

Opinnäytetyö (YAMK)

Insinööri (ylempi AMK), rakennettu ympäristö

2025

Jesse Junnila

Vähähiilisen betonin käyttäytyminen eri rakenteissa ja olosuhteissa



Opinnäytetyö (YAMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Rakennettu Ympäristö

2025 | 78 sivua

Jesse Junnila

Vähähiilisen betonin käyttäytyminen eri rakenteissa ja olosuhteissa

Tässä työssä tutkittiin vähähiilisen betonin käyttäytymistä anturassa, seinässä, laatassa ja pilarissa. Työssä tutkittiin Betometri -mallinnusohjelmalla mallintamalla vähähiilisen betonin käyttäytymistä lämpimässä, viileässä ja kylmässä olosuhteessa. Lisäksi teetettiin myös kyselytutkimus rakennusteollisuuden asiantuntijoille vähähiilisen betonin hyödyntämiseen liittyen. Työn tarkoituksena oli saada tietoa vähähiilisten betonien hyödyntämisestä eri rakenteissa ja olosuhteissa.

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta vähähiilisen betonin soveltuvan tutkittuihin rakenteisiin hyvin, jos päästövähennysluokka on valittu oikein. Vähähiilisen betonin potentiaalinen hyödyntäminen vähenee viileissä olosuhteissa, mutta betonin lujuudenkehitystä avustamalla esimerkiksi ulkopuolisella lämmityksellä, päästään parempaan lopputulokseen. Betonilaatujen suorituskyky vertailussa muotipurkulujuuden saavuttamisen nopeuteen vaikutti merkittävästi betonilaadun vähähiilisyysluokka ja kovettumisolosuhteet. Myös rakenteen dimensioilla on merkitystä vähähiilisen betonin hyödyntämisessä ja selkeästi paksuimmissa rakenteissa vähähiiliset betonilaadut toimivat paremmin.

Asiasanat:

betoni, vähähiilinen betoni, GWP, rakentaminen, sementti, päästövähennys,

Master's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Master of Engineering, Built environment

2025 | 78 pages

Jesse Junnila

The usage of low-carbon concrete in different structures and circumstances

This thesis investigated the behavior of low-carbon concrete in the foundation, wall, slab and column. The work investigated the behavior of low-carbon concrete in warm, cool and cold conditions using the Betometri modeling program. In addition, a survey was commissioned for construction industry experts regarding the utilization of low-carbon concrete. The purpose of the work was to obtain information on the utilization of low-carbon concrete in different structures and conditions.

As a result of the study, it can be stated that low-carbon concrete is well suited for the studied structures. The utilization of the potential of low-carbon concrete is reduced in cold conditions as it is, but BY assisting the development of the concrete's strength, for example with external heating, better results are achieved. In the performance comparison of concrete, the speed of achieving the formwork removal strength was significantly affected BY the low-carbon class of the concrete. The dimensions of the structure also play a role in the utilization of low-carbon concrete, and clearly in the thickest structures, low-carbon concrete performed better.

Keywords:

concrete, low-carbon concrete, GWP, construction, cement, emission reduction

Sisältö

Käytetty sanasto ja lyhenteet	8
1 Johdanto	9
1.1 Tutkimuksen tausta	9
1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset	9
1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset	11
1.4 Menetelmät ja toteutus	11
2 Vähähiilinen betonirakentaminen	13
2.1 Rakentamisen vähähiilisyys	13
2.2 Päästötavoitteet rakennusmateriaaleille	13
2.3 Betonin hiilidioksidipäästöt	15
2.4 Portlandsementin valmistus ja päästöt	16
2.5 Vähähiiliset ratkaisut betonirakentamisessa	18
2.5.1 Vähähiiliset sementit	19
2.5.2 Seosaineet betonissa	19
2.6 BY-vähähiilisyysluokitus	20
2.7 Betonin lujuudenkehitys	21
2.7.1 Betonilaadun vaikutus lujuudenkehitykseen	24
2.7.2 Sideaineen vaikutus lujuudenkehitykseen	25
2.7.3 Vaatimukset rakenteen lujuudenkehitykselle	28
2.7.4 Olosuhteiden vaikutus betonin lujuudenkehitykseen	29
2.8 Betonin jälkihoito	29
2.8.1 Varhaisjälkihoito	30
2.8.2 Varsinainen jälkihoito	31
2.8.3 Syyt betonin jälkihoidolle	31
3 Tutkimusaineisto	33
3.1 Betometri	33
3.2 BY- vähähiilisyyslaskuri	35
3.3 Tutkittavat betonilaadut	35

3.4 Kyselytutkimuksen kysymykset ja toteutus	38
4 Tulokset	40
4.1 Betonilaatujen suorituskyky eri olosuhteissa	40
4.1.1 Lämmin olosuhde	42
4.1.2 Viileä olosuhde	43
4.1.3 Kylmä olosuhde	43
4.1.4 Muut vaatimukset lujuudenkehitykselle	44
4.2 Betonilaatujen suorituskyky eri rakenteissa	46
4.2.1 Antura	47
4.2.2 Seinä	48
4.2.3 Laatta	49
4.2.4 Pilari	50
4.3 Yhteenveto mallinnuksien tuloksista	51
4.4 Kyselytutkimuksen vastaukset	53
4.5 Yhteenveto kyselytutkimuksen tuloksista	56
4.6 Tulosten yhteenveto	58
5 Lopuksi	60
Lähteet	63

Liitteet

- Liite 1. GWP.REF luokan vähähiilisyyslaskelma
- Liite 2. GWP.85 luokan vähähiilisyyslaskelma
- Liite 3. GWP.70 luokan vähähiilisyyslaskelma
- Liite 4. Mallinnetut rakenteet ja lämmityslankojen sijainti
- Liite 5. Kyselytutkimuksen kysymykset
- Liite 6. Kyselytutkimuksen tulokset
- Liite 7. Betometri -mallinnusohjelman esimerkki raportti

Kuvat

Kuva 1 Vähähiilisyysluokiteltujen valmisbetonien arvioitu saatavuus	10
Kuva 2 Rakennetun ympäristön elinkaaren hiilijalanjälki, joka sisältää käyttövaiheen energian päästöt	14
Kuva 3 Rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen kehitys perusuraskenaariossa Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 -tiekartan arvion mukaan	15
Kuva 4 Suomalaisen betonin hiilijalanjäljen muodostuminen	16
Kuva 5 Sementin valmistus	17
Kuva 6 Klinkkerimineraalien hydrataatioaste ajan funktiona	22
Kuva 7 Vesi-sementti suhteen ja lujuuden korrelaatio	23
Kuva 8 Esimerkkikuva Betometrin mallinnettavista rakenteista	33
Kuva 9 Rakenteen lujuuskäyrä Betometri -mallinnusohjelmasta	34
Kuva 10 Voimassa olevat Global Warming Potential–arvot valmistavan sementtitehtaan portille asti (A1-A3	36
Kuva 11 Betonilaatujen suorituskyky.	41
Kuva 12 Betonilaatujen suorituskyky lämpimässä.	42
Kuva 13 Betonilaatujen suorituskyky viileässä.	43
Kuva 14 Betonilaatujen suorituskyky kylmässä.	44
Kuva 15 Rakenteiden muotinpurkuajat ja keskiarvot.	46
Kuva 16 Anturan muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.	47
Kuva 17 Seinän muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.	48
Kuva 18 Laatan muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.	49
Kuva 19 Pilarin muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.	50
Kuva 20 Muotinpurkuaika rakennekohtaisesti.	51

Taulukot

Taulukko 1 SFS-EN 197-1 Mekaaniset ja fysikaaliset vaatimukset sementin ominaisarvoille	25
Taulukko 2 SFS-EN 197-1 Tavallisten sementtien perheet	27
Taulukko 3 Lujuudenkehitys eri lämpötilassa lujuusluokittain	32
Taulukko 4 Betonin suhteitukset ja GWP-laskennan lähtöarvot.	37
Taulukko 5 Jälkihoitoluokat	45
Taulukko 6 Jälkihoidon suositeltavat vähimmäisajat eri kovettumisolosuhteissa normaalistikovettuvalle betonille, jonka sideaineena on käytetty CEM II/B (S-LL) 42,5 N sementtiä	45

Käytetty sanasto ja lyhenteet

Al_2O_3	Alumiinioksidi
C_2S	Dikalsiumsilikaatti
C_3A	Trikalsiumaluminaatti
C_3S	Trikalsiumsilikaatti
CaCO_3	Kalsiumkarbonaatti
CaSO_4	Kalsiumsulfaatti
C-S-H	Kalsiumsilikaattihydraatti
Fe_2O_3	Rautaoksidi
GWP	Global Warming Potential (Suomen Betoniyhdistys ry n.d.)
Pozzolaani	Vain veden ja liukoisen kalsiumhydroksidin läsnä ollessa kovettuva aine (Betonitieto n.d.d.)
SiO_2	Pioksidi

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomen valtio on asettanut tavoitteen olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Ilmastonmuutos vaikuttaa keskeisesti poliittisiin linjauksiin sekä yritysten toimintaan nyky-yhteiskunnassa (Ilmastolaki 423/2022). Niin valtion tasolla kuin yritysmaailmassakin halutaan löytää kestäviä ratkaisuja kohti hiilineutraalia tulevaisuutta. Yksi näistä keskeisistä toimista on uusi rakentamislaki 751/2023, jossa tullaan asettamaan raja-arvot rakennusten päästövaatimuksille vuodesta 2026 alkaen.

Betoni on keskeisessä roolissa rakennetussa maailmassa, ja se onkin yksi käytetyin rakennusmateriaali maailmassa (Betoniteollisuus, n.d). Betonin osuus myös hiilidioksidipäästöjen tuottajana on merkittävä, mutta onneksi nykypäivänä on jo käytössä toimivia vaihtoehtoja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vähähiilisen betonin käyttöä erilaisissa tyypillisimmissä rakenteissa ja eriävissä olosuhteissa, jotka ovat tavallisia Suomessa.

Vähähiilisen betonin toteutustapoja on monia, mutta Suomessa yleisimmin päästövähennykset toteutetaan masuunikuonalla. Masuunikuonan lisääminen betoniin hidastaa betonin lujuudenkehitystä ja tekee siitä alttiimman lämpötilanmuutoksille, joka asettaa haasteita ympärivuotisessa rakentamisessa (Betoniteollisuus, n.d).

1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Nykypäivänä betonin valmistajilla on yleisesti hyvin tarjota vähähiilisiä betoneita käytettäväksi (kuva 1). Silti vähähiilisten betonien käyttöosuus on varsin pieni betonirakentamisessa, vain noin 4 % luokkaa epävirallisen lähteen mukaan. Tämän opinnäytetyön tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten vähähiilinen betoni sopii käytettäväksi erilaisissa yleisimmissä rakenteissa. Lisäksi on

tarkoitus tutkia, miten olosuhteet vaikuttavat vähähiilisen betonin hyödyntämiseen kyseisissä rakenteissa.

Betoni	Laadunarvosteluvuokä	GWP.REF	GWP.85	GWP.70	GWP.55	GWP.40
C20/25 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C25/30 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C30/37 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C35/45 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C40/50 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C45/55 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C50/60 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red

Kuva 1 Vähähiilisyysluokiteltujen valmisbetonien arvioitu saatavuus (Suomen Betoniyhdistys ry n.d).

GWP.REF ja GWP.85 -luokan betonia on Betoniyhdistyksen tilaston mukaan saatavilla käytännössä jokaisessa luokitellusta laadusta (kuva 1). Hyvin saatavilla oleva laatu on myös GWP.70 -luokan betonia (kuva 1). Näiden betonilaatujen suhteitus ja ominaisuudet poikkeavat toisistaan jonkin verran, minkä takia ne sopivat hyvin tutkimuksen vertailulaaduksi.

1.3 Tutkimuksen tavoite ja rajaukset

Tutkimuksen tavoitteena on saada tietoon, miten vähähiilinen betoni soveltuu käytettäväksi neljässä eri rakenteessa. Rakenteet ovat antura, pilari, seinä ja laatta. Anturaa tarkastellaan osana rakenteita, vaikka teknisesti nämä kuuluvatkin rakennuspaikkaan, eikä niille näillä näkymin ole tulossa vähähiilisyysvaatimuksia rakentamislain 751/2023 mukaan. Nämä neljä rakennetta ovat yleisiä rakenteita, joiden valmistuksella on myös vaikutusta koko rakennusprojektin aikatauluun. Rakenteet tarkastellaan kolmessa eri lämpötilassa vakioiduilla betoniresepteillä. Lämpötilana mallinuksissa toimivat: lämmin +15°C, viileä +10°C ja kylmä +5°C. Lämpötilat ovat vuorokauden keskilämpötiloja. Tutkimuksessa lasketaan vähähiilisten betonien käyttäytyminen luokissa GWP.REF, GWP.85 ja GWP.70 betonien osalta.

Tässä työssä tarkastellaan vähähiilisten betonien käyttäytymistä ja soveltuvuutta rakenteisiin valmisbetonin osalta. Vähähiilisyysluokituksen laskentaan vaikuttavat käytettävät materiaalit, sekä valmistavan valmisbetonitehtaan sijainti. Tässä työssä oletetaan betoninvalmistajaksi generinen betonitehdas, joka sijaitsee pääkaupunkiseudulla ja jolla on alalle tyypilliset kuljetusmatkat käytettäville raaka-aineille.

Työssä ei tutkita rakenteiden lujuudenkehitystä muissa kuin yllä mainituissa olosuhteissa. Betonin toimituslämpötilaksi oletetaan lämpimässä olosuhteessa +20°C ja viileässä sekä kylmässä olosuhteessa +15°C. Tarkastelun kohteena on vain työnrajauksessa ilmoitetut rakenteet. Tarkastelu suoritetaan mallintamalla rakenteet hyväksikäyttäen Finnsementti Oy:n Betometri – lämmön ja lujuudentuoton mallinnus ohjelmaa.

1.4 Menetelmät ja toteutus

Työssä tullaan tekemään kvalitatiivinen osuus suorittamalla kyselytutkimus henkilöiltä rakennusteollisuudesta, jotka ovat olleet tekemisissä vähähiilisen betonirakentamisen kanssa. Lisäksi Betometri -mallinnusohjelman

numeerisesta datasta tehdään kvantitatiivista arviota betonilaatujen soveltuvuudesta rakenteisiin.

Työssä kaikki tutkimus pohjautuu kirjallisuusselvitykseen sekä mallintamiseen tietokonesimuloimalla rakenteiden lujuuden ja lämpötilan kehitystä.

2 Vähähiilinen betonirakentaminen

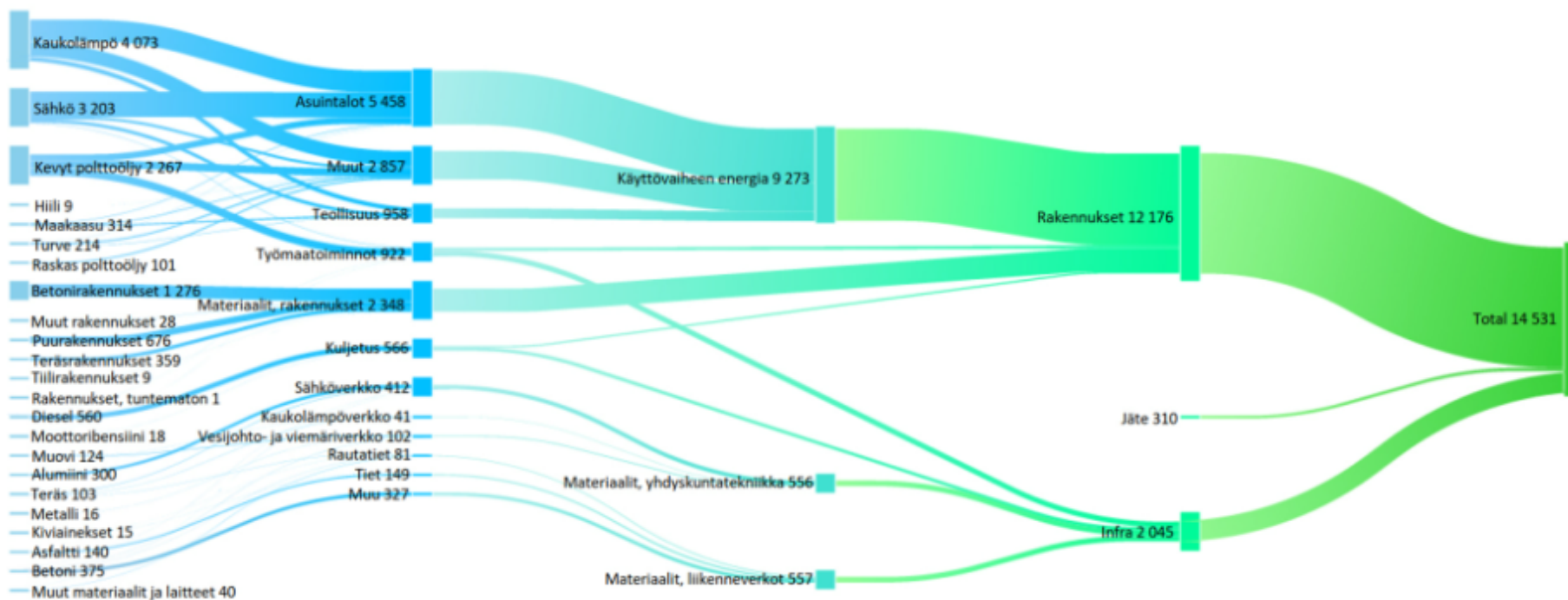
2.1 Rakentamisen vähähiilisyys

Suomessa vuoden 2025 alussa voimaan tulleen uudistuneen rakentamislain myötä säädetään, että jatkossa rakennusten hiilijalanjälki tulee raportoida rakennuksen ilmastaselvityksellä lopputarkastuksen yhteydessä.

Vähähiilisyudessa arvioidaan rakennuksen koko elinkaari, ei vain rakentamisen aiheuttamia päästöjä. Tämä tarkoittaa, että arvioinnin piirissä on rakennustuotteiden valmistuksesta lähtien kaikki aina käytönaikaisista päästöistä rakennuksen purkamiseen asti. Näiden säännösten tavoitteena on edistää kiertotalousperiaatteiden toteutumista. Lain mukaan laaditaan myös materiaaliseloste, jossa rakennushankkeeseen ryhtyvä esittää tiedot hankkeella käytettävistä materiaaleista ja niiden alkuperästä (Laine ym. 2024).

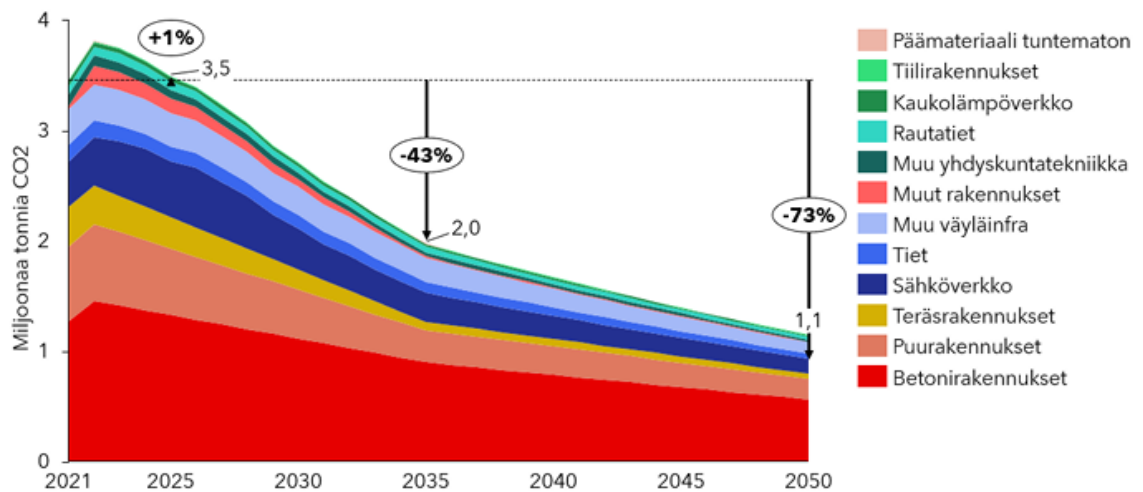
2.2 Päästötavoitteet rakennusmateriaaleille

Rakennusmateriaalit näyttelevät merkittävää roolia rakennetun ympäristön hiilijalanjäljestä päästöjen ollessa liki 25 % (kuva 2). Joka tapauksessa suurimmat päästöt aiheutuvat käyttövaiheessa, jolloin kulutetaan noin 64 % rakennetun ympäristön päästöistä. Rakennusmateriaalien osalta vähähiilisyuden pääajureina toimivat EU:n päästökauppa sekä tulevaisuuden teknologiset innovaatiot. Eritoten sementin ja teräksen valmistuksen teknologiakehityksellä tulee olemaan suuri vaikutus hiilidioksidipäästöihin tulevaisuudessa (Laine ym. 2024).



Kuva 2 Rakennetun ympäristön elinkaaren hiilijalanjälki, joka sisältää käyttövaiheen energian päästöt (Laine ym. 2024).

