta. Mahdollisia lisätoimenpiteitä voivat olla esimerkiksi kovettuvan betonin lämmittäminen kovettumisen nopeuttamiseksi ja välihoitoaineet. Ongelmat tulevat esiin erityisesti silloin, kun käytetään suurta masuunikuonapitoisuutta. Suuria hiilidioksidipäästövähennyksiä ei voida saavuttaa ilman ongelmia. Rakennusprojektiin ryhtyessä on oltava tietoinen ja valmiina masuunikuonabetonin lisävaatimuksiin.

Rakenteiden suunnittelussa voidaan ottaa huomioon vähähiilisen betonin hitaampi lujudenkehitys, kun halutaan käyttää matalaa vähähiilisyysluokkaa suurten hiilidioksidipäästövähennysten saavuttamiseksi. Suunnittelija voi mitoittaa, paljonko rakenteita voidaan kuormittaa ennen betonin laadunvarmistusikää. Tämä kuitenkin vaatii tietoa betonin lujudenkehityksestä, jotta suunnittelija tietää, mikä on betonin puristuslujuus tietyllä ajanhetkellä. Lujudenkehittyminen voidaan karkeasti arvioida suunnittelussa, mutta se on lämpötilasta riippuvainen. Olisi hyödyllistä, jos valmistajilta saisi tiedon siitä, minkälaiset heidän erilaisten vähähiilisyysluokkien betoneiden lujudenkehitykset erilaisissa ympäristöissä ovat, sillä valmistajien betonireseptit voivat erota toisistaan. Kun otetaan huomioon vähähiilisen betonin hitaampi lujudenkehitys, rakenne pitää mitoittaa useamman kerran, mikä todennäköisesti kasvattaa suunnittelun määrää ja suunnittelukustannuksia.

Masuunikuonan ja muiden seosaineiden määrät eivät tule riittämään vastaamaan kysyntään tulevaisuudessa, sillä ne syntyvät pääosin sivutuotteina, joita ei erityisesti valmisteta. Tämän vuoksi on tärkeää kehittää sementin hiilidioksidipäästöjen vähentämistä. Sementin kalsinoinnissa vapautuvaa hiilidioksidia ei voida välttää, minkä vuoksi sementin tuotannossa pitää kehittää hiilidioksidin talteenottoa. Kerättyä hiilidioksidia voidaan käyttää raaka-aineena muussa teollisuudessa tai se voidaan varastoida esimerkiksi maan sisään. Hiilidioksidin talteenotolla betonista on mahdollista saada hiilinegatiivista karbonatisoitumisreaktion ansioista.

Vähähiilisiä betoneita kehitetään jatkuvasti, minkä vuoksi työssä tehdyt taulukot tulevat muuttumaan. Esimerkiksi kiihdyttimiä kehitetään, jotta alhaisten vähähiilisyysluokkien betoneiden laadunvarmistusikä olisi 28 päivää. Lisäksi vähähiilisen betonin saatavuus



vaihtelee sijainnin mukaan. Kaikilla betonitehtailla ei ole raaka-aineita valmistaa kaikkia vähähiilisiä betoneita. Näiden syiden vuoksi olisi hyödyllistä, jos olisi saatavilla päivittyvä taulukko ja mahdollisesti tieto valmistajilta, mistä eri vähähiilisyysluokan betoneita on saatavilla. Pääkaupunkiseudulla saatavuus on luultavasti yleisesti hyvä usean betonitehtaan ansiosta.

Työssä on keskitytty pääosin valmisbetoniin ja elementit ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Tällä hetkellä vuonna 2023 on kehitteillä vähähiilisyysluokitus elementeille. Vähähiilisten elementtien saatavuutta voitaisiin tutkia samalla tavalla kuin tässä työssä on tutkittu vähähiilisen valmisbetonin saatavuutta. Vähähiilisistä elementeistä voitaisiin tehdä samanlaiset taulukot suunnittelijoille kuin tässä työssä on tehty. Yhdistelemällä valmisbetonin ja elementtien saatavuutta suunnittelija voisi helposti vertailla eri vaihtoehtoja ja valita parhaan sopivan rakentamistavan rakennukselle.