Perusuraskenaariossa (kuva 3) rakennustoiminnan hiilijalanjälki pienenee EU:n toimenpiteiden johdosta 49 % vuoteen 2035 ja 70 % vuoteen 2050 mennessä. Rakennusmateriaalien osalta päästöt laskevat 43 % vuoteen 2035 ja 73 % vuoteen 2050 mennessä perusuraskenaarion mukaan, kuten voidaan tulkita kuvasta 3. Tiekartan perusteella on huomattu vähähiilisen betonin hyödyntämisellä olevan merkittävä päästövähennyspotentialiaali (Cembureau 2024; Laine ym. 2024).



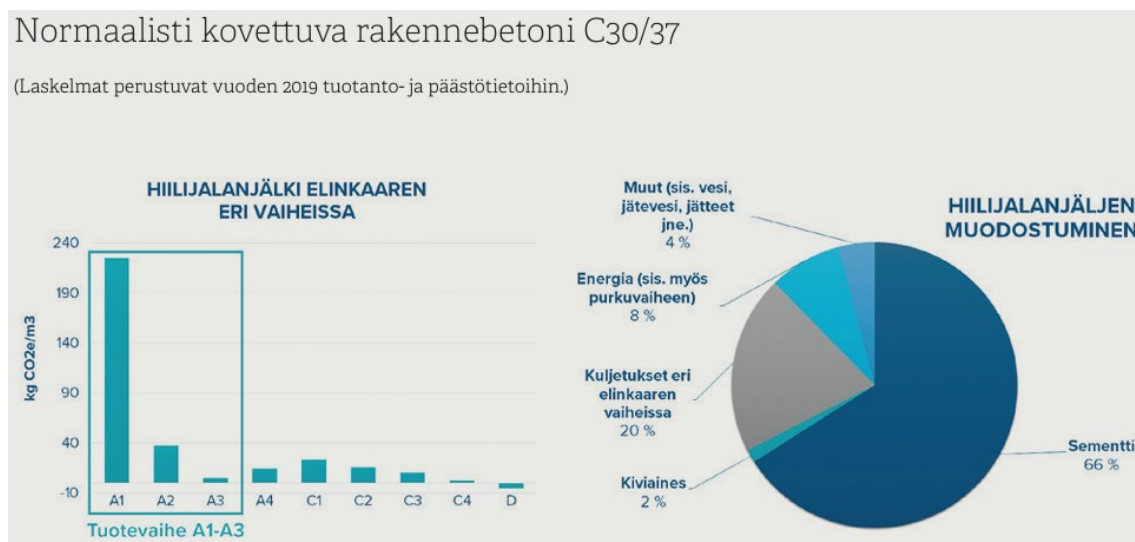
Kuva 3 Rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen kehitys perusuraskenaariossa Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 -tiekartan arvion mukaan (Laine ym. 2024).

2.3 Betonin hiilidioksidipäästöt

Betonin hiilidioksidipäästöjä vertaillessa betonin päästöt eivät materiaalina päästöt per kilo -tasolla tarkasteltuna ole kovin suuret, samaa luokkaa kuin perunalla. Betonista johtuvat korkeat päästöt maailmassa tulevat betonin korkean käyttövolyymin kautta. Betonia käytetään vuositasolla noin 13 miljardia kuutiota (Betoniteollisuus ry 2025).

Betonin päästöistä 66 % johtuu sementistä, 20 % kuljetuksista eri elinkaaren vaiheissa, 8 % energiasta, 2 % kiviaineksesta ja loput 4 % muista lähteistä, kuten vedestä ja jätteistä (Salminen 2021).

Päästöjakaumaa tarkastellessa valmisbetonin osalta tulee melko nopeasti selväksi, että suurimmat säästöt on mahdollista tehdä kokonaisuuteen sementin osalta (kuva 4). Sementtien osalta markkinoilla löytyy nykyään vähäpäästöisempiä versioita CEM I -laadun sementteihin verrattuna.



Kuva 4 Suomalaisen betonin hiilijalanjäljen muodostuminen (Salminen 2021).

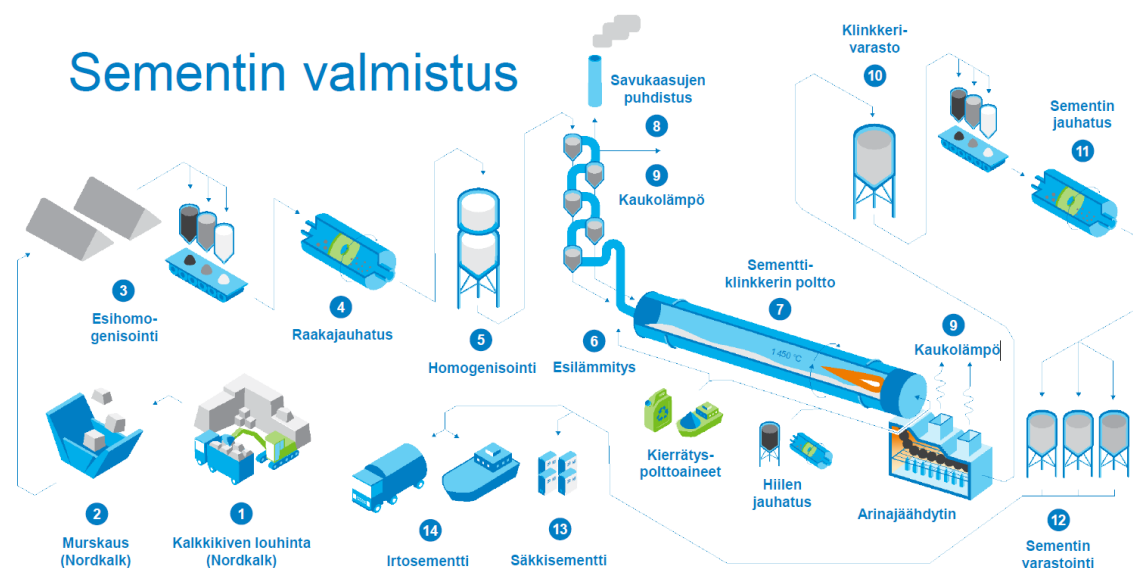
2.4 Portlandsementin valmistus ja päästöt

Sementin valmistus alkaa kalkkikivi louhokselta, jossa kalkkikivi louhitaan ja murskataan. Murskauksen jälkeen kalkkikivi esihomogenisoidaan sementtitehtaalla, jonka jälkeen se raakajauhetaan (kuva 5). Pääraaka-aineena toimivasta kalkkikivestä saadaan kalsiumkarbonaattia (CaCO_3), louhoksen sivukivestä ja teollisuuden sivuvirroista saadaan muut tarvittavat osa-aineet sementin valmistukseen (piioksidi (SiO_2), rautaoksidi (Fe_2O_3) ja alumiinioksidi (Al_2O_3)), joiden syöttösuhde määritellään kiviainesten kemialliseen koostumukseen perustuen. Valmis raakajauhe homogenisoidaan ennenkuin se syötetään prosessissa eteenpäin kohti sementtiuunia (Finnsementti Oy 2023).

Raakajauhe esilämmitetään syklonitornin avulla ennen uuniin syöttöä, jossa sementtiklinkkerin poltto tapahtuu. Jauheen lämpötilan noustessa jauhe sulaa ja noin 1450°C asteessa klinkkeri mineraalit muodostuvat. Uunin loppupäässä

muodostunut klinkkeri jäädytetään nopeasti noin 200°C asteeseen (Finnsementti Oy 2023).

Jäähtynyt sementtiklinkkeri varastoidaan ja jauhetaan sementiksi kuulamylyissä. Jauhatuksen yhteydessä sementtimylyyn syötetään seosaineita ja kipsiä, jotta saavutetaan haluttu lopputulos (kuva 5). Jokainen sementtilaatu valmistetaan omalla reseptillensä (Finnsementti Oy 2023).



Kuva 5 Sementin valmistus (Finnsementti Oy).

Sementin valmistuksessa syntyy hiilidioksidipäästöjä raaka-aineiden polttamisesta sekä kemiallisista reaktioista johtuen. Jotta kemialliset reaktiot saadaan aikaiseksi, uunissa tarvitaan 1 450°C asteen lämpötila. Tätä varten tarvitaan paljon energiaa, jota saadaan polttoaineita polttamalla, joista syntyy hiilidioksidipäästöjä. Polttoaineiden polttaminen aiheuttaa noin 30 – 40 % valmistuksesta syntyvistä päästöistä ja loput 60 – 70 % päästöistä syntyy kalkkikiven kalsinoitumisesta. Kalsinoinnissa murskattu kalkkikivi (CaCO_3) poltetaan, jolloin siitä vapautuu hiilidioksidia (CO_2) ja jäljelle jää sammuttamaton kalkkia (CaO). Tämä reaktio on välttämätön, jotta kalkkikivestä saadaan reaktiivista ja pystytään valmistamaan portlandsementtiä (Finnsementti Oy 2023).

Päästövähennyksiä tehdään prosessin eri vaiheissa. Ensimmäinen päästövähennys tehdään raakajauheessa, jossa neutraalisia kalkkikiveä korvataan vaihtoehtoisilla materiaaleilla, kuten erilaisilla teollisuuden sivuvirroilla (Finnsementti Oy 2023).

Portlandklinkkerin valmistus korkeassa lämpötilassa vaatii merkittävästi energiaa ja tuntuu päästövähennyksiä pystytäänkin tekemään uunissa käytettävien polttoaineiden osalta. Periaatteena on korvata fossiilisia polttoaineita ympäristöystävällisemmällä vaihtoehdoilla, kuten lajitellulla ja käsitellyllä pakkausjätteellä tai kumirouheella. Sementtiuuniin laitettavien polttoaineiden osalta tulee varmistua soveltuvuudesta huolella, koska sementin valmistuksesta ei synny jätettä vaan kaikki uuniin lisättävät aineet päätyvät lopputuotteeseen. Päästövähennyksiä saadaan myös tekniikan ja prosessin kehittämisestä kohti energiatehokkaampia ja nykyaikaisia laitteita ja järjestelmiä (Finnsementti Oy 2023).

Viimeinen päästövähennysvaihe tulee sementin valmistuksessa. Sementin valmistuksessa portlandklinkkeriä voidaan korvata vähempipäästöisillä seosaineilla, kuten kalkkikivellä tai masuunikuonalla. Finnsementissä on tutkittu myös tulevaisuutta ajatellen erilaisia pozzolaaneja ja kalsinoitujen savien hyödyntämistä sementin seosaineena (Ruukonen, S., haastattelu 5.5.2025).

2.5 Vähähiiliset ratkaisut betonirakentamisessa

Betonissa vähähiiliset päästöratkaisut käytännössä tulevat käyttämällä vähähiilisiä sementtilaatuja tai seostamalla betoneita sementtiä pienemmän päästöarvon omaavilla seosaineilla (Betonitieto n.d.b). Suomessa seosaineiden käyttöä betonin seassa rajoittaa kansallinen soveltamisstandardi SFS 7022:2024 betoni standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa.

Betonissa voidaan käyttää hyödyksi myös seosaineita suoraan valmisbetonitehtaalla seostamalla betonin joukkoon. Yleisimmin käytössä olevat seosaineet ovat lentotuhka, masuunikuona ja silika (SFS-EN 206-1. 2021). Yleisin käytetty seosaine päästövähennyksissä Suomessa on masuunikuona.

Masuunikuona on yleisesti käytetyin seosaine nykypäivänä, koska lentotuhkaa käytännössä ei ole enää saatavilla ja silikalla pystytään klinkkeriä korvaamaan vain pieniä määriä. Masuunikuona on myös teknistaloudellisesti järkevin vaihtoehto.

2.5.1 Vähähiiliset sementit

Vähähiilinen sementti valmistetaan korvaamalla sementin pääraaka-ainetta portlandklinkkeriä vähempipäästöisellä materiaalilla, kuten esimerkiksi masuunikuonalla. Sementissä voidaan käyttää seosaineita, kuten lentotuhkaa, masuunikuonaa, pozzolaaneja, kalkkikiveä, silikaa, poltettua liusketta ja kalsinoituja savia (SFS-EN 197. 2012).

Masuunikuonalla seostamalla sementtien hiilijalanjälkeä pystytään alentamaan merkittävästi. Esimerkiksi Finnsementin valmistama Kolmossementti on päästöiltään jopa 40 % matalampi kuin CEM I tyypin sementti. Vastaavasti taas Finnsementin Kolmosbertassa päästöt ovat noin enää kolmannes, verrattuna CEM I tyypin sementtiin. Kolmossementissä portlandklinkkeristä on korvattu noin 40 % masuunikuonalla ja Kolmosbertassa noin 70 %. Päästövähennystä pystytään tekemään myös muilla pääosa-aineilla, kuten pozzolaaneilla tai kalkkikivellä (Ruokonen, S., haastattelu 5.5.2025).

2.5.2 Seosaineet betonissa

Betonissa käytettävillä seosaineilla tarkoitetaan hienojakoisia epäorgaanisia aineita, joita käytetään betonin ominaisuuksien muokkaamiseen. Seosaineita käytetään yleensä taloudellisista syistä tai ympäristö hyödyn tavoittelemisen takia. Seosaineet luokitellaan tyypin I sekä tyypin II seosaineiksi standardin EN-206 mukaisesti. Tyypin I ja tyypin II seosaineet eroavat toisistansa reaktiivisuuden suhteen. Tyypin I seosaineet ovat käytännössä lähes reagoimattomia, kun taas tyypin II seosaineet ovat joko piilevästi hydraulisia tai pozzolaaneja. Tyypin I seosaineita on tyypillisesti erilaiset pigmentit ja

standardin SFS-EN 12620 + A1 Betonikiviainekset tai SFS-EN 13055:2016:en Lightweight aggregates -standardien mukaan luokitellut fillerit. Tyypin II seosaineita ovat esimerkiksi silika ja masuunikuona. Betonissa käytettävät seosaineet tulee aina olla CE-merkittyjä (BY65 2021, 14 – 15; BY201 2018, 56 – 58; Betonitieto, n.d.e).

2.6 BY-vähähiilisyysluokitus

BY-Vähähiilisyysluokitus® on Suomessa toimiva kansallinen vapaaehtoisuuteen perustuva menetelmä betonin CO₂-päästöjen vähentämistä varten kehitetty luokitusjärjestelmä. Luokituksen tavoitteena on luoda betonialalla tuotemerkeistä riippumaton yhtenäinen tapa erilaisten vähähiilisten betonilaatujen kuvaamista varten. Luokituksen avulla rakennushankkeeseen ryhtyvä taho voi asettaa kohde- tai rakennekohtaisesti betonille vähähiilisyysvaatimuksen rajoittamatta kilpailua (Suomen Betoniyhdistys ry n.d).

Luokitus luo tasapuolisen mahdollisuuden tilaajille asettaa rakenteille vähähiilisyys vaatimuksen rajoittamatta kilpailua. BY-vähähiilisyysluokitustaulukko on olemassa sekä valmisbetonille että betonielementeillekin. Vähähiilisyysluokituksen käyttämien on vapaaehtoista.

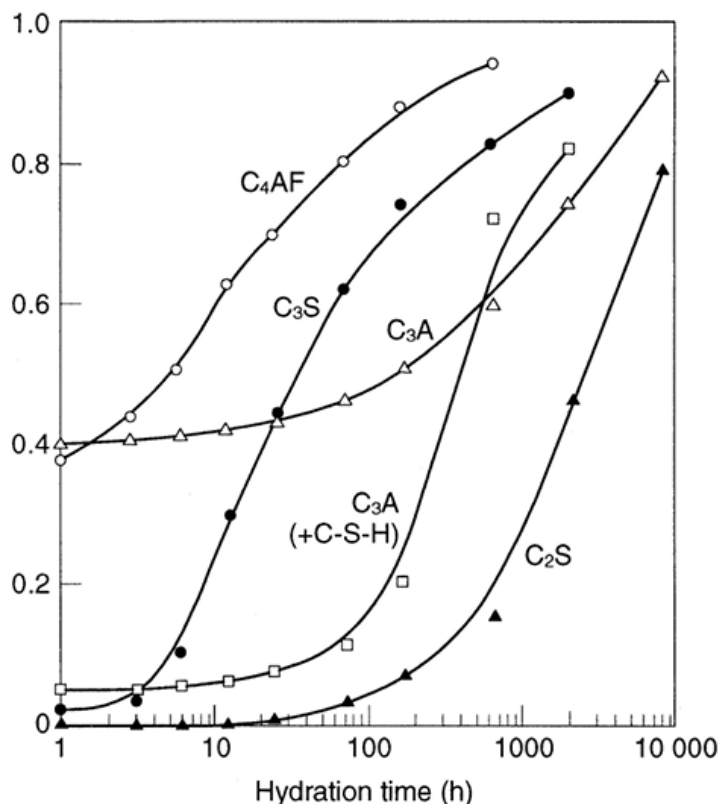
BY-Vähähiilisyysluokituksessa betonilaadut jaetaan viiteen eri vähähiilisyysluokkaan betonilaadun hiilidioksidipäästöjen mukaisesti. Vähähiilisyysluokat lähtevät GWP.REF-luokasta, joka vastaa Suomessa toimivien valmisbetonivalmistajien vuoden 2021 valmistuksen keskimääräistä hiilidioksidipäästö tasoa. Lähtötasosta on tehty matemaattiset vähennykset 15 % välein. Esimerkiksi GWP.70 -luokka tarkoittaa, että päästöt ovat enimmillään 70 % GWP.REF tasoon nähden. Betonielementtien osalta järjestelmä ja luokitus toimii vastaavalla tavalla kuin valmisbetonin osalta, mutta data valmistajilta on kerätty vuonna 2023.

Luokituksessa käsitellyt päästöarvot ovat vain itsessään betonia koskevia päästöarvoja. Luokitus ei huomioi esimerkiksi raudoitusta, kuljetusta eikä työmaatoimintoja (Suomen Betoniyhdistys ry n.d).

2.7 Betonin lujuudenkehitys

Betonin lujuudenkehitys perustuu veden ja sementin reaktioon, tätä reaktiota kutsutaan sementin hydrataatioksi. Sementin hydratoitumisella tarkoitetaan sementissä olevien komponenttien ja veden reaktioita, jotka aiheuttavat fysikaalisia ja kemiallisia muutoksia, varsinkin sitoutumista ja kovettumista. Sitoutuminen tapahtuu muutaman tunnin sisään sementin ja veden kohtaamisesta. Sitoutumisen jälkeen seuraa kovettumisen jakso, kovettumisen aikana betoni saavuttaa sille tunnusomaisen korkean puristuslujuuden kestävyuden. Käytännössä hydrataatioreaktio jatkuu niin kauan, kuin reaktiota varten on vapaata vettä käytössä, joskus jopa vuosia. Kovettuneen betonin lujuus määräytyy sementtipastan lujuudesta ja betonissa olevan runkoaineen välisestä tartunnasta (Virola & Raivio 2000, 10 – 15).

Hydrataatioreaktio veden ja sementin välillä tarjoavat kemiallisen mekanismin betonin kovettumiselle. Hydrataatioaste määrittää betonin lujuudenkehityksen ja säilyvyyden lähtökohdat. Jos betonissa oleva vesi pääsee haihtumaan ennen aikaisesti, hydrataatio päättyy (Newman & Choo 2003, 3/12; Hewlett 2003, 263 – 270). Taatakseen hydrataatio reaktion jatkuvuuden, betonia tulee jälkihoitaa standardin SFS-EN 13670: Betonirakenteiden toteuttaminen, ohjeistuksen mukaisesti.

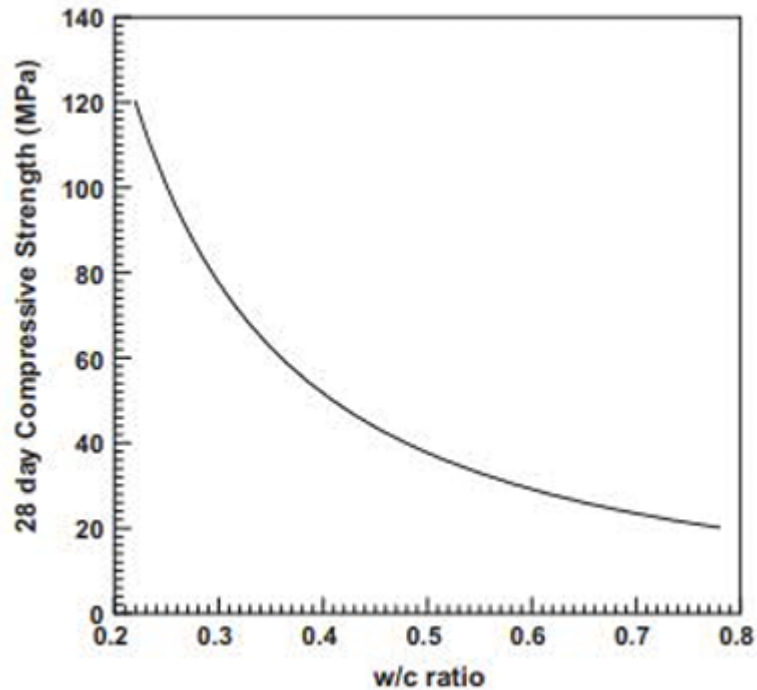


Kuva 6 Klinkkerimineraalien hydrataatioaste ajan funktiona (Hewlett 2003, 258).

Hydrataatioreaktiossa sementtipartikkelien pinnassa käynnistyy kemiallinen reaktio, jolloin muodostuu sementtigeeliä (C-S-H geeli). Sementtigeeli sitoo hydratoituvat sementtahiukkaset ja betonin runkoaineksen yhtenäiseksi sementtipastaksi (Hewlett 2003, 255 – 259).

Sementin hydrataatioreaktiossa klinkkerimineraalit, kuten aliitti eli trikalsiumsilikaatti (C₃S), beliitti eli dikalsiumsilikaatti (C₂S) ja aluminaatti eli trikalsiumaluminaatti (C₃A) näyttelevät reaktiossa ja reaktion vaiheissa eri rooleja (kuva 6). Yleisesti voidaan todeta aliitin vastaavan sementin sitoutumisesta ja kovettumisesta, varsinkin lujuudenkehityksen alkuvaiheessa. Beliitin reaktiot veden kanssa ovat hitaampia, ja sillä onkin suurempi merkitys lujuudenkehityksessä myöhäisemmässä vaiheessa. Aluminaatti vaikuttaa sementin lämmöntuottoon ja reaktioherkkyyteen. Aluminaatilla on myös merkittävä rooli sementin varhaisten reaktioiden kannalta. Sementtiin lisätään aina myös kipsiä (CaSO₄) eli kalsiumsulfaattia hidastamaan aluminaatin

reaktioita. (Taylor 1997, 113 – 156; Virola & Raivio 2000.14 – 23; Neville 2011, 13 – 19).



Kuva 7 Vesi-sementti suhteen ja lujuuden korrelaatio (Dinakar & Manu 2014, 664).

Kun käytetään samaa sideainekombinaatiota, betonin lujuus määräytyy pääasiassa kahdesta tekijästä, vesi-sideainesuhteesta ja tiivistysasteesta. Kun betoni on täydellisesti tiivistetty, sen lujuuden katsotaan olevan kääntäen verrannollinen vesi-sideainesuhteeseen (Kuva 7). Suurin vaikutus kuitenkin täydellisesti tiivistetyn betonin lujuuteen on yksinomaan vesi-sideainesuhteella (Neville 2011, 271 – 275).

Pienemmällä vesi-sideainesuhteella saavutetaan korkeampi puristuslujuus (Kuva 7). Vesi-sideainesuhde määrittää betonin huokoisuutta kaikissa hydrataatioasteissa. Tämän takia sekä vesi-sideainesuhde että tiivistysaste molemmat vaikuttavat huokosten määrään betonissa (Neville 2011, 271 – 272).

2.7.1 Betonilaadun vaikutus lujuudenkehitykseen

Betonilaatu tai betonityyppi termillä tarkoitetaan betonille suunnittelussa määritettyjä vähimmäisvaatimuksia. Rakennesuunnittelija määrittää betonille lujuus- ja rakenneluokan, rasitusluokat, betonipeite paksuuden, toleranssit ja tarvittaessa vaatimuksen pintaluokalle (BY201 2018, 210 – 213).

Betonin puristuslujuusluokat luokitellaan eurokoodin mukaan kirjaimella (C) joka tulee englannin kielen sanasta (cylinder) ja numeroyhdistelmällä fck/fck,cube (lieriölujuus/kuutiolujuus) (BY201 2018, 85). Yleisesti valmisbetonissa talonrakentamisessa käytössä olevat lujuusluokat vaihtelevat C25/30 – C50/60 välillä. Korkeimmillaan eurokoodin mukaisesti betonille voidaan luokitella C100/115 lujuus. Lujuuden yksikkönä toimii MN/m² tai muunnettuna megapascaliksi (MPa) (BY201 2018, 85).

Betonin nimellislujuusluokka ei suoraan kuvaa betonirakenteen lujuutta. Rakenteen lujuus on riippuvainen kuormitusalueen muodosta ja mittasuhteista, kun taas betonin nimellislujuus testataan standardoiduilla koekappaleilla (BY201 2018, 160 – 162).

Kokonaislujuudenkehitykseen vaikuttaa kaikki betonilaadulle asetetut vaatimukset. Betonin lujuus on useamman osatekijän summa, joka koostuu sideaineen laadusta, vesi-sideainesuhteesta, betonin runkoaineesta ja rakenteen muodosta. Betonin lujuudenkehityksen nopeuteen vaikuttavat käytettävä sideainelaatu ja sideaineen lujuudenkehityksen ominaisuudet sekä kovettumislämpötila (Neville 2011, 271 – 313).

Rakenteen lujuuteen vaikuttaa myös työsuorituksen laatu ja eritoten betonin oikeaoppinen tiivistäminen ja saavutettu tiivistysaste. Aalto-yliopiston tutkimuksessa: ”Betonin koostumuksen vaikutus sen tiivistettävyyteen” todetaan betonin tiivistämisen olevan erittäin keskeisessä roolissa betonirakenteiden valmistamisessa. Heikolla tiivistämisellä voidaan aiheuttaa merkittävää heikentymistä rakenteen lujuuteen (Ojala ym. 2019, 63 – 64).

2.7.2 Sideaineen vaikutus lujuudenkehitykseen

Sideaineen vaikutus lujuudenkehityksessä on lujuudenkehitysnopeuden kannalta merkittävä. Sideaineen tarkoitus on reagoida seoksessa ja liittää runkoaines yhtenäiseksi kovaksi rakenteeksi (Betonitieto n.d.f).

Tärkeimpänä mekaanisena vaatimuksena sementille annetaan standardilujuusluokka, jolloin sementin täytyy täyttää SFS-EN 197-1 mukaiset vaatimukset 28 vuorokauden laadunarvosteluiässä (taulukko 1). Sementille annetaan myös lujuudenkehitys ominaisuuksien mukaisesti jokin kolmesta varhaislujuuden tunnuksesta. Varhaislujuutta arvioidessa sementin tulee täyttää SFS-EN 197-1 mukaiset vaatimukset joko 2 tai 7 vuorokauden iässä (taulukko 2). Varhaislujuuden tunnukset ovat L = alhainen varhaislujuus, N = normaali varhaislujuus ja R = nopea varhaislujuus (SFS EN 197-1, 2012.)

Taulukko 1 SFS-EN 197-1 Mekaaniset ja fysikaaliset vaatimukset sementin ominaisarvoille (SFS EN 197-1, 2012, taulukko 3).

Taulukko 3 Mekaaniset ja fysikaaliset vaatimukset ominaisarvoille

Lujuusluokka	Puristuslujuus MPa			Sitoutumisajan alku	Tilavuuden- pysyvyys (paisuma)
	Varhaislujuus		Standardilujuus		
	2 vrk	7 vrk	28 vrk:n	min	mm
32,5 L ^a	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 N	–	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	–			
42,5 L ^a	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 N	≥ 10,0	–			
42,5 R	≥ 20,0	–			
52,5 L ^a	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	≥ 45
52,5 N	≥ 20,0	–			
52,5 R	≥ 30,0	–			

^a Lujuusluokka on määritelty vain CEM III -sementeille.

Nopean varhaislujuudenkehityksen sementtejä käytetään yleisesti nopean varhaislujuudenkehityksen vaativien betonien valmistamiseen. Usein nopean varhaislujuudenkehityksen sementit ovat puhtaita portlandsementtejä ja ovat hienompia kuin seostetut sementit. Nopean varhaislujuudenkehityksen

sementtejä usein käytetään betonilaaduissa, jotka vaativat esimerkiksi nopean muotinpurkulujuuden saavuttamista (Neville 2011, 69 – 72). Koska nopean varhaislujuudenkehityksen sementit ovat portlandsementtejä, niillä on korkeampi päästöarvo, kuin seostetuilla portlandseossementeillä tai masuunikuonasementeillä. Vastaavasti vähähiilisissä betonilaaduissa hyödynnetään vähäpäästöisiä seostettuja sementtilaatuja, kuten portlandseossementtiä tai masuunikuonasementtiä. Usein seossementeillä alkulujuudenkehityksen tunnus on N, jolloin tiedetään sementin kehittävän lujuutta normaalisti sitoutumisen alkuvaiheessa (SFS-EN 197-1, 2012; Punkki, J, 2021)

Sementit jaetaan eurooppalaisen sementtistandardin SFS-EN 197-1 mukaisesti seuraaviin sementtilajeihin

- CEM I Portlandsementti
- CEM II Portlandseossementti
- CEM III Masuunikuonasementti
- CEM IV Pozzolaanisementti
- CEM V Seossementti.

Jokaisen tavallisten sementtien perheeseen kuuluvan sementin on koostumukseltaan täytettävä SFS-EN 197-1 sementti. Osa 1: tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus taulukon 1 mukaiset vaatimukset.

Taulukko 2 SFS-EN 197-1 Tavallisten sementtien perheet (SFS EN 197-1, 2012, taulukko 1).

Taulukko 1 Tavallisten sementtien perheen 27 tuotetta

Pääajit	27 tuotteen merkinnät (tavallisten sementtien lajit)		Koostumus (painoprosenteina ^a)										Sivuosa-aineet	
			Pääosa-aineet											
			Klinkkeri	Masuuni-kuona	Silika	Pozzolaani		Lentotuhka		Poltettu liuske	Kalkkikivi			
						luonnon	luonnon kalsinoitu	silikaatti-pitoinen	kalkki-pitoinen		L	LL		
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portland-sementti	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-masuuni-kuona-sementti	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silika-sementti	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-pozzolaani-sementti	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-lentotuhka-sementti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-poltettu-liuske-sementti	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland-kalkkikivi-sementti	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Portland-seos-sementti ^c	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->										0-5
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->										0-5	
CEM III	Masuuni-kuona-sementti	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pozzolaani-sementti ^c	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5	
CEM V	Seos-sementti ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5	

^a Taulukon arvoilla viitataan pää- ja sivuosa-aineiden summaan.

^b Silikan määrä on rajoitettu 10 %:iin.

^c Portlandseossementeissä CEM II/A-M ja CEM II/B-M, pozzolaanisementeissä CEM IV/A ja CEM IV/B sekä seossementeissä CEM V/A ja CEM V/B muut pääkomponentit kuin klinkkeri on ilmoitettava sementin merkinnässä (ks. esimerkki luvusta 8).

Sementin päälaajit on jaettu käytettävien seosaineiden ja seosaineiden annostelumäärien mukaisesti SFS-EN 197-1 taulukon 1 mukaan (taulukko 2). Lisäksi sementeille annetaan mekaanisia, fysikaalisia, kemiallisia ja säilyvyysvaatimuksia (SFS EN 197-1, 2012).

2.7.3 Vaatimukset rakenteen lujuudenkehitykselle

Betonirakenteen lujuudenkehitykselle asettaa vaatimukset työmaan rakentamisen aikataulu sekä rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Yleisesti ottaen kantavien rakenteiden muottien ja muottia tukevien tukirakenteiden purun edellytyksenä on riittävä lujuus betonissa, jotta rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset vaurioitta. Riittävää lujuutta muottien purkamista varten nimitetään muotinpurkulujuudeksi. Muotinpurkulujuus on riippuvainen betonin nimellislujuudesta, rakenteen toimintatavasta, muottien tuenta tavasta, rakennetta muottien purku hetkellä ja purun jälkeisestä kuormituksesta suhteutettuna ominaiskuormaan. Myös työsuorituksen eteneminen saattaa asettaa vaatimuksia muotinpurkulujuuden suhteen (Betonitieto n.d.a).

Yleisesti muotinpurkulujuutena pidetään 60 % betonin nimellislujuudesta, ellei toisin ole määritetty. Jälkijännitettävissä rakenteissa muottia ei tule purkaa ennen onnistunutta jännitystyötä. Jännitystyötä tehdessä betonin lujuuden tulisi täyttää 80 % nimellislujuudesta. Ei-kantavien pystyrakenteiden muotit voidaan purkaa, kun betoni on saavuttanut 5 megapascalin lujuuden. Yleisesti on huolehdittava, että rakenne kestää siihen kohdistuvat rasitukset vaurioitumatta muotin purun yhteydessä (BY47 2019, 105; Betonitieto n.d.a).

Muotinpurkutyö suoritetaan työmaalla purkusuunnitelman mukaisesti, josta on käytävä ilmi muottien purkujärjestys ja mahdollinen lisätuenta tarvittaessa. Lisätuennalla ehkäistään haitallisia muodonmuutoksia rakenteissa (Betonitieto n.d.a).

Muotinpurkulujuuteen tarvittava lujuus voidaan osoittaa laskelmin, olettaen että rakenne toimii purkuvaiheessa vastaavalla tavalla kuin valmiina. Rakenteesta

lasketaan kuinka suuri suunnittelukuorman osuus vaikuttaa rakenteeseen muotipurku hetkellä (Betonitieto n.d.a).

2.7.4 Olosuhteiden vaikutus betonin lujuudenkehitykseen

Betonin lujuudenkehitystä arvostellaan eurokoodin mukaisesti joko lieriö- tai kuutiokokeena, joka testataan standardin mukaisesti 28 vuorokauden ikäisenä. Betonin standardiolosuhteeksi on määritetty +20 °C asteen lämpötila ja lähtökohtaisesti kaikki betonilaadut säilytetään ja koestetaan standardiolosuhteissa (SFS-EN 12390-2 2019, 7; BY201 2018, 85).

Betonin lujuudenkehityksen nopeuteen vaikuttaa olennaisesti betonin lujuudenkehityksen aikaiset olosuhteet. Lämpimässä olosuhteessa betonin lujuudenkehityksenreaktio nopeutuu ja kylmässä olosuhteessa betonin lujuudenkehitysreaktio hidastuu. (BY201 2018, 496 – 497)

Betonimassan lämpötila vaikuttaa merkittävästi betonin lujuudenkehityksen nopeuteen, lujuudenkehitys hidastuu merkittävästi lämpötilan laskiessa. Betonin lämpötilan on pysyttävä nollan yläpuolella, jotta lujuudenkehitys ei pysähdy. Tavanomaisesti betonimassalle tavoitellaan noin +20 °C asteen lämpötilaa. Jotta betonin lujuudenkehitys ei hidastuisi merkittävästi, tulisi lämpötilan olla vähintään 15 °C astetta. Lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle, lujuudenkehitys pysähtyy. Betonia ei myöskään saa päästää jäätymään, ennen kuin jäätymislujuus eli 5 MPa, on saavutettu. Usein riittävän nopean lujuudenkehityksen saavuttaminen edellyttää betonilta rakenteessa +20 °C asteen tai suurempaa lämpötilaa. Yli 60 °C asteen lämpötiloja tulee kuitenkin välttää, jotta lujuuskatoa ei pääse syntymään rakenteeseen (BY201 2018, 73, 493 – 497; Betonitieto n.d.g).

2.8 Betonin jälkihoito

Betonin jälkihoidon tärkein tavoite on mahdollistaa betonille olosuhteet, joissa betoni saavuttaa sille asetetut vaatimukset ja ominaisuudet. Käytännössä tällä

tarkoitetaan betonille riittävien olosuhteiden luomista, joissa sitoutuminen ja kovettuminen on mahdollista. Tärkeintä on taata, että betonin hydrataatioreaktio sementin ja veden välillä pystyy jatkumaan keskeytyksettömänä, kunnes on saavutettu jälkihoitoluokan mukainen lujuus. Jälkihoidolla myös halutaan suojata rakennetta mekaaniselta vaurioitumiselta ja likaantumiselta (BY68 2024, 56; Betonitieto n.d.c).

Jälkihoidon tarve määräytyy olosuhteiden, kuten tuulen, vedon, auringonpaisteen, matalan ilmankosteuden ja lämpötilan mukaan. Jokainen olosuhde vaikuttaa jälkihoidon tarpeeseen eri tavalla ja jälkihoito on aina suunniteltava tapauskohtaisesti (BY201 2018, 341 – 344).

Jälkihoitotapoina usein käytetään sumutettavaa jälkihoitoainetta. Muita tapoja toteuttaa jälkihoito on myös vedellä sumuttamalla, muovikalvolla, kostealla kankaalla tai lämpöeristeellä, kuten routamatolla peittely. Usein myös muottia hyödynnetään jälkihoidossa ja tämä estääkin mainiosti veden haihtumista rakenteesta. Pääsääntöisesti jälkihoito jaetaan kahteen eri kategoriaan suorituskohdan mukaisesti, varhaisvaiheen jälkihoitoon ja varsinaiseen jälkihoitoon (BY201 2018, 341 – 344; Betonitieto n.d.c).

2.8.1 Varhaisjälkihoito

Varhaisjälkihoidolla tarkoitetaan betonimassan levityksen ja tiivistämisen jälkeen välittömästi toteutettavaa jälkihoitoa. Varhaisjälkihoito usein toteutetaan sumutettavalla varhaisjälkihoitoaineella, voidaan toteuttaa myös vesi sumutuksella tai levittämällä väliaikainen peittely valetulle pinnalle. Varhaisjälkihoidon tavoitteena on rajoittaa liiallista kosteuden haihtumista betonin pinnasta ja tällä tavoin hillitä plastista kutistumaa. Varhaisjälkihoidon merkitys korostuu varsinkin olosuhteissa, joissa kosteudenhaihtuminen betonin pinnasta on suurta tai jälkihoidettava alue on pinta-alaltaan suuri (BY45 2023, 95 – 99).

2.8.2 Varsinainen jälkihoito

Varsinainen jälkihoito aloitetaan, kun betoni on saatettu lopulliseen tilaan valukohteessa. Varsinaisen jälkihoidon tarkoituksena on taata keskeytyksetön hydrataatioreaktion jatkuminen ja mahdollistaa betonille mahdollisimman hyvät olosuhteet lujuudenkehitystä varten. Jälkihoidolla voidaan myös rajoittaa betoniin syntyviä lämpötilaeroja (BY201 2018, 341 – 344). Betonin jälkihoitamista tulee jatkaa, kunnes on saavutettu suunnitelmien mukainen betonin jälkihoitoluokka. Jos muottikalusto puretaan ennen kuin jälkihoitoluokan mukainen riittävä lujuustaso on saavutettu, tulee huolehtia rakenteen riittävästä jälkihoidosta muotin purun jälkeen (BY47 2019, 104 – 105; Betonitieto n.d.c).

2.8.3 Syyt betonin jälkihoidolle

Valun aikaisella jälkihoidolla voidaan vähentää liiallista veden haihtumaa ja täten estää halkeilua ja kutistumaa betonirakenteessa. Jälkihoito usein myös tarjoaa lisää aikaa työsuoritteille, jolloin on mahdollista saavuttaa parempi lopputulos betonoinnille. Massiivivaluissa liian suuret lämpötilaerot ytimen ja pinnan välillä voivat myös aiheuttaa vetojännitystä, jonka takia syntyy rakenteessa halkeilua. Tätä ilmiötä on myös mahdollista torjua oikein suunnitellulla ja toteutetulla jälkihoidolla (BY201 2018, 341 – 344).

Taulukko 3 Lujuudenkehitys eri lämpötilassa lujuusluokittain (BY201 2018, taulukko 8.7.1)

Taulukko 8.7.1. Jälkihoidon suositeltavat vähimmäisajat eri kovettumisolosuhteissa normaalisti kovettuvalle betonille, jonka sideaineena on käytetty CEM II/B (S-LL) 42,5 sementtiä.

Betonin lämpötila [°C]	Aika [d], jolloin saavutetaan 50 % nimellislujudesta			Aika [d], jolloin saavutetaan 70 % nimellislujudesta			Aika [d], jolloin saavutetaan 80 % nimellislujudesta		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
10	9	7	6	17	15	13	24	22	20
20	4,5	3,5	3	8,5	7,5	6,5	12	11	10
30	3	2,5	2	5	4,5	4	7,5	7	6
40	2	1,5	1	3,5	3	2,5	5	4,5	4

Jälkihoidon osatarkoituksena on myös optimoida betonirakenteen lujuudenkehitystä (taulukko 3). Jälkihoidolla pyritään pitämään riittävästi lämpöä betonirakenteessa, jotta lujuudenkehitys on mahdollista. Betonirakenteiden ei saa antaa jäätyä, ennen kuin betoni on saavuttanut 5 MPa lujuuden. Jälkihoidon onnistumisella on suuri merkitys myös koko betonirakenteen käyttöiän kannalta (BY201 2018, 341 – 344; Betonitieto n.d.c).

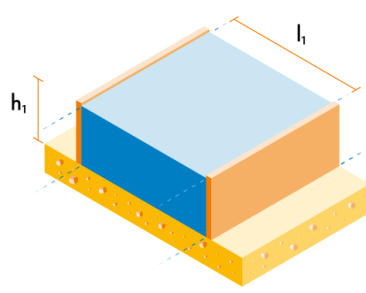
3 Tutkimusaineisto

3.1 Betometri

Betometri on betonin lujuuden, lämpötilan ja kypsyyksiän laskentaa varten Finnsementin kehittämä ohjelma. Betometri toimii Comsol Multiphysics-ympäristössä. Betometrin laskenta perustuu laajoihin kenttäkokeisiin, jossa betonin lujuudenkehitystä on mitattu rakenteesta ja koekappaleista mittaamalla. Betometrin laskennan taustalla pyörii valtava määrä dataa, joka on sekoitus kenttäkokeiden mittausdataa ja Nurse-Saul-kaavaan sovellettua kypsyyksikä laskentaa. Laskentamallissa on myös mukana sideaineiden lämmöntuottokyky, joka on sideaine kohtaisesti mitattu isotermisellä kalorimetrillä.