## 7 Yhteenveto

Diplomityössä tutkittiin, mitkä ovat ne vähähiilisen betonin ominaisuudet, jotka vaikuttavat suunnittelijan materiaalivalintaan ja missä rakenteissa vähähiilistä betonia on viisasta käyttää. Tarpeellisten taustatietojen selvittämiseksi työssä käsiteltiin myös sitä, mistä betonin hiilidioksidipäästöt syntyvät ja kuinka niitä voidaan vähentää käyttämällä seosaineita ja muita menetelmiä. Työssä keskityttiin uudisrakentamiseen ja seosaineilla valmistettuun betoniin. Työn lopputuloksena syntyi taulukot, joista suunnittelija voi helposti katsoa, voiko tarvittavan rakenteen betonina käyttää vähähiilistä betonia muun muassa rasisluokan ja saatavuuden perusteella. Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena ja asiantuntijoiden haastatteluina.

Betonin hiilidioksidipäästöt muodostuvat raaka-aineiden päästöistä, raaka-aineiden kuljetuksesta ja energiasta. Yli 80 prosenttia normaalin rakennebetonin hiilidioksidipäästöistä johtuu sementin valmistuksessa vapautuvista päästöistä, minkä vuoksi korvaamalla sementtiä pienempipäästöisillä vaihtoehdoilla, kuten seosaineilla tai vaihtoehtoisilla sideaineilla, betonin päästöjä voidaan vähentää. Tällä hetkellä betonin hiilidioksidipäästöjä vähennetään pääosin korvaamalla sementtiä seosaineilla, pääasiassa masuunikuonalla.

Hiilidioksidintalteenottoa sementin valmistuksessa kehitetään, minkä vuoksi tulevaisuudessa on mahdollista hiilidioksidivapaasementti. Tällöin betonirakenteet voivat olla hiilidioksidinegatiivisia karbonatisoitumisen ansiosta. Rakentamisessa betonirakenteiden päästöjä voidaan vähentää myös oikeanlaisella suunnittelulla, minkä ansiosta esimerkiksi betonia ja betoniterästä ei rakenteessa käytetä turhan suuria määriä.

Vähähiilistä betonia valmistetaan tällä hetkellä korvaamalla sementtiä seosaineilla, joiden vaikutuksesta osa betonin ominaisuuksista muuttuu. Pääasiassa seosaineena käytetään masuunikuonaa, jonka ansiosta saadaan hyvä kemiallinen kestävyys ja pienempi lujuskato lämpökäsittelyn kanssa. Alhaisen vähähiilisyysluokan betonin lujuudenkehitys on hitaampaa kuin normaalin rakennebetonin. Raja-arvona voidaan pitää GWP.70-luokan betonia, jolloin laadunvarmistusikä on 28 päivää. Alle sen laadunvarmistusikä on 91 päivää.

Vähähiilisen betonin hydratoitumislämpö on pienempi kuin normaalin rakennebetonin, minkä vuoksi se sopii massiivirakenteisiin, mutta ei niin loistavasti kylmiin olosuhteisiin. Kylmissä olosuhteissa vähähiilinen betoni vaatii tarkempaa olosuhteiden hallintaa kuin normaali rakennebetoni. Vähähiilisten betonien kuivuminen on samaa luokkaa kuin sementillä valmistettujen betonien, joten se ei tuota haasteita.