Betometri-laskentaohjelmassa mallinnuksia rakenteen ominaisuuksista voidaan tehdä ennakkolaskelmalla, jota varten tehdään olettamuksia laskettavan rakenteen kovettumisolosuhteista ja käytettävästä suhteituksesta (kuva 8). Toinen vaihtoehto on tehdä laskelmia jälkikäteen mitatun lämpötiladatan perusteella.

Lähtötiedot | Antura
Betometri

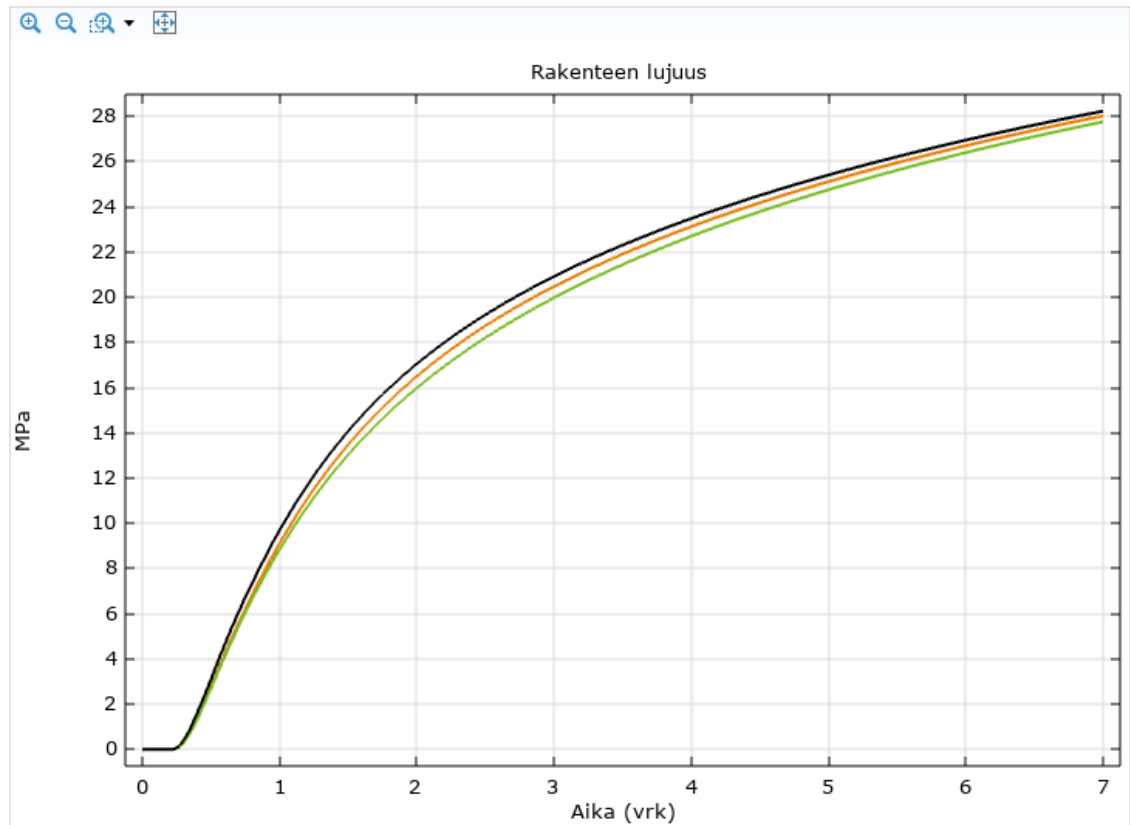
<p>Rakenteen mitat</p> <p>h_1 <input type="text" value="0"/> mm</p> <p>l_1 <input type="text" value="0"/> mm</p> <hr/> <p>Ympäristö</p> <p>Tuulen nopeus <input type="text" value="0"/> m/s</p> <p>Ajasta riippuva <input type="checkbox"/></p> <p>Lämpötila <input type="text" value="0"/> °C</p> <hr/> <p>Muotti</p> <p>Muotin purkuajankohta <input type="text" value="7"/> vrk</p> <hr/> <p>Suojaus</p> <p><input checked="" type="radio"/> Vain rakenteen päällä <input type="radio"/> Rakenteen kaikilla sivuilla</p> <p>Routamatto <input type="checkbox"/> Paksuus <input type="text" value="0"/> mm <input type="text" value="0.5"/> · <input type="text" value="7"/> vrk</p> <p>Suojamuovi <input type="checkbox"/> Paksuus <input type="text" value="0"/> mm <input type="text" value="0.5"/> · <input type="text" value="7"/> vrk</p>	<p>Pohja</p> <p>Pohja <input type="text" value="Sepeli"/></p> <p>Pohjan lämpötila <input type="text" value="0"/> °C</p> <hr/> <p>Resepti</p> <p>Sementti <input type="text" value="0"/> kg/m³</p> <p>Sementti <input type="text" value="0"/> kg/m³</p> <p>Masuunikuonajauhe K3400 <input type="text" value="0"/> kg/m³</p> <p>Silikkajauhe <input type="text" value="0"/> kg/m³</p> <p>Tehollinen vesimäärä <input type="text" value="0"/> l/m³</p> <p>Ilmamäärä <input type="text" value="0"/> %</p> <p>Betonin alkulämpötila <input type="text" value="0"/> °C</p> <p>Osavarmuuskerroin <input type="text" value="1"/></p> <p>Vesisideainesuhde <input type="text" value="0.0"/></p> <p>Mallinna nousunopeus <input type="checkbox"/></p> <p>Valun nousunopeus <input type="text" value="500"/> mm/h</p> <hr/> <p>Laskenta</p> <p>Aika <input type="text" value="7"/> vrk</p>	
--	---	---

Laske

[Tulokset >](#)

Kuva 8 Esimerkkikuva Betometrin mallinnettavista rakenteista (Finnsementti Oy).

Mallinnuksen alussa rakenteelle annetaan rakenteen dimensiot (kuva 8) ja käytettävän betonilaadun suhteitus. Tämän jälkeen rakenteelle määritetään muottimateriaali ja mahdolliset suojaustoimenpiteet. Lopuksi ohjelmaan syötetään kovettumisolosuhteet (tuuli ja lämpötila). Lähtötietojen perusteella ohjelma laskee betonin kypsyysikä, rakenteen lujuuden (kuva 9) ja syntyvän betonin lämmöntuoton rakenteessa.



Kuva 9 Rakenteen lujuuskäyrä Betometri -mallinnusohjelmasta (Finnsementti Oy).

Betometrin laskentamalli tuottaa dataa rakenteesta, josta voidaan tarkastella esimerkiksi lujuuden- tai lämmönkehitystä rakenteessa (kuva 9). Betometrin datasta voidaan arvioida betonin muotinpurkulujuutta, jäätymslujuutta ja rakenteen teoreettista maksimilämpötilaa. Datasta voidaan arvioida esimerkiksi muotinpurkulujuutta numeerisessa muodossa tai ohjelman piirtämistä kuvaajista. Kokonainen Betometri -laskentaohjelman raportti on nähtävillä liitteessä 7.

3.2 BY- vähähiilisyyslaskuri

BY- vähähiilisyyslaskuri on Suomen Betoniyhdistyksen ylläpitämä selaimessa toimiva verifioitu laskentatyökalu valmisbetonin ja betonielementtien hiilijalanjäljen laskemista varten. BY- vähähiilisyyslaskuri huomioi laskennassa A1 – A3 moduulien päästöt SFS-EN 15804 + A2:2019: Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt -standardin mukaisesti. Moduulin A1 päästöt sisältävät raaka-aineiden hankinnan ja käsittelyn, moduuli A2 pitää sisällään raaka-aineiden kuljetuksen valmistukseen ja moduuli A3 sisältää betonin valmistuksen. Laskuriin annetaan tiedot betonireseptin tiedot raaka-aineista, raaka-aineiden kuljetuksesta ja valmistuksessa käytetystä energiasta, jonka pohjalta laskuri laskee betoni reseptille GWPtotal -päästöarvon. Päästöarvo ilmoitetaan yksikössä kg CO_{2e}/m³ ja kg CO_{2e} /kg. GWPtotal -päästöarvo kertoo, kuinka monta kiloa hiilidioksidia (CO₂) on syntynyt, kun kuutio betonia on valmistettu. Päästöarvossa ei ole huomioitu moduulia A4, eli betonin kuljetusta työmaalle (Suomen Betoniyhdistys ry n.d).

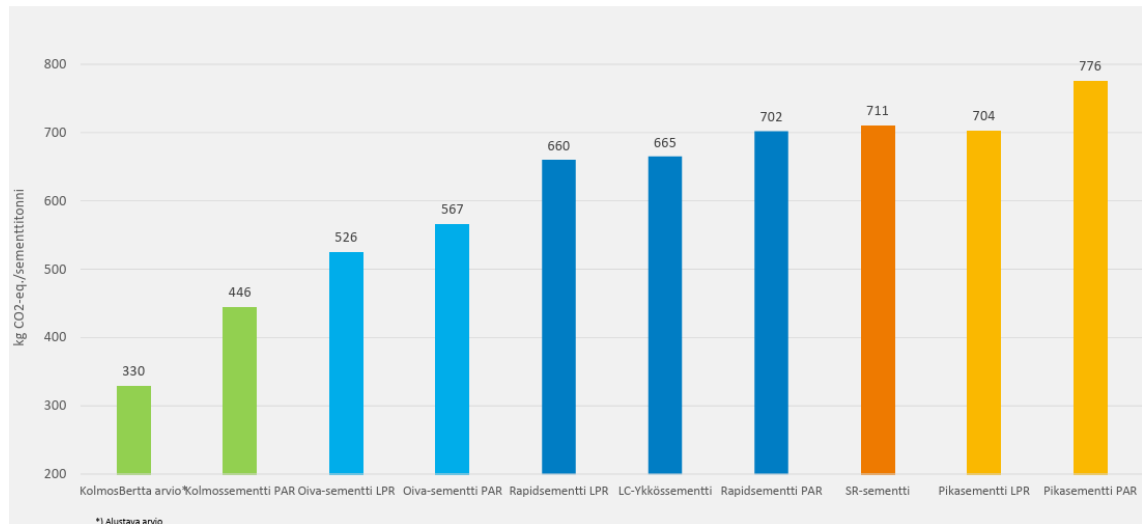
3.3 Tutkittavat betonilaadut

Tutkimuksessa käytetyt betonilaadut haluttiin kategorisoida vähähiilisyysluokkiin GWP.REF, GWP.85 ja GWP.70. Tutkimuksessa tutkitaan Suomessa yleisimpiä valmisbetonista valmistettavia rakenteita, minkä takia betonilaaduksi valittiin myös Suomessa yleinen betonilaatu ja lujuusluokka. Betonina käytettiin normaalia rakennebetonia lujuusluokassa C30/37 vesi-sideainesuhteella 0,60. Suhteituksen ideana oli vakioda sideainemäärä ja vesi-sideainesuhde, jotta tulokset olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia (taulukko 4). Materiaaleille ja valmistukselle asetettiin keskimääräiset kuljetusmatkat ja päästöt, jotka ovat esitetty tarkemmin taulukossa 4.

Sideaineena käytettiin Finnsementin Rapid-, Oiva-, ja Kolmossementtiä Paraisten tehtaalta (kuva 10). Näillä sementeillä sekä niiden kombinaatiolla saavutettiin halutut päästöarvot ja vaaditut vähähiilisyysluokat betonilaadulle.

Lisäksi betonilaatujen suhteituksella tavoiteltiin tavanomaista 28 vuorokauden lujuudenkehitystä ja normaaleja ominaisuuksia rakennebetonille. Betonilaatujen vähähiilisyyslaskelmat löytyvät liitteistä 1 – 3.

Sementin CO₂ [kg CO₂-eq./sementtitonni]



Kuva 10 Voimassa olevat Global Warming Potential–arvot valmistavan sementtitehtaan portille asti (A1-A3) (Finnsementti Oy).

Rapid-, Oiva- ja Kolmossementit eroavat toisistaan lujuusluokan, alkulujuudentunnuksen, lujuudenkehityksen ominaisuuksien ja päästöarvojen osalta (kuva 10). Rapidsementin GWP-arvo on 702 kg CO₂-eq./sementtitonni (Finnsementti Oy 2024.c), Oivasementin 567 kg CO₂-eq./sementtitonni (Finnsementti Oy 2024.b) ja Kolmossementin 446 kg CO₂-eq./sementtitonni (Finnsementti Oy 2024.a). Oivasementin päästöt ovat Rapidsementtiin verrattuna noin 20 % matalimmat. Kolmossementin päästöt ovat Rapidsementtiin verrattuna jopa 36 % ja Oivasementtiin verrattuna 21 % matalimmat (kuva 10).

Edellä mainitut sideainelaadut soveltuvat eritasoon luokiteltujen vähähiilisten betonien valmistamiseen hyvin, johtuen sementtien eri ominaisuuksista. Rapidsementti sisältää käytetyistä sideaineista eniten portlandklinkkeriä, minkä takia sillä on korkein päästöarvo ja nopein lujuudenkehitys. Oivasementtiä on seostettu yhteensä noin 24 %, josta noin 8 % on kalkkikiveä ja noin 16 % masuunikuonaa. Seostuksen ansiosta Oivasementin päästöjä on saatu

laskettua Rapidsementtiin verrattuna, minkä johdosta se soveltuu hyvin käytettäväksi GWP.85 -luokan vähähiilisiin betoneihin. Tässä tutkimuksessa käytetyistä sideaineista Kolmossementti on eniten seostettu sideainelaatu 40 % masuunikuona pitoisuudellansa. Korkea masuunikuonapitoisuus mahdollistaa Kolmossementille matalan GWP-arvon, sekä loistavat pitkän aikavälin lujuudenkehitys ominaisuudet. Kolmossementin matalan GWP-arvon takia, sillä on mahdollista valmistaa hyvin alemman päästöluokan GWP.70 betonilaatuja.

Taulukko 4 Betonin suhteitukset ja GWP-laskennan lähtöarvot.

Betonilaatu	GWP.REF	GWP.85	GWP.70
Lujuusluokka	C30/37	C30/37	C30/37
Rasitusluokka	XC3 XC4	XC3 XC4	XC3 XC4
Sementti			
sementtilaatu	Rapid 50 % & Oiva 50 %	Oiva	Kolmossementti
Sementtimäärä kg	300	300	300
kuljetusmatka km	170	170	170
kuljetustapa (oletus)	rekka, sideaine	rekka, sideaine	rekka, sideaine
Kiviainekset			
Luonnon soran ja soramurske määrä kg/m³	1330	1330	1330
kuljetustapa (oletus)	rekka, kiviaines	rekka, kiviaines	rekka, kiviaines
kuljetusmatka km	50	50	50
Kalliosta murskattu, määrä kg/m³	550	550	550

kuljetustapa (oletus)	rekka, kiviaines	rekka, kiviaines	rekka, kiviaines
kuljetusmatka km	50	50	50
Notkistinmäärä kg/m³	1,5	1,5	1,5
kuljetusmatka km	50	50	50
kuljetustapa (oletus)	jakeluauto, esim. lisäaine	jakeluauto, esim. lisäaine	jakeluauto, esim. lisäaine
Kokonais vesimäärä kg/m³	180	180	180
Ilmamäärä %	2	2	2
Sähköenergia			
keskimääräinen kWh/m ³	7	7	7
Lämpöenergia			
keskimääräinen kWh/m ³	11	11	11
energian muoto	Polttoöljy	Polttoöljy	Polttoöljy
kuljetustapa	Rekka	Rekka	Rekka
kuljetusmatka km	50	50	50
GWP -luokka	GWP.REF	GWP.85	GWP.70
kg CO _{2e} /m ³	233	212	175
kg CO _{2e} /kg	0,099	0,09	0,074
Raja-arvo	< 255	< 215	< 180

3.4 Kyselytutkimuksen kysymykset ja toteutus

Kyselytutkimuksessa esitettiin 15 kysymystä rakennusalan ammattilaisille liittyen vähähiiliseen betoniin ja sen hyödyntämiseen. Kyselytutkimus kohdistettiin RT Rakennusteollisuuden ”Vähähiilisen betonin työmaakäyttö” –

työryhmän jäsenille. Kyselytutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko vähähiilisen betonin hyödyntämiselle tällä hetkellä muita kuin teknisiä rajoitteita, miten vähähiilisen betonin käyttöä voidaan edistää, sekä mitä rajoituksia vähähiilisen betonin käytölle asiantuntijoiden mukaan on.

Kysymysten teema pyöri hyvin pitkälle vähähiilisen betonin käytön ja hyödyntämisen ympärillä. Lisäksi kysyttiin muun muassa, onko vähähiilisestä betonista riittävästi tietoa saatavilla ja missä rakenteissa vastaajat itse suosittelisivat vähähiilistä betonia hyödynnettävän. Kyselytutkimuksen kysymykset on tarkemmin avattu liitteessä 5. Asteikkona käytettiin numeerista asteikkoa 1 – 10. Kysymyskohtainen asettelu ja asteikko numeroiden vastaavuudelle löytyy liitteestä 5.

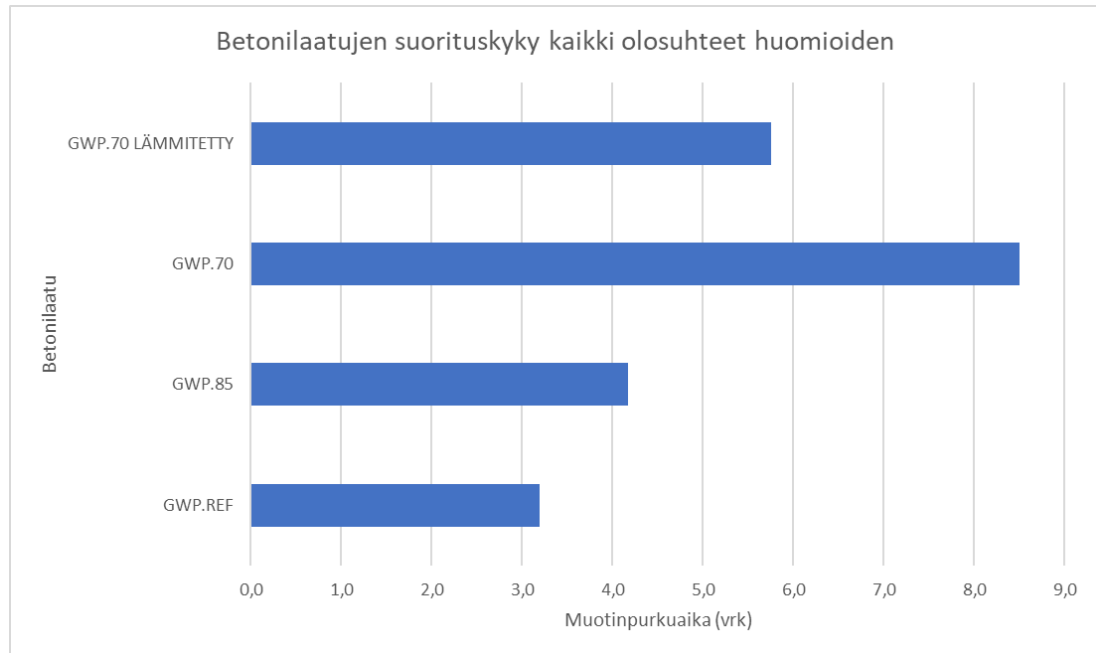
4 Tulokset

Rakenteita ja betonilaatujen lujuudenkehitystä ja Betometrin tuloksia vertaillaessa on hyvä tietää, että Betometrissä tarkasteltavat lujuudet ovat rakenteen lujuuksia, jotka on ilmoitettu kuutio lujuuksina, ei betonin standardilujuuksia. Rakenteen lujuudessa on huomioitu olosuhteiden vaikutus sekä rakenteen lujuus on arvioitu standardissa SFS-EN 13791:2019:en Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components mukaan esitetyin keinoin. Tämä tarkoittaa siis sitä, että lujuustuloksissa on huomioitu työmaalla käytettävän rakenteen lujuuden määrittämisessä standardin antamaa kerrointa 0,85 ($f_{ck,spec} - M.$)

Objektiivisesti, jos haluttaisiin mallintaa vain betonin standardilujuutta ja jättää standardien ja eurokoodin mukaiset kertoimet pois yhtälöistä, tulisi jokaista lujuustulosta korottaa 15 prosentilla. Näin ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan ole tehty, vaan tarkastelu on suoritettu muokkaamattomasta datasta, jollaisena mallinnusohjelma sen antaa.

4.1 Betonilaatujen suorituskyky eri olosuhteissa

Kun lasketaan keskiarvollinen lujuudenkehitys kaikista mallinnetuista betonilaaduista, kaikissa mallinnetuissa olosuhteissa, voidaan tutkimusmateriaalin pohjalta todeta GWP.REF luokan betonien saavuttavan muotinpurkulujuuden kaikkein nopeimmin (kuva 11).



Kuva 11 Betonilaatujen suorituskyky.

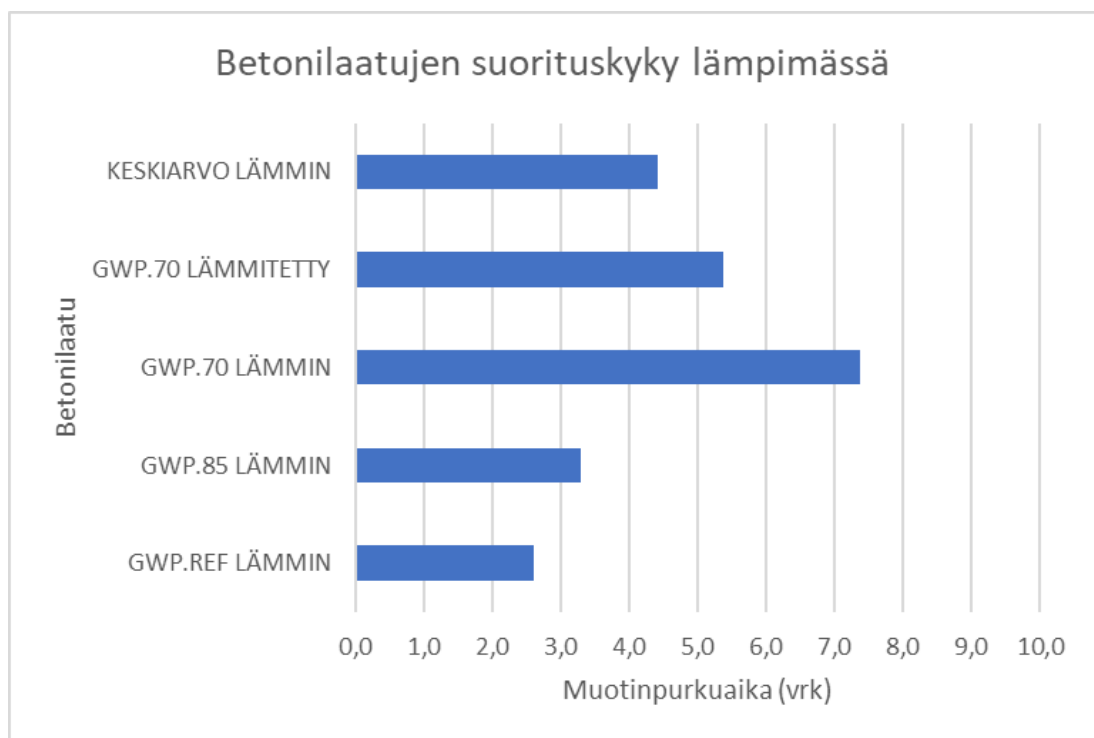
Keskiarvolta GWP.REF luokitellut betonit saavuttivat muotinpurkulujuuden noin 3,2 vuorokauden kuluessa. GWP.85 luokan betoneilla muotinpurkulujuuden saavuttamiseen meni noin 4,2 vuorokautta ja GWP.70 luokan betoneilla noin 8,5 vuorokautta. Kuvasta 9 voidaan päätellä, kun GWP.70 betonilaatua tehostetaan nostamalla betonilaadun lähtölämpötilaa ja lisäämällä rakenteeseen lämmityslangat saadaan keskiarvolliseksi tulokseksi 5,8 vuorokautta. Lisätoimenpiteillä GWP.70 laadun suorituskykyä saadaan siis parannettua jopa 48 %. Tällöin tarkasteltuna GWP.70 laadun suorituskyky jää enää vain 28 % GWP.85 luokasta ja 56 % GWP.REF luokasta.

Rakenteen kovettumisolosuhteilla on tutkimuksen perusteella merkittävä vaikutus muotinpurkulujuuden saavuttamisen osalta. Kaikki tutkitut betonilaadut lämpimissä olosuhteissa saavuttivat muotinpurkulujuuden keskiarvolta 4,4 vuorokauden ikäisenä. Viileässä olosuhteessa kaikilla tutkituilla betonilaaduilla muotinpurkulujuus saavutettiin 5,2 vuorokauden ikäisenä eli jääden 16 % lämpimien olosuhteiden betonien suorituskyvylle. Kylmässä olosuhteessa kaikki tutkitut betonilaadut saavuttivat muotinpurkulujuuden keskiarvolta 6,2 vuorokauden kuluessa jääden 29 % lämpimien olosuhteiden betonilaatujen

suorituskyvyille. Kun verrataan kylmän olosuhteen betonilaatujen suorituskykyä viileän olosuhteen betonilaatujen suorituskykyyn jää kylmän olosuhteen laatujen suorituskyky 15 % verrattuna viileän olosuhteen betonilaatuihin.

4.1.1 Lämmin olosuhde

Lämpimässä olosuhteessa nopeimmin suoritti GWP.REF laatu, joka saavutti keskiarvallisesti muotinpurkulujuuden 2,6 vuorokauden kuluessa (kuva 12). GWP.85 laatu saavutti muotinpurkulujuuden 3,3 vuorokauden kuluessa jääden GWP.REF laadun suorituskyvystä 21 %. GWP.70 saavutti muotinpurkulujuuden keskiarvallisesti lämpimässä olosuhteissa 7,4 vuorokaudessa, eli 65 % hitaammin kuin GWP.REF laatu.

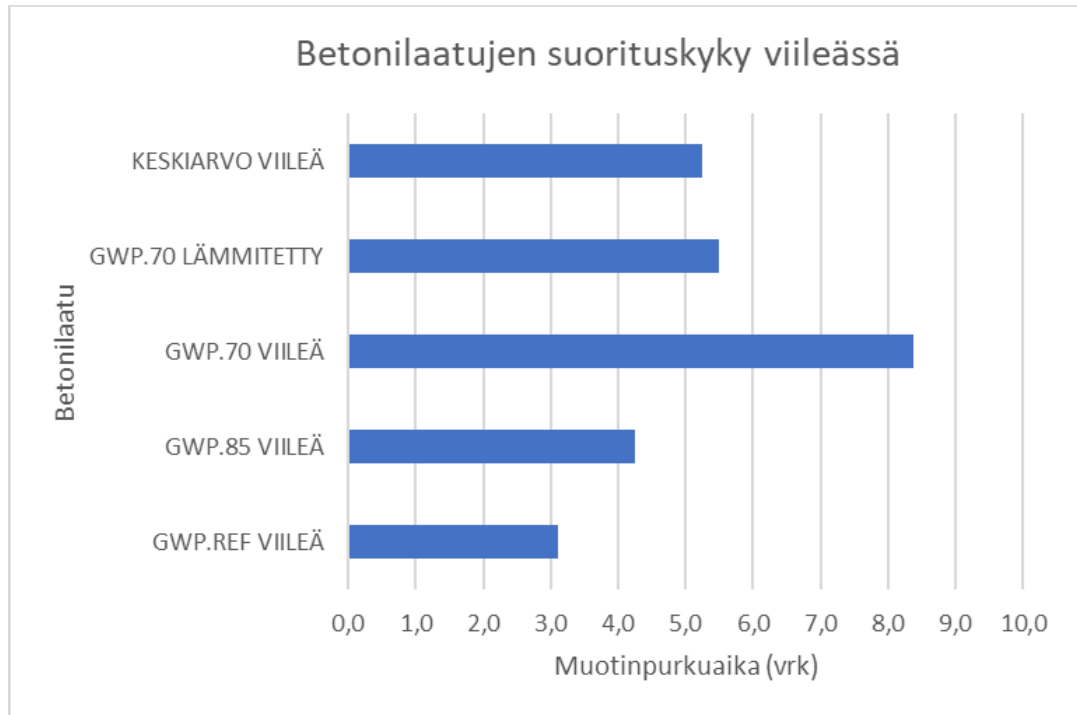


Kuva 12 Betonilaatujen suorituskyky lämpimässä.

GWP.70 laadun lämmitetty versio saavutti muotinpurkulujuuden keskiarvolta 5,4 vuorokauden ikäisenä lämpimissä olosuhteissa jääden GWP.REF laadun suorituskyvystä 52 %.

4.1.2 Viileä olosuhde

Myös viileässä olosuhteessa GWP.REF laatu saavutti keskiarvallisesti muotinpurkulujuuden nopeimmin kaikissa mallinnetuissa rakenteissa (kuva 13).



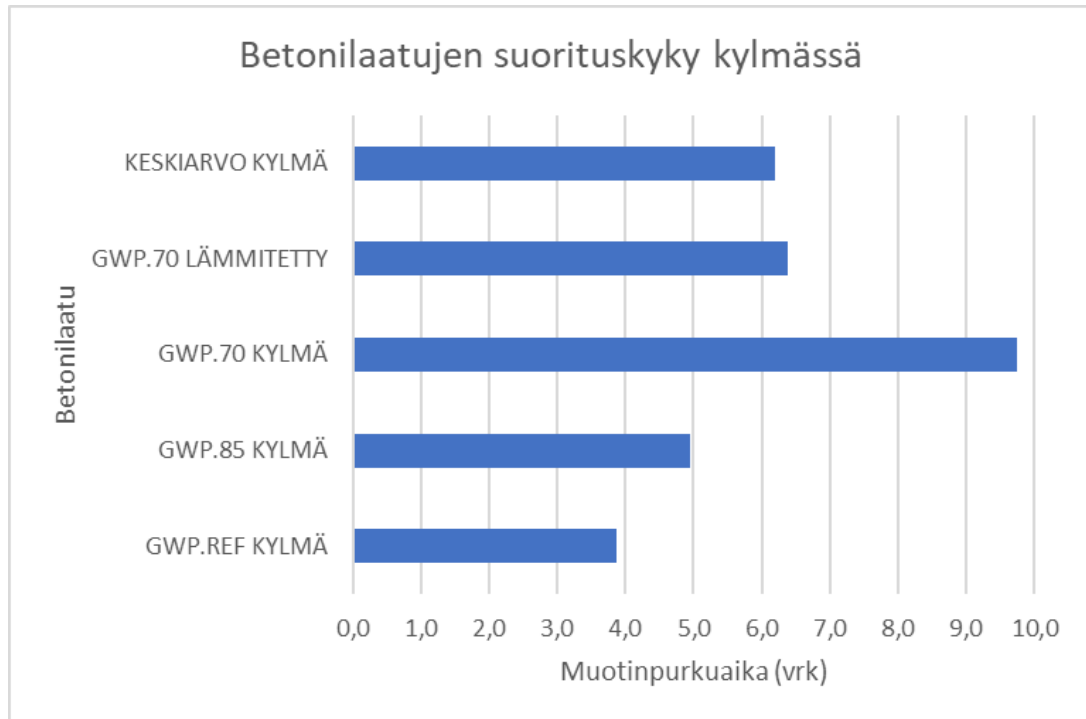
Kuva 13 Betonilaatujen suorituskyky viileässä.

Keskiarvolta viileässä olosuhteessa GWP.REF betoni saavutti muotinpurkulujuuden 3,1 vuorokauden ikäisenä. GWP.85 laatu suoriutui 27 % hitaammin saavuttaen muotinpurkulujuuden 4,3 vuorokauden ikäisenä. GWP.70 betonilaatu saavutti muotinpurkulujuuden 8,4 vuorokauden ikäisenä eli jäi suorituskyvyssä GWP.REF laatuun verrattuna 63 %. Lämmitetty GWP.70 betoni saavutti muotinpurkulujuuden viileässä keskiarvallisesti 5,5 vuorokauden ikäisenä eli jäi suorituskyvyssä 44 % GWP.REF laadulle (kuva 13).

4.1.3 Kylmä olosuhde

Kylmässä olosuhteessa paras suorituskyky oli GWP.REF laadulla, joka saavutti keskiarvallisesti muotinpurkulujuuden 3,9 vuorokauden kuluessa (kuva 14).

GWP.85 laatu saavutti muotinpurkulujuuden 5,0 vuorokauden kuluessa jääden GWP.REF laadun suorituskyvystä 22 %. GWP.70 laadun lujuudenkehityksessä kesti keskiarvillisesti lämpimässä olosuhteissa 9,8 vuorokautta eli 60 % hitaammin kuin GWP.REF laatu.



Kuva 14 Betonilaatujen suorituskyky kylmässä.

GWP.70 laadun lämmitetty versio saavutti muotinpurkulujuuden keskiarvillisesti 6,4 vuorokauden ikäisenä kylmissä olosuhteissa jääden GWP.REF laadun suorituskykyyn verrattuna 39 %.

4.1.4 Muut vaatimukset lujuudenkehitykselle

Muotinpurkulujuus ei ole ainoa betonirakenteen ominaisuus, joka tulee ottaa huomioon, kun mietitään betonilaatujen hyödyntämistä rakenteessa. Myös betonin jälkihoidolla on suuri merkitys onnistuneen betonirakenteen kannalta. Taulukossa 5 on avattu standardin SFS-EN 13670 Betonirakenteiden toteuttaminen mukaiset jälkihoitoluokat. Tässä tutkimuksessa tutkitut betonit olivat rasitusluokiltaan XC3 ja XC4 luokiteltuja betoneita, jolloin niihin

sovelletaan jälkihoitoluokkaa 4 eli 70 % lujuusvaatimusta nimellislujuudesta laskettuna (SFS 5975:2019, 15).

Taulukko 5 Jälkihoitoluokat (SFS-EN 13670, taulukko 4).

	Jälkihoitoluokka 1	Jälkihoitoluokka 2	Jälkihoitoluokka 3	Jälkihoitoluokka 4
Aika (tuntia)	12 ^a	Ei käytetä	Ei käytetä	Ei käytetä
Kovettumisaste prosentteina määritellystä 28 vrk:n ominaispuristuslujuudesta	Ei käytetä	35 %	50 %	70 %

^a Edellyttäen, että sitoutuminen kestää korkeintaan 5 tuntia ja betonin pintalämpötila on vähintään 5 °C.

Taulukossa 6 on esitetty jälkihoidon suositeltuja vähimmäisaikoja eri kovettumisolosuhteissa. Taulukosta 5 voidaan päätellä, että tässä opinnäytetyössä tutkittujen betonien osalta viileässä ja kylmässä olosuhteessa betonin jälkihoitoaika on 15 vuorokautta ja standardiolosuhteessakin 7,5 vuorokautta.

Taulukko 6 Jälkihoidon suositeltavat vähimmäisajat eri kovettumisolosuhteissa normaalistikovettuvalle betonille, jonka sideaineena on käytetty CEM II/B (S-LL) 42,5 N sementtiä (BY65, taulukko 3.15)

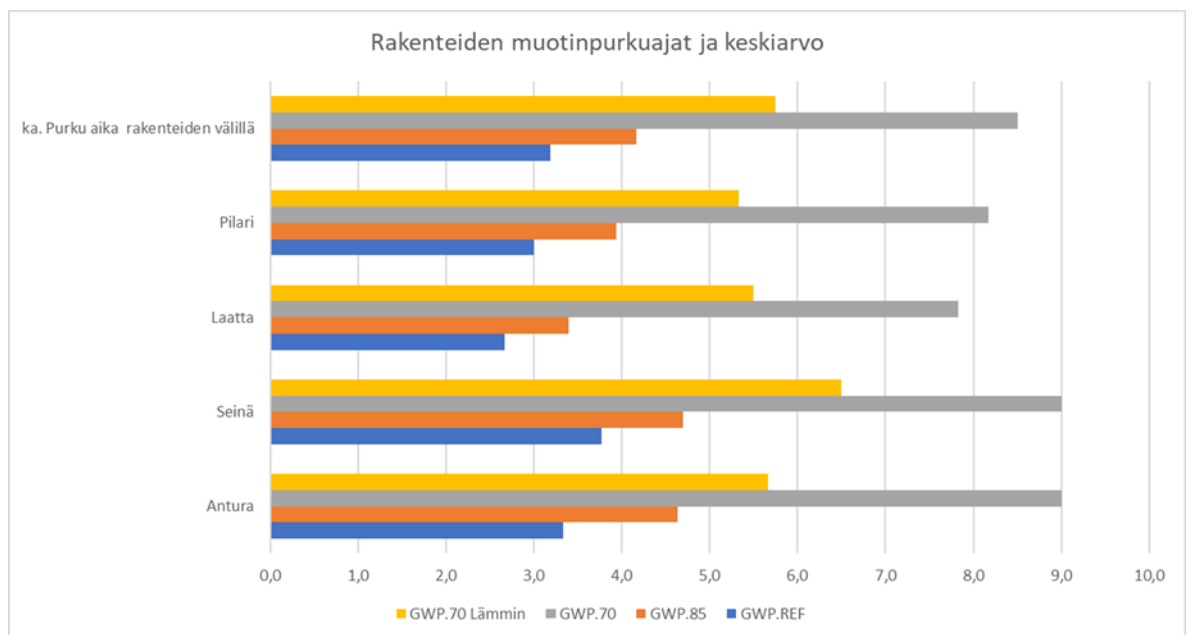
Betonin lämpötila [°C]	Aika [d], jolloin saavutetaan 50 % nimellislujuudesta			Aika [d], jolloin saavutetaan 70 % nimellislujuudesta			Aika [d], jolloin saavutetaan 80 % nimellislujuudesta		
	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45	C25/30	C30/37	C35/45
10	9	7	6	17	15	13	24	22	20
20	4,5	3,5	3	8,5	7,5	6,5	12	11	10
30	3	2,5	2	5	4,5	4	7,5	7	6
40	2	1,5	1	3,5	3	2,5	5	4,5	4

Kun verrataan suositeltuja jälkihoitoaikoja (taulukko 6) tässä tutkimuksessa tutkittuihin rakenteisiin ja käytettyihin betonilaatuihin, pystytään datasta päättämään, että vähähiilisen betonin osalta muotinpurkulujuus saavutetaan

kaikilla laaduilla, ennen kuin suositeltu jälkihoidon vähimmäisaika täyttyy, lukuun ottamatta lämmittämätöntä GWP.70 laatua.

4.2 Betonilaatujen suorituskyky eri rakenteissa

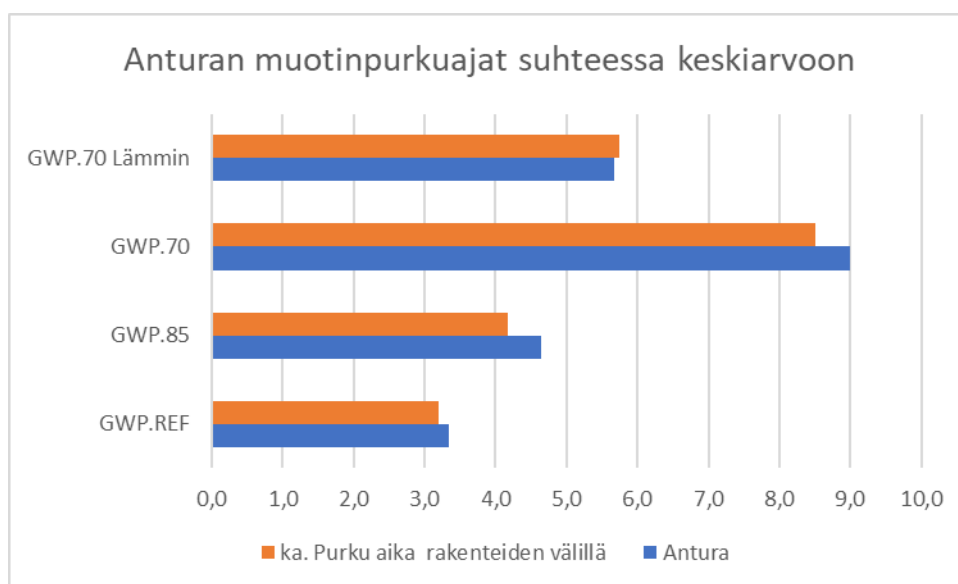
Kun tarkastellaan mallinnuksien pohjalta kaikkia rakenteita, kaikilla mallinnetuilla betonilaadulla, voidaan todeta lujuudenkehityksen olleen nopeinta laatasta (kuva 15). Laatan lujuudenkehitys oli keskiarvoon verrattuna 14 % nopeampi. Toiseksi paras suorituskyky oli pilarissa, jossa muotinpurkulujuus saavutettiin 6 % nopeammin keskiarvoon verrattuna. Anturan muotinpurkulujuuden saavuttaminen oli 6 % hitaampaa, kuin muilla rakenteilla keskimääräisesti. Seinän muotinpurkulujuuden saavuttaminen oli selkeästi hitainta, sen hävitessä keskiarvolle 11 % (kuva 15)



Kuva 15 Rakenteiden muotinpurkuajat ja keskiarvot.

4.2.1 Antura

Anturaa tarkastellessa on datasta pääteltävissä, että mallinnetuissa olosuhteissa muotinpurkulujuuden saavuttaminen rakenteessa on hyvin lähellä keskiarvoa. Jääden kuitenkin keskiarvosta 6 % (kuva 15).