Vähähiilisen betonin saatavuuteen vaikuttaa rasisluokka, lujuusluokka, vähähiilisyysluokka, laadunvarmistusikä ja sijainti. Matalan vähähiilisyysluokan betonia on helpommin saatavilla pienemmissä lujuusluokissa, mutta kaikkia vähähiilisyysluokan lujuusluokkia löytyy. Vähähiilisyysluokan laskiessa myös betonin saatavuus heikkenee reseptien haastavuuden vuoksi. Kun vähähiilisyysluokka on pieni, joudutaan hiilidioksidipäästöjä hakea kaikista betonin raaka-aineista. Kaikilla betonitehtailla ei ole valmiuksia valmistaa ainakaan alhaisempia vähähiilisyysluokan betoneita, sillä tehtailla ei löydy vaadittuja raaka-aineita. Tämän vuoksi olisikin hyvä mahdollisuuksien mukaan varmistaa betonin saatavuus, ainakin kun projekti tehdään pienemmällä paikkakunnalla.

Vähähiilisiä betoneita on saatavilla kaikissa rasitusluokissa, mutta pakkasuolakestävänä sen saatavuus tuottaa haasteita. Masuunikuonan kriittisenä raja-arvona pakkasuolakestävyydessä pidetään 50 prosentin osuutta, jonka yli mentäessä betonin pakkasuolakestävyyds laskee. Tämän vuoksi matalan vähähiilisyysluokan saavuttaminen pakkasuolakestävissä betoneissa tuottaa haasteita. Pakkassuolarasituksessa voidaan kuitenkin saavuttaa GWP.70 vähähiilisyysluokka. Helpoiten alhainen vähähiilisyysluokka saavutetaan sisärakenteissa ja perustusrakenteissa, joissa rasitusluokkina on pääosin X0, XC1, XC2 ja XC3. Näissä rakenteissa voidaan saavuttaa jopa GWP.40 vähähiilisyysluokka riippuen betonin lujuudesta.

Sisärakenteissa ja perustusrakenteissa kannattaa käyttää matalaa vähähiilisyysluokkaa, sillä betonia on saatavilla helpohkosti ja betonimäärät rakenteissa ovat suuret. Näissä rakenteissa voidaan saavuttaa suuret hiilidioksidipäästövähennykset. Erikoisrakenteissa, joissa betonimäärät ovat pienet, voi olla helpompaa hyödyntää normaaleja sementillä valmistettuja betoneita. Erikoisrakenteissa suurta hiilidioksidipäästöjen vähennystä ei saavuteta käyttämällä vähähiilistä betonia ja vähähiilisen betonin saatavuus voi olla hankalaa.

## 8 Lähteet

Alimoradi, A. 2015. Sustainable Structural Design: Outlook and Potentials. Journal of Structural Engineering. Vol 141:3. ISSN 1943-541X. Saatavissa: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001194)

Autio, M. 2023. Kehityspäälikkö, Rudus Oy. Haastattelu sähköpostitse 20.02.2023.

Betonitieto. n.d. Suomen betoniyhdistys ry. Verkkosivu. [Viitattu 06.02.2023]. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/>

Betoniyhdistys. 2023. Kuvat sähköpostilla 12.04.2023.

Concretesolution. n.d. Karbonatisoituminen. Verkkosivu. [Viitattu 03.02.2023]. Saatavissa: <https://concretesolution.fi/karbonatisoituminen/>

Haatainen, M. 2023. Yksikönpäälikkö, Lujabetoni Oy. Haastattelu sähköpostitse 21.02.2023.

Heino, A., Jonsson, H., Klimscheffskij, M., Laine, A., Lehtomäki, J. ja Raivio, T. 2020. Osa 1. Rakennetun ympäristön hiilielinkaaren nykytila. Helsinki, Suomi: Rakennusteollisuus. 76 s. Saatavissa: [https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiili\\_seminaaries/raportit\\_lopulliset/rt-raportti-1\\_rakennetun-ympariston-hiilielinkaaren-nykytila\\_final.pdf](https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiili_seminaaries/raportit_lopulliset/rt-raportti-1_rakennetun-ympariston-hiilielinkaaren-nykytila_final.pdf)

Heikkilä, E. 2022. Kolmossementti CEM III/A 52,5 L on kestävä sideaineratkaisu vähähiiliseen betonirakentamiseen. Sementti. Vol 34:2. S. 28. ISSN 2342-2092. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti\\_2-2022\\_Final.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_2-2022_Final.pdf)

Hiilen sidonta. n.d. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu, [Viitattu 03.02.2023]. Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/vahahiilinen-betoni/hiilen-sidonta/>

Härkönen, T. 2021 Vähähiilinen betoni tulee vauhdilla. Betoni. Vol 91:4. S. 84–95. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104\\_84-95.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104_84-95.pdf)

Illikainen, M. n.d. Betonia teollisuuden sivuvirroista. RIL rakennustekniikka. [Viitattu 10.02.2023]. Saatavissa: <https://www.ril.fi/fi/rakennustekniikka/betonia-teollisuuden-sivuvirroista.html>

Iqbal, A., Al-Neshawy, F., Piironen, J. ja Punkki, J. 2022. Vähähiilisten betonien säilyvyysominaisuudet. Betoni. Vol 92:4. S. 70–77. ISSN 2323-1262 Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/12/BET\\_2204\\_70-77.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/12/BET_2204_70-77.pdf)

Junnila, J. 2023. Tuote- ja kehityspäälikkö, Swerock Oy. Haastattelu sähköpostitse 21.02.2023.

Järvinen, K. 2022. Vähähiilisen betonikerrostalon tuotannolliset haasteet ja hiilijalanjälki. Diplomityö. Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto. Vantaa. 84 s.

Kekkonen, T. 2021. Suomen betonikanta sitoo n. 5,2 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Concrete Solution. [Viitattu: 06.02.2023]. Saatavissa: <https://concretesolution.fi/suomen-betonikanta-sitoo-n-52-miljoonaa-tonnia-hiilidioksidia/>

Kekkonen, T. 2020. Tutkimustuloksia maailmalta – Betoni on hiilinielu. Concrete Solution. [Viitattu: 06.02.2023]. Saatavissa: <https://concretesolution.fi/tutkimustuloksia-maailmalta-betoni-on-hiilinielu/>

Kesti, J. 2019. Vähähiilistä rakentamista vai kiertotaloutta – mieluummin molempia. Teräsrakennusyhdistys. [Viitattu: 02.02.2023]. Saatavissa: <https://www.terasrakennusyhdistys.fi/fin/blogit/blogikirjoitukset-2021/19-2-vahahiilista-rakentamista-vai-kiertotaloutta/>

Kinnunen, W. 2016. Masuunikuonajauheen vaikutus betonin lujuudenkehitykseen. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteenala. Kuopio. 31 s. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111060/Kinnunen\\_Wilma.pdf;jsessionid=5BCAA74FA484D4BD94FA2DB812F934BA?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111060/Kinnunen_Wilma.pdf;jsessionid=5BCAA74FA484D4BD94FA2DB812F934BA?sequence=1)

Kosomaa, S., Mattila, J. ja Tepponen, P. 2015. Mitä betoni on. Betoni. Vol 85:2. S. 38–43. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502\\_38-43.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_38-43.pdf)

Kuittinen, M. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Helsinki, Suomi: Ympäristöministeriö. 54 s. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. ISBN: 978-952-361-029-3

Kuittinen, M. 2022. Rakennusten vähähiilisyyden arviointi. Rakennustekniikka. Vol 78:1. S. 32–34. ISSN 2243-0369. Saatavissa: <https://view.taiqa.com/ril/rakennustekniikka-1-2022#/page=1>

Kujala, M. 2021. Kalsinoidulla kaoliinisavella seostettujen sementtien toimivuus betonissa. Opinnäytetyö. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Turun AMK. Turku. 68 s. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/505067/Kalsinoidulla%20kaoliinisavella%20seostettujen%20sementtien%20toimivuus%20betonissa.pdf?sequence=2>

Lahdensivu, J. 2022. Vähähiilisen betonin mahdollisuudet asuinkerrostalon hiilijalanjäljen pienentämisessä. Betoni. Vol 92:3. S. 84–89. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/10/BET2203\\_84-89.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/10/BET2203_84-89.pdf)