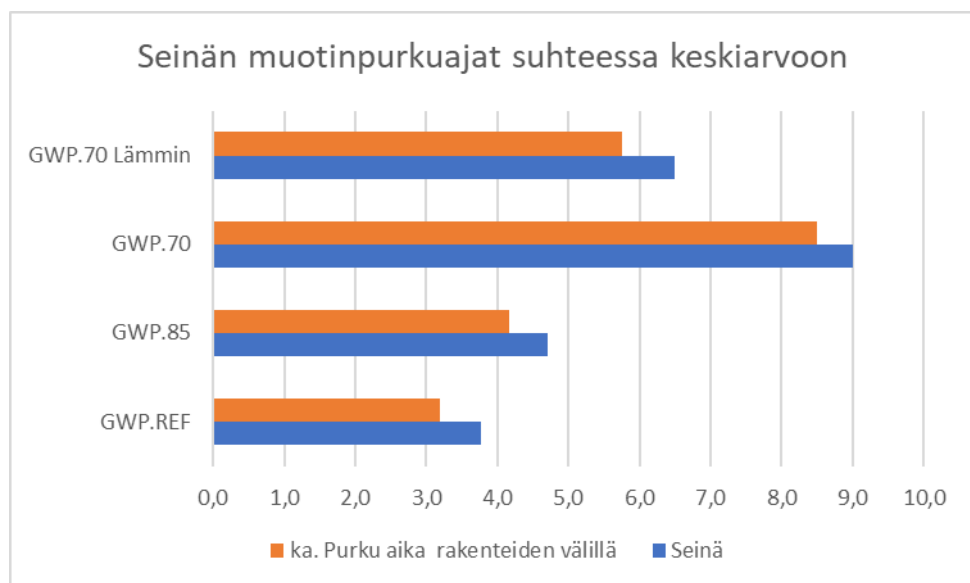
Kuva 16 Anturan muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.

GWP.REF laadulla muotinpurkulujuuteen päästään noin 3,3 vuorokauden ikäisenä, kun keskiarvo eri rakenteiden välillä on 3,2 vuorokautta. GWP.85 laadulla muotinpurkulujuus saavutettiin 4,6 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 9 vuorokaudessa (kuva 16). Keskiarvollisesti rakenteiden välillä GWP.85 laadulla saavutettiin muotinpurkulujuus 4,2 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 8,5 vuorokaudessa. Täten anturaa tarkastellessa lujuudet saavutettiin noin 5 % hitaammin kuin keskiarvollisesti muissa rakenteissa.

Antura on tutkituista rakenteista kohtalaisen paksu 300 mm ja leveydeltään 500 mm. Tutkimuksen ja kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan päätellä vähähiilisen betonin toimineen rakenteessa hyvin. Tutkimuksen tarkastelussa vähähiilisten betonien suorituskykyä verrattaessa antura jäi hieman keskiarvon alapuolelle. Tämä saattaa johtua yksinomaan rakenteen dimensioista, koska olosuhteet ja betonilaadut olivat vakioitu kaikille tutkittaville rakenteille.

4.2.2 Seinä

Seinää tarkastellessa on tutkimusaineistosta pääteltävissä, että vakioituissa olosuhteissa muotinpurkulujuuden saavuttaminen rakenteessa kestää keskimäärin kauemmin kuin muissa rakenteissa (kuva 15). GWP.REF laadulla muotinpurkulujuuteen päästään noin 3,8 vuorokauden ikäisenä, kun keskiarvo eri rakenteiden välillä on 3,2 vuorokautta (kuva 17). GWP.85 laadulla muotinpurkulujuus saavutettiin 4,7 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 9 vuorokaudessa.



Kuva 17 Seinän muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.

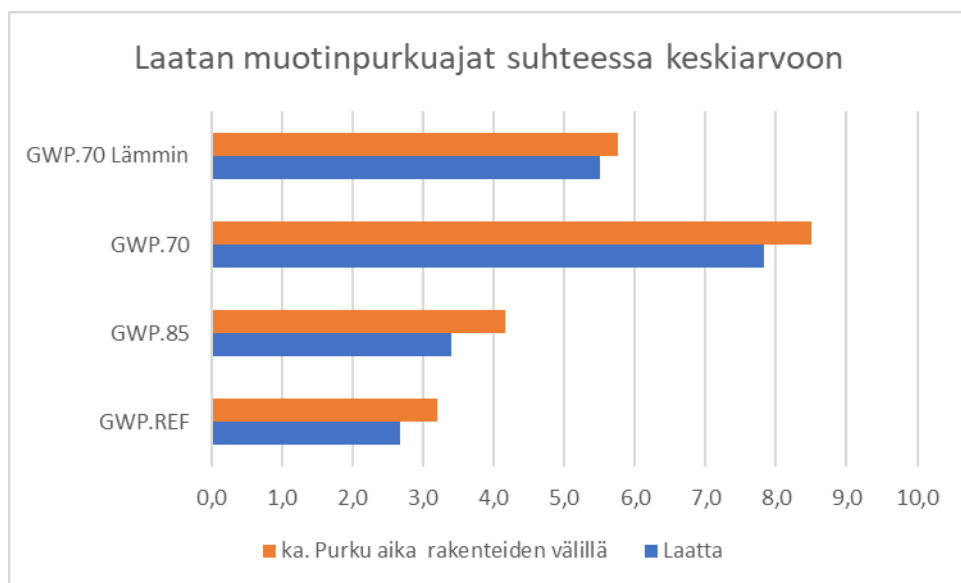
Keskiarvallisesti rakenteiden välillä GWP.85 laadulla saavutettiin muotinpurkulujuus 4,2 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 8,5 vuorokaudessa. Täten seinää tarkastellessa lujuudet saavutettiin noin 11 % hitaammin kuin keskiarvallisesti muissa rakenteissa. Seinä rakenteissa lujuudenkehitys oli kaikkein hitainta vertailtujen rakenteiden välillä (kuva 15).

Seinä on tutkituista rakenteista kaikkein ohuin, vain 150 mm paksu. Tutkimuksen ja kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan päätellä vähähiilisen betonin toimineen rakenteessa kohtalaisesti. Tutkimuksen tarkastelussa vähähiilisten betonien suorituskykyä verrattaessa seinä jäi selkeästi keskiarvon

alapuolelle. Tämä johtuu todennäköisemmin seinän paksuudesta, jolloin betonirakenteesta pääsee haihtumaan suurelta pinta-alalta paljon lämpöä, kuin muissa tarkastelluissa rakenteissa.

4.2.3 Laatta

Laattaa tarkastellessa voidaan datasta päätellä, että vakioituissa olosuhteissa muotipurkulujuuden saavuttaminen rakenteessa tapahtuu nopeammin kuin muissa rakenteissa (kuva 15). GWP.REF laadulla muotipurkulujuuteen päästään noin 2,7 vuorokauden ikäisenä, kun keskiarvo eri rakenteiden välillä on 3,2 vuorokautta. GWP.85 laadulla muotipurkulujuus saavutettiin 3,4 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 7,8 vuorokaudessa. Keskiarvillisesti rakenteiden välillä GWP.85 laadulla saavutettiin muotipurkulujuus 4,2 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 8,5 vuorokaudessa (kuva 18).



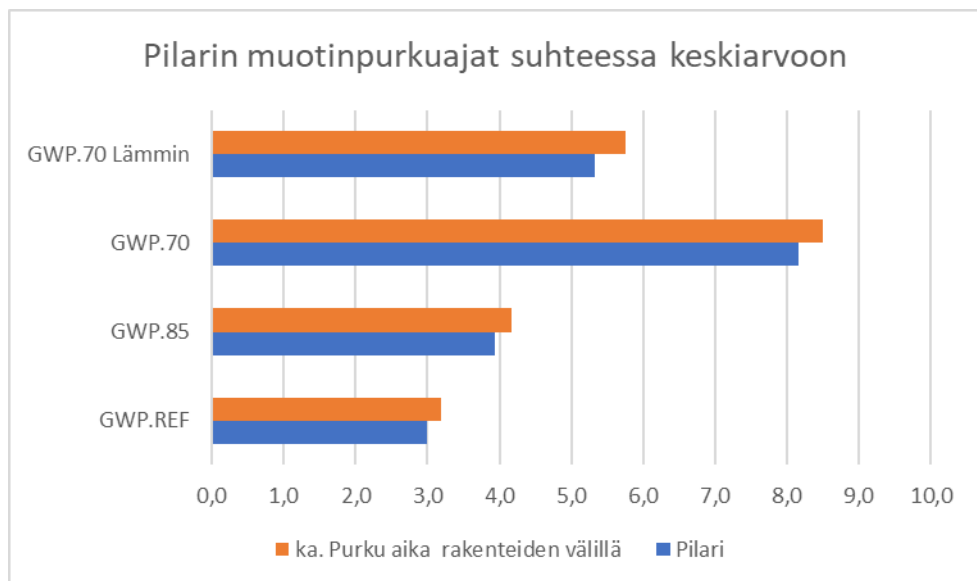
Kuva 18 Laatan muotipurkuajat suhteessa keskiarvoon.

Täten laattaa tarkastellessa lujuudet saavutettiin noin 14 % nopeammin kuin keskiarvillisesti muissa rakenteissa. Laatta rakenteissa lujuudenkehitys oli kaikkein nopein vertailtujen rakenteiden välillä (kuva 15).

Laatta on tutkituista rakenteista paksuimmasta päästä (300 mm), yhdessä anturan kanssa. Tämän tutkimuksen ja kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan päätellä vähähiilisen betonin toimineen rakenteessa erinomaisesti. Opinnäytetyön tarkastelussa vähähiilisten betonien suorituskykyä verrattaessa laatta suoritti selvästi keskiarvoa paremmin. Tämän johtuu nimenomaan laatan paksuudesta ja yleisesti laatan koosta.

4.2.4 Pilari

Pilaria tarkastellessa voidaan datasta päätellä (kuva 15), että vakioituissa olosuhteissa muotinpurkulujuuden saavuttaminen rakenteessa tapahtuu nopeammin kuin suurimmassa osassa rakenteita. GWP.REF laadulla muotinpurkulujuuteen päästään noin 3 vuorokauden ikäisenä, kun keskiarvo eri rakenteiden välillä on 3,2 vuorokautta (kuva 15).



Kuva 19 Pilarin muotinpurkuajat suhteessa keskiarvoon.

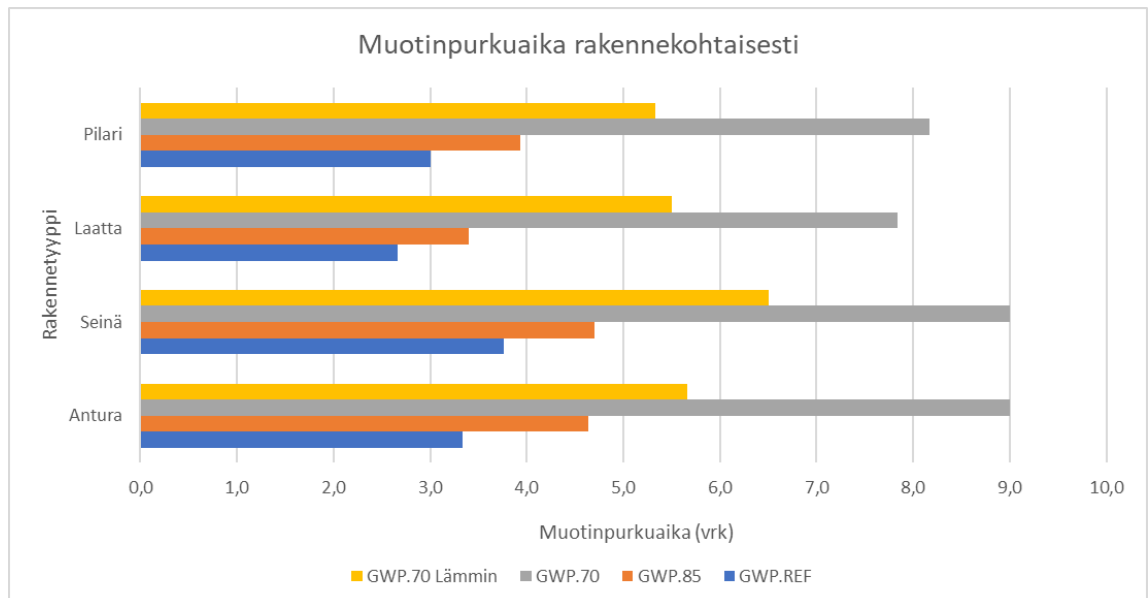
GWP.85 laadulla muotinpurkulujuus saavutettiin 3,9 vuorokaudessa ja GWP.70 laadulla 8,2 vuorokaudessa (Kuva 19). Keskiarvallisesti rakenteiden välillä GWP.85 laadulla saavutettiin muotinpurkulujuus 4,2 vuorokaudessa ja GWP.70

laadulla 8,5 vuorokaudessa. Täten pilaria tarkastellessa lujuudet saavutettiin noin 6 % nopeammin kuin keskiarvallisesti muissa rakenteissa (kuva 15).

Pilari on tutkituista rakenteista paksuin 400 mm halkaisijallaan. Opinnäytetyön tutkimuksen ja kirjallisuusselvityksen perusteella voidaan päätellä vähähiilisen betonin toimineen rakenteessa loistavasti. Tutkimuksen tarkastelussa vähähiilisten betonien suorituskykyä verrattaessa pilari suoritti keskiarvoa paremmin. Pilarin lujuudenkehitykseen saattaa vaikuttaa myös rakenteen korkeus, vaikka paksuuden on todettu olevan etu vähähiilisillä rakenteilla. Mitä enemmän haihtuma pinta-alaa rakenteessa on, lämpötilahäviötä syntyy enemmän.

4.3 Yhteenveto mallinnuksien tuloksista

Datan pohjalta voidaan päätellä rakenteen dimensioilla ja muodolla olevan merkittävä vaikutus vähähiilisenbetonin hyödyntämisessä. Ero keskiarvallisessa lujuudenkehityksessä rakenteiden välillä on jopa 25 % (kuva 20).



Kuva 20 Muotinpurkuaika rakennekohtaisesti.

Nopein lujuudenkehitys oli laatassa, jonka paksuus oli 300 mm. Seinä taas ohuimpana rakenteena omasi hitaimman lujuudenkehityksen 150 mm paksuisena rakenteena (kuva 20). Keskiarvallisesti laatassa kaikki betonilaadut saavuttivat muotipurkulujuuden 4,9 vuorokauden ikäisenä. Hitaimmillaan seinässä muotipurkulujuus saavutettiin 6 vuorokauden iässä. Pilari 5,1 vuorokauden ja antura 5,7 vuorokauden keskiarvallisella lujuudenkehityksellä asettuivat näiden väliin tarkastelussa. Rakenteiden tarkemmat dimensiot ja mahdollisten lämmityslankojen sijoittelu on avattu tarkemmin liitteessä 4, lämmityslankojen sijainti on kuvattu rakenteissa pisteillä kuviin.

Tutkimustulosten pohjalta voidaan todeta, että vähähiilinen betoni suoritti paksuimmissa rakenteissa paremmin kuin ohuissa rakenteissa. Absoluuttista päätelmää siitä, että lujuudenkehitys olisi aina nopeampaa paksuimmassa rakenteessa ei voida tehdä, koska myös muut rakenteet dimensiot vaikuttavat lujuudenkehitykseen. Lujuudenkehityksen ja muotipurkulujuuden saavuttamisen kannalta voidaan todeta, että vähähiilinen betoni toimii realistisena vaihtoehtona kaikissa rakenteissa, kun huomioidaan oikean suuruinen päästövähennysaste. Kaikkien tutkittujen vähähiilisyysluokkien mukaista betonia ei ole järkevää hyödyntää jokaisessa tutkitussa rakenteessa, muotipurkulujuuden saavuttamisen kannalta tarkasteltuna. Päästövähennyksen kannalta tarkasteltuna, kaikkia tutkittuja betonilaatuja on mahdollista hyödyntää kaikissa tutkituissa rakenteissa.

Olosuhteiden vaikutuksella betonilaatujen suorituskykyyn, sekä rakenteiden muotipurkulujuuden saavuttamiseen on huomattava merkitys. Vähähiiliset betonit suorittavat selkeästi paremmin lämpimissä olosuhteissa, kuin kylmissä olosuhteissa. Eroa muotipurkulujuuden välillä kaikilla betonilaaduilla tarkastelluissa olosuhteissa on lämpimän ja kylmän välillä melkein 30 %. Myös eri betonilaatujen välillä huomattiin olevan selkeä ero muotipurkulujuuden saavuttamisen osalta. Johtopäätöksenä voidaan päätellä että, mitä vähemmän seostettu vähähiilinen betonilaatu on, sen nopeammin se saavuttaa muotipurkulujuuden.

4.4 Kyselytutkimuksen vastaukset

Kyselytutkimuksen kysymyksessä yksi kysyttiin ”Koetko että vähähiilisen betonin käytöstä on riittävästi tietoa saatavilla?”. Kysymyksen tarkoituksena oli kartoittaa asiantuntija ryhmältä, miten he kokevat vähähiilisen betonin tiedon olevan käytettävissä. Kysymyksen toisena tarkoituksena oli saada tietoa siitä, vaatiiko vähähiilisen betonin käytön kasvattaminen lisää informaatiota aiheesta.

Ensimmäinen kysymys sai vastauskeskiarvoksi 7,1 pistettä, joten voidaan todeta, että vähähiilisestä betonista tietoa on saatavilla vähintäänkin riittävästi. Lisäinformaatiosta tuskin on haittaa ja tietoisuuden lisääminen voisi kasvattaa vähähiilisen betonin markkinaosuutta.

Toisessa kysymyksessä (liite 5) haluttiin selvittää vähähiilisen betonin hyödyntämisen hankaluutta subjektiivisena kokemuksena. Työryhmän vastauskeskiarvoksi saatiin 7,1 pistettä, josta pääteltynä vähähiilisen betonin hyödyntämistä rakennustyömailla ei ole koettu hankalaksi. Tämän opinnäytetyön tutkimuksen mallinnukset myös viittaavat siihen, että vähähiilinen betoni ei aseta suhteettoman hankalia haasteita betonin hyödyntämiselle, ainakaan muotinpurkulujuuden näkökulmasta tarkasteltuna.

Kysymyksessä kolmessa kysyttiin ”Hyödynnetäänkö vähähiilisen betonin potentiaalia, kuinka hyvin?” Vastauskeskiarvoksi kysymykseen saatiin 3,7, jonka perusteella voidaan todeta, että potentiaalia ei hyödynnetä tehokkaasti. Kysymyksellä haluttiin tarkoituksen mukaisesti mitata hyödyntämisen potentiaalia. Tarkoitus kysymyksen takana oli mitata, kuinka hyvin vähähiilistä betonia voitaisiin hyödyntää, suhteessa kuinka hyvin betonia hyödynnetään tällä hetkellä.

Kysymyksen neljä (liite 5) tarkoituksena oli suoraviivaisesti saada tietoa, kuinka suuressa roolissa vähähiilinen betoni on uusissa alkavissa hankkeissa. Vastauskeskiarvoksi saatiin 5,1, josta voidaan päätellä vähähiilisen betonin olevan jollain tavalla mukana puolissa alkavista kohteista. Mitään yksiviivaista yleistystä kyselytutkimuksen perusteella ei voida tehdä vähähiilisen betonin

osuudesta uusissa rakennushankkeissa, vaan jokaisen projektin erityispiirteet määrittelevät hyödynnettävät betonilaadut.

Kysymyksessä viisi kysyttiin ” Ajatteletko vähähiilisen betonin soveltuvan kaikkiin rakenteisiin?”. Kysymyksen tarkoituksena oli saada tietoa, miten asiantuntijat ajattelevat vähähiilisen betonin hyödyntämisestä.

Vastauskeskiarvoksi saatiin 5,3, josta voidaan ajatella, että vähähiilinen betoni ei sovellu kaikkiin rakenteisiin, mutta voidaan olettaa betonin soveltuvan useimpiin rakenteisiin. Tämän opinnäytetyön tutkimuksen perusteella vähähiilinen betoni soveltuu paremmin hyödynnettäväksi paksummissa ja massiivisemmissa rakenteissa sellaisenaan, kuin ohuemmissa rakenteissa. Betonin hyödyntämiseen toki vaikuttaa olennaisesti lujuudenkehityksen olosuhteet.

Kysymys numero kuusi (liite 5) oli avoimen vastauksen kysymys, jonka tarkoituksena oli saada tietoa, millaisissa rakenteissa asiantuntijat suosittelisivat vähähiilisen betonin hyödyntämistä. Yleisimpinä hyödyntämiskohteina nostettiin esille perustukset, massiivirakenteet sekä sisärakenteet. Lisäksi painotettiin, että vähähiilisyyssaste vaikuttaa betonin tehokkaaseen hyödyntämiseen. Aina ei ole järkevää käyttää kaikkein vähähiilisintä betonia, jokaisessa rakenteessa, kuten tämän opinnäytetyön tutkimuskin osoitti. Lisäksi mainittiin, että vähähiilisyydestä saadaan eniten hyötyä massiivissa rakenteissa, joissa usein betoni volyymit ovat suuria.