Lavento, D. 2022. Betonirakenteita 70 prosenttia pienemmällä päästöillä: CEVO – Uuden sukupolven betoni. [Viitattu 13.02.2022]. Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/ajankohtaista/betonirakenteita-70-prosenttia-pienemmilla-paastoilla-cevo-uuden-sukupolven-betoni/>

Leveelahti, U. 2022. Kiertotalous tuo hiilipihin sementin ja laittaa hiilidioksidin kiertoon. Betoni. Vol 92:2. S. 72–83. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/05/BET2202\\_72-83.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/05/BET2202_72-83.pdf)

Liikanen, J. 2022. Hiilidioksidia sitovaa betonia. Sementti. Vol 34:2. S. 30–31. ISSN 2342-2092. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti\\_2-2022\\_Final.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_2-2022_Final.pdf)

Lyytinen, J. 2022. Vihreän sementin valmistus hyytyy masuunikuonan puutteeseen – ”Pyrimme hankkimaan sitä lisää Euroopasta”. Rakennuslehti. [Viitattu 09.02.2023]. Saatavissa: <https://www.rakennuslehti.fi/2022/09/vihrean-sementin-valmistus-hyytyy-masuunikuonan-puutteeseen-pyrimme-hankkimaan-sita-lisaa-euroopasta/>

Masuunikuonajauhe KJ400. 2019. Finnsementti. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe\\_KJ400.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Masuunikuonajauhe_KJ400.pdf)

Mattila, V. 2022. Kolmossementti vie ympäristöloikkaan. Sementti. Vol 34:1. S. 12. ISSN 2342-2092. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti\\_1-2022\\_FINAL.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_1-2022_FINAL.pdf)

Merikukka, H., Aho, T. ja Lahdensivu, J. 2022. Luokituksen vaikutus rakennussuunnitteluun. BY-vähähiilisyysluokituswebinaari 12–13.9.2022. Saatavissa: [https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/by-vahahiilisyysluokituswebinaari/by\\_vahahiilisyys-luokituksen-vaikutus-suunnitteluun\\_ramboll\\_merikukka.pdf](https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/by-vahahiilisyysluokituswebinaari/by_vahahiilisyys-luokituksen-vaikutus-suunnitteluun_ramboll_merikukka.pdf)

Miettunen, E. 2021. Vähähiilistä ja vahvaa tekoa Finnsementin uudella Kolmossementillä. Sementti. Vol 33:2. S. 24–25. ISSN 2342-2092. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti\\_2-2021\\_.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_2-2021_.pdf)

Nikkilä, S. 2022. Vihreän betonin kuivuminen. Opinnäytetyö. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Kotka. 37 s.

Ohjenoja, K. 2021. Ekologisen betonin ja betonointitekniikoiden kehittäminen arktisella alueella. Betoni. Vol 91:3. S. 90–95. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/09/BET2103\\_90-95.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/09/BET2103_90-95.pdf)

Orfanoudaki, I., Antonova, A., Piironen, J. ja Punkki, J. 2022. Kiihdyttimien vaikutus vähähiilisten betonien lujuudenkehitykseen. Betoni. Vol 92:4. S. 78–83. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/12/BET\\_2204\\_78-83.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/12/BET_2204_78-83.pdf)

Parman vähähiilinen ontelolaatta. n.d. Parma. Verkkosivu. [Viitattu 22.03.2023]. Saatavissa: <https://parma.fi/tuote/parman-vahahiilinen-ontelolaatta/>

Parman vähähiiliset seinäelementit. n.d. Parma. Verkkosivu. [Viitattu 22.03.2023]. Saatavissa: <https://parma.fi/tuote/parman-vahahiiliset-seinaelementit/>

Parmix-Silika. 2019. Finnsementti. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2019/02/Parmix-Silika.pdf>

Pasanen, P. 2021. Uudisrakennusten hiilijalanjälki ohjaa suomen päästövähennystavoitteisiin. Rakennustekniikka. Vol 77:1. S. 26–31. ISSN 2243-0369. Saatavissa: <https://view.creator.taiqa.com/ril/rakennustekniikka-1-2021?viewer=embed#/page=1>