Kysymyksessä seitsemän haettiin varmistusta kahden aikaisemman kysymyksen teemaan ja ajatusmaailmaan. Kysymys seitsemän oli muotoiltu seuraavanlaiseksi ”Kannattaako vähähiilistä betonia hyödyntää kaikissa rakenteissa?”. Tuloskeskiarvoksi kysymykseen saatiin 3,9 pistettä, joka on selkeästi alle keskiarvon. Tuloksesta voidaan tulkita, että vähähiilistä betonia ei kannata hyödyntää kaikissa rakenteissa. Samaan tulokseen myös viittasi kysymyksen kuusi avoimet vastaukset.

Kysymys kahdeksan ”Ajatteletko vähähiilisen betonin saatavuuden olevan ongelmana betonin hyödyntämisessä?” oli suunniteltu kartoittamaan

vähähiilisen betonin saatavuutta. Kysymyksen tarkoituksena on muodostaa käsitys siitä, miten hyvin vähähiilistä betonia on tarjolla hyödynnettäväksi. Tuloskeskiarvoksi saatiin 2 pistettä, eli voidaan yksimielisesti tulkita, että saatavuus ei ole ongelma vähähiilisen betonin hyödyntämisessä. Tätä myös tukee vähähiilinenbetoni -verkkosivulla oleva saatavuustaulukko (kuva 1), jonka mukaan saatavuus vähähiilisellem valmisbetonille on hyvällä tasolla.

Kysymyksessä yhdeksän (liite 5) oli tavoitteena saada asiantuntijoilta käsitystä, koetaanko vähähiilisen betonin olevan herkempi olosuhteiden muutoksille kuin tavanomaisen betonin. Asteikko kysymykseen oli totuttuun tapaan 0 – 10, nollan kuvastaessa ”selkeästi herkempi” ja 10 kuvastaen ”ei ole herkempi” vastauksia. Tulokseksi saatiin 3,6 pistettä, josta voidaan päätellä, että vähähiilinen betoni on herkempi olosuhteiden muutokselle, kuin tavanomainen betoni. Tätä myös tukee tässä opinnäytetyössä tehdyt mallinnukset, joista voidaan päätellä vähähiilisen betonin lujuudenkehityksen hidastuvan viileämmissä olosuhteissa.

Kysymyksessä 10 kysyttiin: ”Kuinka todennäköisesti vähähiilisen betonin käyttäminen asettaa liian suuria aikatauluhaasteita rakennustyömaille?”. Kysymyksen tarkoituksena oli selvittää todennäköisyyttä aikatauluhaasteiden syntymiselle rakennusprojektissa. Asiantuntijoiden vastauskeskiarvon mukaan vastaukseksi saatiin 5,6 pistettä, josta voidaan päätellä asiantuntijoiden ajattelevan, että liian suuria aikatauluhaasteita ei synny työmaalle vähähiilisen betonin käytöstä.

Kysymys 11 (liite 5) oli täydentävä lisäkysymys kysymykseen 10. Kysymyksen tavoitteena oli, mitata kokeeko asiantuntijat, että vähähiilisen betonin käyttö pidentää projektin kestoa. Vastaukseksi saatiin 4,4 pistettä, joten asiantuntijat ajattelevat, että vähähiilinen betoni ei vaikuta projektien kestoon pidentävästi, mutta ei pidetä myöskään epätodennäköisenä, etteikö aikatauluvaikutuksia tulisi.

Kysymyksessä 12 kysyttiin ”Koetko vähähiilisten betonin käyttämisen rakennusprojekteissa hankalaksi?”. Kysymyksen tavoitteena oli mitata

asiantuntijoiden subjektiivista kokemusta vähähiilisen betonin hyödyntämisessä rakennushankkeissa. Tulokseksi saatiin 6,4 pistettä, josta voidaan päätellä, että vähähiilisen betonin käyttämistä ei koeta hankalaksi, mutta ei myöskään täysin vaivattomaksi.

Kysymyksellä 13 (liite 5) oli tarkoitus mitata asiantuntijoiden mielipidettä sen suhteen, että edistäkö lainsäädäntö vähähiilisen betonin hyödyntämistä tämän hetken markkinalla. Vastauskeskiarvoksi saatiin 3,9 pistettä, josta johtopäätöksenä voidaan todeta, että lainsäädäntö ei edistä vähähiilisen betonin hyödyntämistä. 3,9 pistettä ei myöskään anna varsinaista kuvaa, että lainsäädäntö hidastaisi vähähiilisen betonin hyödyntämistä, mutta ei ainakaan edistä.

Kysymys 14 oli avoimen vastauksen kysymys, joka oli aseteltu seuraavasti:

”Mitä toimenpiteitä vähähiilisen betonin käytön lisääminen edellyttäisi?”

Vastauksista nousi esiin ainakin tarve vähähiilisten betonien olosuhteiden ja lujuudenkehityksen hallintaan ja suunnitteluun. Lisäksi esiin nousi tietoisuuden kasvattamista vähähiilisen betonin käytön suhteen, koulutusta rakennustyömaille ja urakoitsijoilta enemmän muutoshalukkuutta vähähiilisten tuotteiden hyödyntämiseen. Lisäksi esiin nostettiin myös, että vaatimuksen vähähiilisen betonin hyödyntämiselle voisivat olla tiukemmat.

Viimeinen kysymys (liite 5) numero 15 oli tulevaisuuteen peilaava kysymys, jossa mitattiin asiantuntijoiden mielipidettä siitä, kuinka todennäköiseksi he kokevat vähähiilisen betonin olevan tulevaisuudessa eniten hyödynnetty betonilaatu. Vastauskeskiarvoksi saatiin 8,4 pistettä, joten voidaan tulkita asiantuntijoiden ajattelevan suurella todennäköisyydellä vähähiilisen betonin olevan tulevaisuudessa eniten hyödynnetty betonilaatu.

4.5 Yhteenveto kyselytutkimuksen tuloksista

Kyselytutkimuksen perusteella voidaan todeta, että vähähiilisestä betonista on tietoa hyvin saatavilla. Vähähiilisen betonin hyödyntämistä rakennustyömaalla ei koettu asiantuntijoiden mukaan hankalaksi, vaikka tutkimuksen perusteella on

todettavissa, että vähähiilisen betonin potentiaalia ei hyödynnetä kauhean hyvin.

Asiantuntijoiden mukaan vähähiilistä betonia ei kannata hyödyntää kaikissa rakenteissa, eikä se sovellu hyödynnettäväksikään kaikissa rakenteissa. Yleisimpinä hyödyntämiskohteina nostettiin esille perustukset, massiivirakenteet sekä sisärakenteet. Lisäksi painotettiin, että vähähiilisyyssaste vaikuttaa betonin tehokkaaseen hyödyntämiseen. Aina ei ole järkevää käyttää kaikkein vähähiilisintä betonia, jokaisessa rakenteessa, kuten tämän opinnäytetyön tutkimuskin osoitti. Asiantuntijoiden mukaan uusissa projekteissa noin puolessa vähähiilinen betoni näyttelee jonkinlaista roolia.

Kyselytutkimuksen perusteella voidaan todeta, että vähähiilistä betonia on hyvin saatavilla, ja että saatavuus ei ole ongelma vähähiilisen betonin hyödyntämiselle. Vähähiilinen betoni koetaan asiantuntijoiden mukaan herkemmäksi olosuhteiden vaikutuksella ja vaatiikin tästä syystä tietyissä olosuhteissa enemmän huomioita urakoitsijalta, kuin tavanomainen betoni.

Asiantuntijat olivat melko neutraaleja sen suhteen, että asettaako vähähiilinen betoni liian suuria aikatauluhaasteita rakennustyömaille, mutta taas hieman taipuvaisia siihen, että vähähiilinen betoni ei vaikuta pidentävästi projektin keston. Tämän opinnäytetyön tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä, että vähähiilisen betonin hyödyntämisellä voi olla pieniä vaikutuksia aikataulutukseen viileämmässä olosuhteissa, mutta lämpimissä olosuhteissa vähähiilisen betonin nähdään suorittavan hyvin. Vähähiilisen betonin hyödyntämistä ei koettu hankalaksi, mutta ei myöskään helpoksi projekteilla.

Tällä hetkellä koetaan, että lainsäädännöllä ei edistetä vähähiilisen betonin hyödyntämistä. Asiantuntijoilta kysyttiin myös, millä toimenpiteillä vähähiilisen betonin käyttö lisääntyisi. Esiin nousi ainakin informaation ja käytännön kokemuksen lisääminen. Vaatimuksia vähähiiliselle betonirakentamiselle voitaisiin tiukentaa ja suunnittelua ja toimintaa urakoitsijoiden osalta voitaisiin tehostaa. Esiin nostettiin myös lämpötilojen ja lujuudenkehityksen mallintamista ja tätä kautta informaation lisäämistä tilaaja sekä urakoitsija puolelle.

Asiantuntijat olivat myös vahvasti sitä mieltä, että tulevaisuudessa vähähiilinen betoni tulee olemaan eniten hyödynnetty betonilaatu.

4.6 Tulosten yhteenveto

Sekä kyselytutkimuksen, että mallinnoksien perusteella pystytään toteamaan, että vähähiilistä betonia voidaan hyödyntää nykypäivän rakentamisessa. Mallinnoksien ja kyselytutkimuksen tulosten perusteella täytyy todeta, että kaikki vähähiiliset betonilaadut, eivät sovi hyödynnettäväksi jokaisessa rakennetyypissä. Tämän tutkimusmateriaalin perusteella voidaan todeta korkeamman päästövähennysluokan betonien, kuten GWP.REF ja GWP.85 laatuojen soveltuvan monipuolisemmin hyödynnettäväksi rakenteissa, kuin matalamman päästövähennysluokan GWP.70 betoni.

Kyselytutkimuksen ja mallinnoksien perusteella voidaan todeta, että vähähiilinen betoni tarvitsee tarkemman olosuhteidenhallinnan kuin vähähiilisyysluokittelematon betoni. Vähähiilisten betonilaatuojen osalta olosuhteiden vaikutuksella huomattiin merkittävä vaikutus eri rakenteiden ja betonilaatuojen suorituskyvyn välillä. Selvästi positiivisempia tuloksia saatiin lämpimissä olosuhteissa verrattuna viileämpiin olosuhteisiin.

Tutkimusmateriaalin pohjalta voidaan myös päätellä, että rakenteissa kannattaisi jo suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon käytettävät vähähiiliset betonilaadut. Vähähiilisten betonilaatuojen ja rakenteiden osalta olisi hyvä aikataulutuvaiheessa suunnitella oikeaoppinen jälkihoito ja varmistaa riittävä aika muotinpurkulujuuden saavuttamista varten rakennushankkeella.

Tutkimusmateriaalin perusteella vähähiilinen betoni ei näyttäisi asettavan rakentamiselle liian suuria haasteita aikataulutuksen osalta, kun päästövähennysluokka on valittu huolellisesti ja olosuhteet käytettävälle vähähiiliselle betonille ovat edulliset.

Sekä kyselytutkimuksen, että mallinnoksien pohjalta voidaan todeta vähähiilisen betonin soveltuvan paremmin hyödynnettäväksi paksummissa rakenteissa.

Molemmissa tutkimuksissa esille noussut vähähiilisen betonin herkkyys olosuhteiden vaikutukselle myös pienenee rakenteen massiivisuuden myötä.

5 Lopuksi

Tämän opinnäytetyön tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten vähähiilinen betoni sopii käytettäväksi erilaisissa yleisimmissä rakenteissa. Lisäksi tutkittiin myös, miten olosuhteet vaikuttavat vähähiilisen betonin hyödyntämiseen kyseisissä rakenteissa.

Opinnäytetyössä tutkituista rakenteista ja teetetyt kyselytutkimuksen perusteella voidaan päätellä vähähiilisen betonin soveltuvan hyvin käytettäväksi erilaisiin rakenteisiin. Haasteita syntyy selkeästi enemmän ohuemmissa rakenteissa ja vähähiilinen betoni onkin tutkimuksen perusteella parhaimmillaan massiivirakenteissa. Vähähiilillä betoneilla on koostumuksensa takia usein matalampi lämmönkehitys verrattuna tavanomaisiin betonilaatuihin. Tutkimuksen mukaan betonin parhaat hyödyntämismahdollisuudet ovat paljon hydrataatiolämpöä tuottavissa massiivisissa rakenteissa.

Tutkimusaineiston perusteelta voidaan päätellä vähähiilisen betonin olevan herkempi olosuhteiden muutokselle, kun päästövähennysaste on korkeampi. Olosuhteilla huomattiin myös merkittävä vaikutus vähähiilisen betonin hyödyntämisessä. Vähähiiliset betonit päästövähennysluokasta riippumatta, suorittivat kaikkein parhaiten lämpimissä olosuhteissa. Betonilaatujen suorituskyky heikkeni, kun olosuhteet viilenivät. Myös suuremman päästövähennys luokan betoneilla olosuhteiden vaikutus betonilaadun suorituskykyyn oli merkittävämpi. Lähtökohtaisesti betonilaadun suorituskyky heikkeni isomman päästövähennysluokan betoneilla viileissä olosuhteissa.

Vähähiilisen betonin käyttö työmaalla asettaa urakoitsijalle haasteita viileämissä olosuhteissa, mutta lämpimissä olosuhteissa vähähiilisen betonin vähemmän seostetut laadut, esimerkiksi GWP.REF tai GWP.85 laatu näyttäisivät suorittavan rakenteessa erinomaisesti verrattuna GWP.70 -luokan betoniin. Isolta osin betonilaadun suorituskykyyn vaikuttaa rakenteen dimensiot ja käytetty vähähiilisyyluokka. Kyselytutkimuksessa asiantuntijat suosittelivatkin, että vähähiilistä betonia ei kannata hyödyntää kaikissa rakenteissa.

Tutkimuksen perusteella vähähiilistä betonia on hyvin saatavilla ja sen ei nähdä merkittävästi vaikuttavan rakennusprojektin keston. Vähähiilisyysluokan osalta, on hyvä miettiä ja harkita missä rakenteissa vähähiilisen betonin hyödyntäminen on järkevää. Vähähiilisen betonin eduksi, voidaan tämän tutkimuksen perusteella todeta rakenteen massiivisuus. Betonin suorituskyky paksuimmissa rakenteissa oli selkeästi parempi, kuin ohuemmissa rakenteissa. Vaikka tässä työssä tutkittuja rakenteita ei voidakaan vielä massiivisiksi rakenteiksi luokitella.

Opinnäytetyön teossa käytettiin hyödyksi yleisesti alalla hyödynnettyä Betometri-mallinnusohjelmaa. Betometrin toimivuus ja tarkkuus on todettu käytännössä satojen kohteiden kohdalla, tältä osin Betometristä saatuja tietoja voidaan pitää luotettavana. Betonilaatujen vähähiilisyys on todennettu betoniyhdistyksen vähähiilisyyslaskurilla ja betonilaatujen voidaan todeta täyttävän niille asetettu päästövähennysluokka. Betonilaatujen suhteitusten toimivuuden ja realistisuuden osalta on konsultoitu Suomen suurimpia betonivalmistajia ja voidaan olettaa, että betonilaadut, joilla rakenteet mallinnettiin vastaavat realistisesti käytössä olevia betonilaatuja. Kokonaisuudessaan saavutetuilla metodeilla ja tuloksilla opinnäytetyön tulostaso voidaan todeta luotettavaksi.

Tuloksia on mahdollista hyödyntää edistämään vähähiilisen betonin käyttöä ja tarkoitus onkin opinnäytetyössä mallinnettujen tietojen perusteella lisätä vähähiilinenbetoni.fi – verkkosivuille rakennekortit, joissa hyödynnetään tämän tutkimuksen dataa. Vaikka tulokset ovat hyödynnettävissä laajalti sellaisenaan, tulee muistaa, että tulokset pätevät vain tässä työssä esitetyillä suhteutuksilla ja lähtöarvoilla, vain tässä työssä annetuissa olosuhteissa. On myös hyvä muistaa, että tulokset on saavutettu mallintamalla rakenteet, ei työmaalla suoritetuilla mittauksilla.

Jatkotutkimuksen osalta voisi tarkastella vähähiilisen betonin käyttäytymistä korkeammassa lujuusluokissa ja suuremmissa rakenteissa. Tutkimuksessa nousi esille, että vähähiilisen betonin parhaat hyödyntämispaikat ovat massiivirakentamisessa, joten tämän osalta kannattaisi tehdä jatkotutkimusta. Jatkotutkimuksessa voisi olla järkevä vertailla tavanomaisten

päästöluokittelemattomien betonilaatujen hyödyntämistä, verrattuna vähähiilisten betonilaatujen hyödyntämiseen massiivirakentamisessa.

Lisätutkimuksena voisi olla järkevää tehdä tehokkuuskartoitusta rakennushankkeista hyödynnettävistä betonilaaduista ja missä rakenteissa vähähiilisen betonin hyödyntämisestä saisi parhaan lopputuloksen kokonaishiilikuorman osalta.

Lähteet

Betoniteollisuus ry, n.d. Tietoa betonista, Viitattu 11.3.2025 Saatavissa:

<https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/>

Betonitieto, n.d.a. Betonin lujuudenkehitys, Viitattu 20.5.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-lujuudenkehitys.html>

Betonitieto, n.d.b. Hiilijalanjälki, Viitattu 24.2.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/betoniteollisuus/valmisbetoni/ymparisto/ymparistovaikutukset/hiilijalanjalki.html>

Betonitieto, n.d.c. Jälkihoito, Viitattu 15.5.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/jalkihoito.html>

Betonitieto, n.d.d. Pozzolaanit, Viitattu 26.5.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/seosaineet/pozzolaanit.html>

Betonitieto, n.d.e. Seosaineet, Viitattu 10.3.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/seosaineet.html>

Betonitieto, n.d.f. Sementti, Viitattu 15.3.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/betoniteollisuus/valmisbetoni/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet-ja-niiden-kasittely/betonin-osa-aineet/sementti.html>

Betonitieto, n.d.g Talvibetonointi työmaalla, Viitattu 3.6.2025 Saatavissa:

<https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/talvibetonointi.html>

Cembureau, 2024. CEMBUREAU's Net Zero Roadmap, Viitattu 10.3.2025

Saatavissa: <https://cembureau.eu/library/reports/cembureau-s-net-zero-roadmap/>

Dinakar, P. & Manu, S. 2014. Concrete mix design for high strength selfcompacting concrete using metakaolin, Viitattu 21.4.2025, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.053>

Finnsementti Oy, 2023. Ympäristöraportti 2023, Viitattu 10.3.2025 Saatavissa: <https://finnsementti.fi/ymparisto/ymparistoraportit/>

Finnsementti Oy, 2024.a. EPD ympäristöseloste Kolmossementti, Viitattu 20.5.2025 Saatavissa: <https://finnsementti.fi/tuotteet/sementit/kolmossementti/>

Finnsementti Oy, 2024.b. EPD ympäristöseloste Oivasementti, Viitattu 20.5.2025 Saatavissa: <https://finnsementti.fi/tuotteet/sementit/oiva-sementti-525-n/>

Finnsementti Oy, 2024.c. EPD ympäristöseloste Rapidsementti Parainen, Viitattu 20.5.2025 Saatavissa: <https://finnsementti.fi/tuotteet/sementit/rapidsementti-parainen/>

Hewlett, P. 2003. Lea's chemistry of cement and concrete, 4th edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann

Ilmastolaki 10.6.2022/423. Viitattu 27.1.2025

Laine, A. Pohjalainen, S. Mäntylä, I. Elo-Ranta, A. Lehtomäki, J. Raivio, T. 2024. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 – tiekartan päivitys. Gaia Consulting Oy. Viitattu 15.3.2025, Saatavissa: <https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/vahahiilinen-rakentaminen/vahahiillisyyden-tiekartta/>

Neville, A. 2011. Properties of Concrete, 5th edition. Essex: Pearson Education Limited

Newman, J. & Choo, B. S. 2003. Advanced concrete technology: Constituent materials. Oxford: Butterworth-Heinemann

Ojala, T. Al-Neshawy, F. Punkki, J. 2019. Betonin koostumuksen vaikutus sen tiivistettävyyteen, Viitattu: 15.3.2025, Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/items/1fef28be-2bec-4e9b-b08c-cea023c9eb57>

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni 4/20212 Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/betonilehti/4-2021/?verkkojulkaisu=1>

Rakentamislaki 21.4.2023/751. Viitattu 27.1.2025

Ruokonen, S. 2025. Haastattelu. Finnsementti Oy:n tiimipäällikköä Sini Ruokosta haastatteli 5.5.2025 Jesse Junnila

Salminen, E. 2021. Suomalaisen betonin hiilijalanjälki. Betoni. 1/2021.
Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/betonilehti/1-2021/?verkkojulkaisu=1>

SFS 5975. 2019. Betonirakenteiden toteutus. Standardin SFS-EN 13670 käyttö Suomessa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS 7022. 2024. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 12390-2. 2019. Kovettuneen betonin testaus. Osa 2: Koekappaleiden valmistus ja säilytys lujuustestejä varten. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 13670. 2010. Betonirakenteiden toteutus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

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

SFS-EN 206-1. 2021. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Suomen Betoniyhdistys ry, Vähähiilinenbetoni, viitattu 10.3.2025 Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi/>

Suomen Betoniyhdistys ry. 2016. BY65 Betoninormit. 2. päivitetty painos Helsinki: BY Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. BY201 Betonitekniikan oppikirja. 8. painos Helsinki: BY Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2019. BY47 Betonirakentamisen laatuohjeet. 2. painos Helsinki: BY Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2021. BY65 Betoninormit. 5. päivitetty painos Helsinki: BY Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2023. BY45 Betonilattiat. 6. päivitetty painos Helsinki: BY Koulutus.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2024. BY68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu – opas suunnittelijoille 2024. 2. painos Helsinki: BY Koulutus.