Pitkälä, E. 2020. Betonin hiilijalanjälki kutistuu. Kemia. Vol 1. S. 6–10. Saatavissa: <https://www.kemiamedia.fi/wp-content/uploads/2020/02/1-2020-Betonin-hiilija-lanj%C3%A4lki-kutistuu.pdf>

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni. Vol 91:4. S. 74–83. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104\\_74-83.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2021/12/BET2104_74-83.pdf)

Rudus. n.d. Vihreä betoni. Verkkosivu. [Viitattu 13.02.2023]. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/vihrea-betoni>

Rudus Pro. 2021. Vihreä Betoni pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä. [Viitattu 01.03.23]. Saatavissa: [https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2021/06/29/vihrea-betoni-pienentaa-rakentamisen-hiilijalanjalkea?utm\\_source=epressi&utm\\_medium=referal&utm\\_campaign=tuote-betoni&utm\\_content=ruduspro](https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2021/06/29/vihrea-betoni-pienentaa-rakentamisen-hiilijalanjalkea?utm_source=epressi&utm_medium=referal&utm_campaign=tuote-betoni&utm_content=ruduspro)

Rytsy, R. ja Härkönen, J. 2022. Kolmossementistä saatiin hyviä kokemuksia Herttoniemen kesävaluissa. Sementti. Vol 34:2. S. 8–11. ISSN 2342-2092. Saatavissa: [https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti\\_2-2022\\_Final.pdf](https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Sementti_2-2022_Final.pdf)

Saarinen, S. 2015. Kiertotalous toimii betonirakentamisessa. Betoni. Vol 85:3. S. 42–47. ISSN 2323-1262. Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2015/10/BET1503-KOKO-LEHTI.pdf>

Salminen, E. 2021. Suomalaisen betonin hiilijalanjälki. Betoni. Vol 91:1. S. 86–91. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/03/BET2101\\_86-91.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2021/03/BET2101_86-91.pdf)

Sementti ja kasvihuonepäästöt. n.d. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. [Viitattu 02.02.2023]. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>

Sementin valmistus. n.d. Finnsementti. Verkkosivu. [Viitattu 06.02.2023]. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/valmistus/>

Seosaineet betonissa. 2022. Suomen betoniyhdistys. [Viitattu 09.02.2023]. Saatavissa: <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2022/1.-jakso/1.3.2022-seosaineet.pdf>

Seosaineet sementissä. n.d. Finnsementti. Verkkosivu. [Viitattu 06.2023]. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/seosaineet-sementissa/>

SFS-EN 197-1. 2012. Sementti. osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. 3. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 37 s.

SFS-EN 206. 2021. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. 3. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 93 s.

SFS 7022. 2019. Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. 3. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 35 s.

Solismaa, S., Torppa, A., Kuva, J., Heikkilä, P., Hyvönen, S., Juntunen, P., Benzaazoua, M. ja Kauppila, T. 2021. Substitution of Cement with Granulated Blast Furnace Slag in Cemented Paste Backfill: Evaluation of Technical and Chemical Properties. Minerals. Vol 11:10. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/min11101068>

Suomen betoniyhdistys. 2012. Betonitekniikan oppikirja 2004. 7. painos. Helsinki, Suomi: BY-koulutus Oy. 570 s. ISBN 978-952-67169-6-1

Suomen betoniyhdistys. 2017. Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2016. Helsinki, Suomi: BY-koulutus Oy. 95 s. ISBN 978-952-68619-1-3

Suomen betoniyhdistys. 2019. Betoninormit 2016. 4. painos. Helsinki, Suomi: BY-koulutus Oy. 156 s. ISBN 978-952-68068-4-6

Suomen betoniyhdistys. 2022a. BY-vähähiilisyysluokitus osa 1. 1. versio. Helsinki, Suomi: BY-koulutus. 22 s. ISBN 978-952-7314-22-7

Suomen betoniyhdistys. 2022b. BY-vähähiilisyysluokitus osa 2. 1. versio. Helsinki, Suomi: BY-koulutus. 11 s. ISBN 978-952-7314-23-4

Suomen betoniyhdistys. 2023. Betoninormit 2021. 6. painos. Helsinki, Suomi: BY-koulutus Oy.

Suwanen, S. 2022. Betonirakenteita kurittavat betoniteräskorroosio ja rapautuminen – muista kuntotutkimus ajoissa. Raksystems. [Viitattu: 08.02.2023]. Saatavissa: <https://raksystems.fi/ajankohtaista/betonirakenteita-kurittavat-betoniteraskorroosio-ja-rapautuminen-muista-kuntotutkimus-ajoissa/>

Tikkanen, J. 2021. Betonin peruskurssi. Saatavissa: [https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/peruskurssi-2021\\_jt.pdf](https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/peruskurssi-2021_jt.pdf)

Timonen-Nissi, H. 2019. Rasitusluokat, Rudus betoniakatemia. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/Download/27940/Betoniakatemia%20Rasitusluokat.pdf>

Tompuri, V. 2022. Vähähiilinen betoni on nyt laskettavissa. Betoni. Vol 92:4. S. 64–69. ISSN 2323-1262 Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/2022/12/08/vahahiilinen-betoni-on-nyt-laskettavissa/>

Valmisbetonit. n.d. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. [Viitattu: 03.02.2023]. Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/ymparistoselostet/valmisbetonit/>

Varkoi, A. 2021. Sementtiä korvaavien sideaineiden vaikutukset betonin ominaisuuksiin. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. Tampere. 28 s. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/134313/VarkoiAino.pdf?sequence=2>

Veikkola-Virtanen, J. 2019. Maailman eniten käytetty rakennusmateriaali betoni uudistuu. Rakennusmaailma. [Viitattu: 10.02.2023]. Saatavissa: <https://rakennusmaailma.fi/maailman-eniten-kaytetty-rakennusmateriaali-betoni-uudistuu/>



Virtanen, J. 2010. Betoni on hiilidioksidinielu. *Betoni*. Vol 80:4. S. 42–45. ISSN 1235-2136. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/BET1004\\_42-45.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/BET1004_42-45.pdf)

Vuori, M. ja Punkki, J. 2022. BY-Vähähiilisyysluokitus käyttöön. *Betoni*. Vol 94:1. S. 90–95. ISSN 2323-1262. Saatavissa: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/03/BET2201\\_90-95.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/03/BET2201_90-95.pdf)

Vähähiilinen betoni. n.d. Betoniteollisuus ry. Verkkosivu. [Viitattu: 02.02.2023]. Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/vahahiilinen-betoni/>

Wasim, M., Abadel, A., Abu Bakar, B. ja Alshaikh, I. 2022. Future directions for the application of zero carbon concrete in civil engineering. *Case Studies in Construction Materials*. Vol 17. ISSN: 2214-5095. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01318>

Ympäristöministeriö. n.d. Vähähiilinen rakentaminen. Verkkosivu. [Viitattu: 01.02.2023]. Saatavissa: <https://ym.fi/vahahiilinen-rakentaminen>

Ympäristöraportti 2022. Finnsementti. 34 s. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Ymparistoraportti-Finnsementti-2022-1.pdf>

# Liite 1: Taulukot vähähiilisen betonin valintaan

## GWP.85 luokan betonien saatavuus 3/2023

| Puristuslujuus | Laadun varmistusikä | Rasitusluokat                       |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     | P-luku betoni |     |     |     |     |  |
|----------------|---------------------|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|-------------------------------|-------------------------|----------|-----|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|--|
|                |                     | Ei korroosion tai rasituksen vaaraa | Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio |     |     |     | Kloridien aiheuttama korrosio | Jäädytys-sulatusrasitus |          |     |     | P0            | P30 | P50 |     |     |  |
|                |                     |                                     | X0                                      | XC1 | XC2 | XC3 |                               | XC4                     | XS ja XD | XF1 | XF2 |               |     |     | XF3 | XF4 |  |
| C20/25         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C25/30         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C30/37         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C35/45         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C40/50         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C45/55         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C50/60         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |

- Todennäköisesti yleisesti saatavilla
- Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (1)
- Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (1)
- Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (1)
- Todennäköisesti ei vielä saatavilla (1)

(1) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

## GWP.70 luokan betonien saatavuus 3/2023

(Betonin mahdollinen hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon)

| Puristuslujuus | Laadun varmistusikä | Rasitusluokat                       |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     | P-luku betoni |     |     |     |     |  |
|----------------|---------------------|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|-------------------------------|-------------------------|----------|-----|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|--|
|                |                     | Ei korroosion tai rasituksen vaaraa | Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio |     |     |     | Kloridien aiheuttama korrosio | Jäädytys-sulatusrasitus |          |     |     | P0            | P30 | P50 |     |     |  |
|                |                     |                                     | X0                                      | XC1 | XC2 | XC3 |                               | XC4                     | XS ja XD | XF1 | XF2 |               |     |     | XF3 | XF4 |  |
| C20/25         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C25/30         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C30/37         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C35/45         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C40/50         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C45/55         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
| C50/60         | 28 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |
|                | 91 d                |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |  |

- Todennäköisesti yleisesti saatavilla
- Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (1)
- Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (1)
- Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (1)
- Todennäköisesti ei vielä saatavilla (1)

(1) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

### GWP.55 luokan betonien saatavuus 3/2023

(Betonin hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon)

| Puristuslujuus | Laadunvarmistusikä | Rasitusluokat                       |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     | P-luku betoni |     |     |     |     |
|----------------|--------------------|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|-------------------------------|-------------------------|----------|-----|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|
|                |                    | Ei korroosion tai rasituksen vaaraa | Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio |     |     |     | Kloridien aiheuttama korrosio | Jäädytys-sulatusrasitus |          |     |     | P0            | P30 | P50 |     |     |
|                |                    |                                     | X0                                      | XC1 | XC2 | XC3 |                               | XC4                     | XS ja XD | XF1 | XF2 |               |     |     | XF3 | XF4 |
| C20/25         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C25/30         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C30/37         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C35/45         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C40/50         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C45/55         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C50/60         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |

|  |   |
|--|---|
|  | Todennäköisesti yleisesti saatavilla                                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (1)                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (1)                  |
|  | Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (1) |
|  | Todennäköisesti ei vielä saatavilla (1)                                 |

(1) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava

### GWP.40 luokan betonien saatavuus 3/2023

(Betonin hitaampi kovettumisnopeus tulee ottaa huomioon)

| Puristuslujuus | Laadunvarmistusikä | Rasitusluokat                       |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     | P-luku betoni |     |     |     |     |
|----------------|--------------------|-------------------------------------|---|-----|-----|-----|-------------------------------|-------------------------|----------|-----|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|
|                |                    | Ei korroosion tai rasituksen vaaraa | Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio |     |     |     | Kloridien aiheuttama korrosio | Jäädytys-sulatusrasitus |          |     |     | P0            | P30 | P50 |     |     |
|                |                    |                                     | X0                                      | XC1 | XC2 | XC3 |                               | XC4                     | XS ja XD | XF1 | XF2 |               |     |     | XF3 | XF4 |
| C20/25         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C25/30         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C30/37         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C35/45         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C40/50         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C45/55         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
| C50/60         | 28 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |
|                | 91 d               |                                     |   |     |     |     |                               |                         |          |     |     |               |     |     |     |     |

|  |   |
|--|---|
|  | Todennäköisesti yleisesti saatavilla                                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla useilta valmistajilta (1)                    |
|  | Todennäköisesti saatavilla joiltakin valmistajilta (1)                  |
|  | Todennäköisesti saatavilla vain projektikohtaisena erikoistuotteena (1) |
|  | Todennäköisesti ei vielä saatavilla (1)                                 |

(1) Vähähiilisyysluokan paikallinen saatavuus tarkistettava