Taylor, H. F. W. 1997. Cement chemistry, 2nd edition. Lontoo: Thomas Telford Publishing.

Viirola, H. & Raivio, P. 2000. Portlandsementin hydrataatio. VTT Tiedotteita. 61 Saatavissa: ISBN 951-38-5763-8

GWP.REF luokan vähähiilisyyslaskelma

Valmisbetonin vähähiilisyysraportti

Raportin nro. 4259T. 17.4.2025 Raportti on voimassa 16.4.2027 saakka

Finnsementti Oy

FS koe

Jesse Junnila (jesse.junnila@finnsementti.fi) on tehnyt 17.4.2025 GWP-laskelman Suomen Betoniyhdistys ry:n verifioidulla laskentamenetelmällä Finnsementti Oy:n valmisbetonilaadulle

Opinnäytetyö 1 (1)

C30/37 - Ei huokostettu, GWP.REF

Laskennassa käytetyt tiedot:

Materiaali	Määrä	Tiheys	Kuljetustapa	Kuljetusmatka
Finnsementti, Oiva-sementti, PA CEM II/B-M (S-LL) 52,5N	150 kg/m ³	3 100 kg/m ³	Rekka, sideaineet	170 km
Finnsementti, Rapidsementti, PA CEM II/A-LL 42,5 R	150 kg/m ³	3 100 kg/m ³	Rekka, sideaineet	170 km
Fraktio 1	1 330 kg/m ³	2 670 kg/m ³	Rekka, kiviaines	50 km
Fraktio 1	550 kg/m ³	2 670 kg/m ³	Rekka, kiviaines	50 km
Tehonotkistin	2 kg/m ³	1 000 kg/m ³	Jakeluauto, esim lisäaine	50 km
Vesi	180 kg/m ³	1 000 kg/m ³		
Ilma	0 kg	1 kg/m ³		
Keskimääräinen sähkö	7 kWh/m ³			
Kevyt polttoöljy	11 kWh/m ³		Rekka, polttoöljy	50 km

Tilavuus 1.00 m³

Kokonaispäästöt moduuleissa A1-A3:	233 CO₂eq [kg/m³]	0,10 CO₂eq [kg/kg]
A1 Materiaalit yhteensä:	205	0,09
A2 Kuljetus yhteensä:	24	0,01
A3 Energia yhteensä:	4	0,00

Finnsementti Oy:n betonin valmistus on kolmannen osapuolen varmentamaa.
Laskennan lähtötiedot perustuvat BY Vähähiilisyyslaskurin 17.4.2025 päivitettyihin arvoihin.
Laskija ymmärtää riittävästi betoniteknologiaa ja vakuuttaa tehneensä laskelman käyttäen oikeita lähtötietoja.

GWP.85 luokan vähähiilisyyslaskelma

Valmisbetonin vähähiilisyysraportti

Raportin nro. 4258T. 17.4.2025 Raportti on voimassa 16.4.2027 saakka

Finnsementti Oy

FS koe

Jesse Junnila (jesse.junnila@finnsementti.fi) on tehnyt 17.4.2025 GWP-laskelman Suomen Betoniyhdistys ry:n verifioidulla laskentamenetelmällä Finnsementti Oy:n valmisbetonilaadulle

Opinnäytetyö 2 (1)

C30/37 - Ei huokostettu, GWP.85

Laskennassa käytetyt tiedot:

Materiaali	Määrä	Tiheys	Kuljetustapa	Kuljetusmatka
Finnsementti, Oiva-sementti, PA CEM II/B-M (S-LL) 52,5N	300 kg/m ³	3 100 kg/m ³	Rekka, sideaineet	170 km
Fraktio 1	1 330 kg/m ³	2 670 kg/m ³	Rekka, kiviaines	50 km
Fraktio 1	550 kg/m ³	2 670 kg/m ³	Rekka, kiviaines	50 km
Tehonotkistin	2 kg/m ³	1 000 kg/m ³	Jakeluauto, esim lisäaine	50 km
Vesi	180 kg/m ³	1 000 kg/m ³		
Ilma	0 kg	1 kg/m ³		
Keskimääräinen sähkö	7 kWh/m ³			
Kevyt polttoöljy	11 kWh/m ³		Rekka, polttoöljy	50 km

Tilavuus 1.00 m³

Kokonaispäästöt moduuleissa A1-A3:	212 CO ₂ eq [kg/m ³]	0,09 CO ₂ eq [kg/kg]
A1 Materiaalit yhteensä:	184	0,08
A2 Kuljetus yhteensä:	24	0,01
A3 Energia yhteensä:	4	0,00

Finnsementti Oy:n betonin valmistus on kolmannen osapuolen varmentamaa.

Laskennan lähtötiedot perustuvat BY Vähähiilisyyslaskurin 17.4.2025 päivitettyihin arvoihin.

Laskija ymmärtää riittävästi betoniteknologiaa ja vakuuttaa tehneensä laskelman käyttäen oikeita lähtötietoja.

GWP.85 luokan vähähiilisyyslaskelma

Valmisbetonin vähähiilisyysraportti

Raportin nro. 4257T. 17.4.2025 Raportti on voimassa 16.4.2027 saakka

Finnsementti Oy

FS koe

Jesse Junnila (jesse.junnila@finnsementti.fi) on tehnyt 17.4.2025 GWP-laskelman

Suomen Betoniyhdistys ry:n verifoidulla laskentamenetelmällä

Finnsementti Oy:n valmisbetonilaadulle

Opinnäytetyö 3 (1)

C30/37 - Ei huokostettu, GWP.70

Laskennassa käytetyt tiedot:

Materiaali	Määrä	Tiheys	Kuljetustapa	Kuljetusmatka
Finnsementti, Kolmossementti, PA CEM III/A 52,2 L	300 kg/m ³	3 100 kg/m ³	Rekka, sideaineet	170 km
Fraktio 1	1 330 kg/m ³	2 670 kg/m ³	Rekka, kiviaines	50 km
Fraktio 1	550 kg/m ³	2 670 kg/m ³	Rekka, kiviaines	50 km
Tehonotkistin	2 kg/m ³	1 000 kg/m ³	Jakeluauto, esim lisäaine	50 km
Vesi	180 kg/m ³	1 000 kg/m ³		
Ilma	0 kg	1 kg/m ³		
Keskimääräinen sähkö	7 kWh/m ³			
Kevyt polttoöljy	11 kWh/m ³		Rekka, polttoöljy	50 km

Tilavuus 1.00 m³

Kokonaispäästöt moduuleissa A1-A3:	175 CO₂eq [kg/m³]	0,07 CO₂eq [kg/kg]
A1 Materiaalit yhteensä:	147	0,06
A2 Kuljetus yhteensä:	24	0,01
A3 Energia yhteensä:	4	0,00

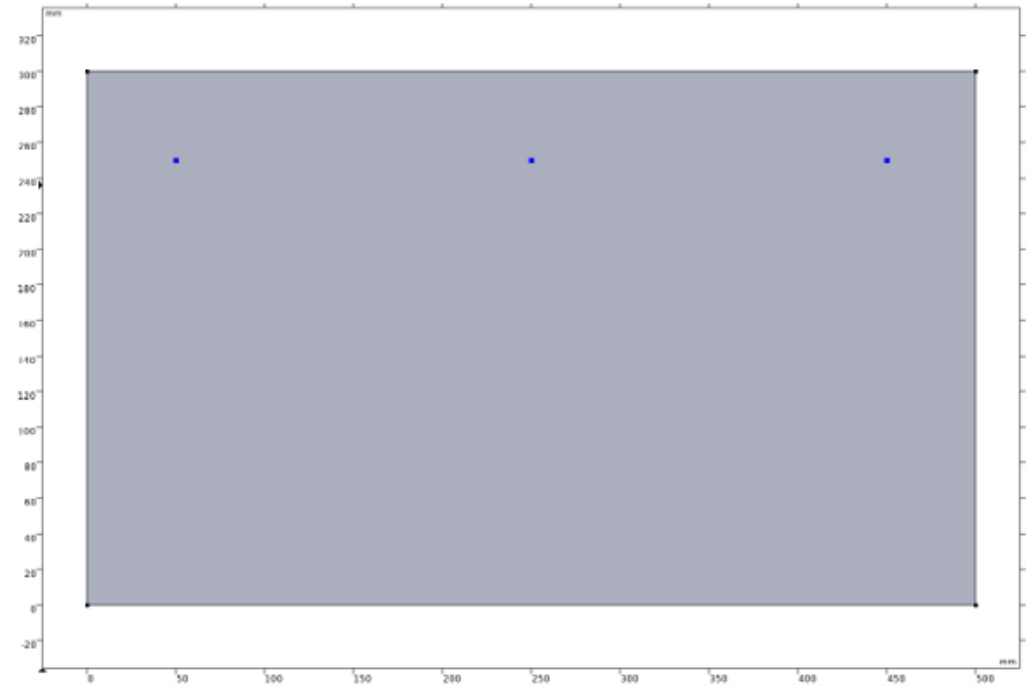
Finnsementti Oy:n betonin valmistus on kolmannen osapuolen varmentamaa.

Laskennan lähtötiedot perustuvat BY Vähähiilisyyslaskurin 17.4.2025 päivitettyihin arvoihin.

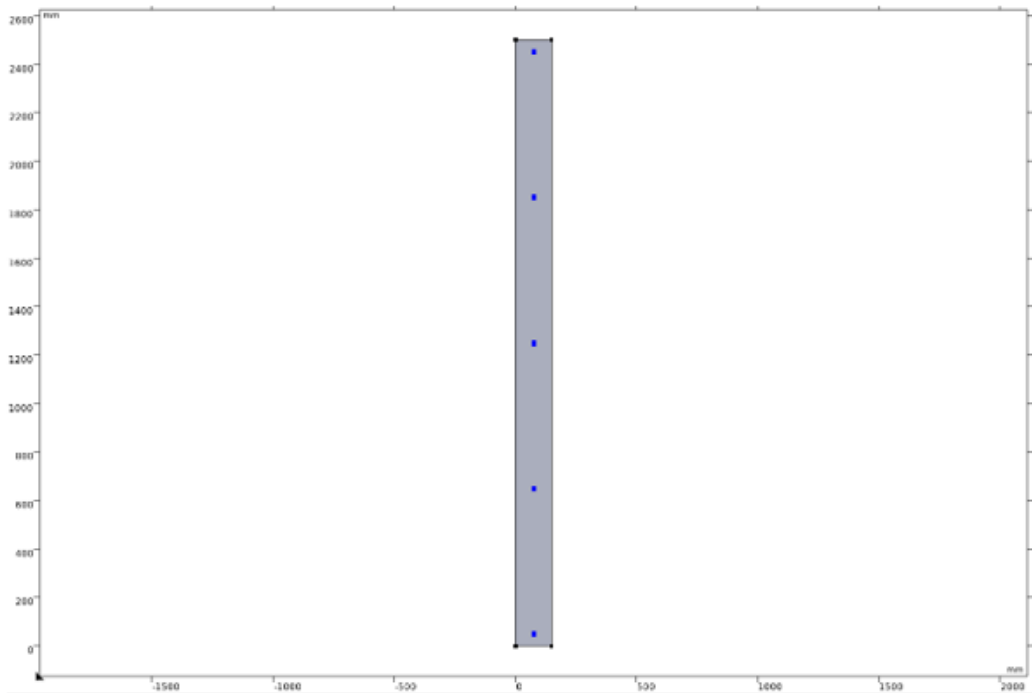
Laskija ymmärtää riittävästi betoniteknologiaa ja vakuuttaa tehneensä laskelman käyttäen oikeita lähtötietoja.

Mallinnetut rakenteet ja lämmityslankojen sijainti

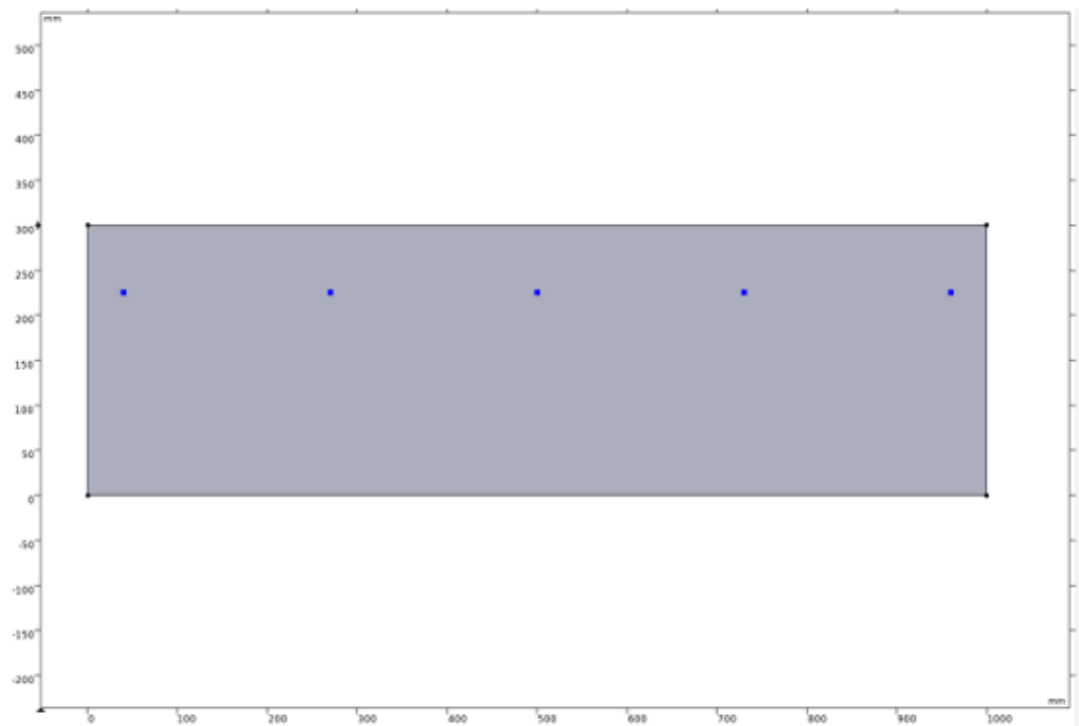
Antura 300 mm x 500 mm



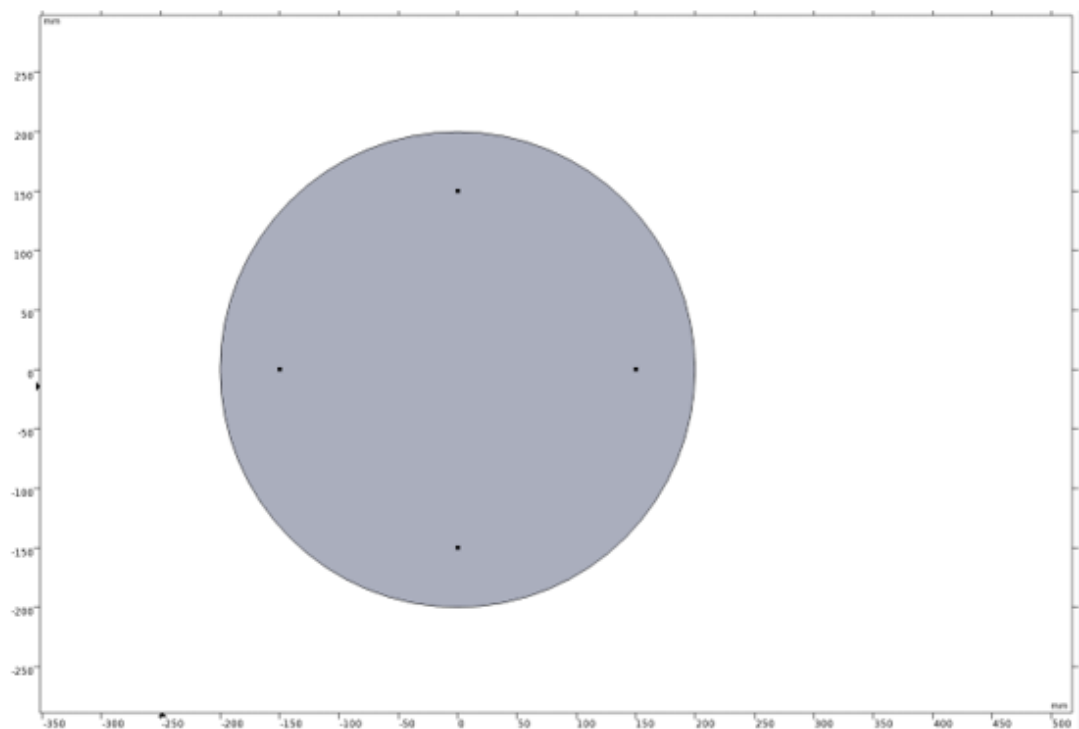
Seinä 150 mm x 2500 mm



Laatta 300 mm x 1000 mm



Pilari ø 400 mm



Kyselytutkimuksen kysymykset

2.5.2025 klo 7.49

Vähähiilinen betonirakentaminen

Vähähiilinen betonirakentaminen

* Pakollinen

1. Koetko että vähähiilisen betonin käytöstä on riittävästi tietoa saatavilla? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Ei saatavilla

Hyvin saatavilla

2. Onko vähähiilisen betonin hyödyntäminen rakennustyömailla hankalaa? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Erittäin hankalaa

Ei ollenkaan hankalaa

3. Hyödynnetäänkö vähähiilisen betonin potentiaalia kuinka hyvin? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Ei hyödynnetä ollenkaan.

Hyödynnetään erinomaisesti

4. Kuinka todennäköisesti koet että uusissa projekteissa hyödynnetään vähähiilistä betonia? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

En lainkaan todennäköisesti

Erittäin todennäköisesti

5. Ajatteletko vähähiilisen betonin soveltuvan kaikkiin rakenteisiin? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Ei sovellu

Soveltuu hyvin

6. Minkälaisissa rakenteissa hyödyntäisit vähähiilistä betonia? *

7. Kannattaako vähähiilistä betonia hyödyntää kaikissa rakenteissa? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Ei kannata

Kannattaa hyödyntää

2.5.2025 klo 7.49

Vähähilinen betonirakentaminen

8. Ajatteletko vähähilisen betonin saatavuuden olevan ongelmana betonin hyödyntämisessä? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Ei ole ongelma

On ongelma

9. Koetko vähähilisen betonin olevan herkempi olosuhteiden muutokselle kuin tavallisen betonin? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Selkeästi herkempi

Ei ole herkempi

10. Kuinka todennäköisesti vähähilisen betonin käyttäminen asettaa liian suuria aikatauluhaasteita rakennustyömaille? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

En lainkaan todennäköisesti

Erittäin todennäköisesti

11. Kuinka todennäköisesti vähähilisen betonin hyödyntäminen vaikuttaa projektin keston pidentävasti? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

En lainkaan todennäköisesti

Erittäin todennäköisesti

12. Koetko vähähilisen betonin käyttämisen rakennusprojekteissa hankalaksi? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Erittäin hankalaa

Ei ollenkaan hankalaa

13. Ajatteletko että lainsäädännöllä edistetään vähähilisen betonin hyödyntämistä tällä hetkellä? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Ei edistetä

Edistetään hyvin

14. Mitä toimenpiteitä vähähilisen betonin käytön lisääminen edellyttäisi? *

15. Kuinka todennäköisesti vähähilinen betoni on tulevaisuudessa eniten hyödynnetty betonilaatu? *

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

En lainkaan todennäköisesti

Erittäin todennäköisesti

https://forms.office.com/Pages/DesignPageV2.aspx?origin=NeoPortalPage&subpage=design&id=1THOw_Nh406lc8V9brp9XUyUw5LNvdAsUh... 2/3

Kyselytutkimuksen tulokset

Kysymys 1: Koetko että vähähiilisen betonin käytöstä on riittävästi tietoa saatavilla?	Kysymys 2: Onko vähähiilisen betonin hyödyntäminen rakennustyömailla hankalaa?	Kysymys 3: Hyödynnetäänkö vähähiilisen betonin potentiaalia kuinka hyvin?	Kysymys 4: Kuinka todennäköisesti koet että uusissa projekteissa hyödynnetään vähähiilistä betonia?	Kysymys 5: Ajatteletko vähähiilisen betonin soveltuvan kaikkiin rakenteisiin?
5	3	0	4	7
5	7	3	4	5
7	8	4	3	3
8	7	5	2	3
10	10	3	10	10
8	8	5	5	5
7	7	6	8	4
Vastausten ka.	Vastausten ka.	Vastausten ka.	Vastausten ka.	Vastausten ka.
7,1	7,1	3,7	5,1	5,3

Kysymys 6: Minkälaisissa rakenteissa hyödyntäisit vähähiilistä betonia?

Kaikki sisärakenteet, ei suola-pakkasrasitetut rakenteet, VH-aste olosuhteista ja rakenteen koosta riippuen

Eteenkin massiivisissa rakenteissa joissa voidaan hyödyntää massan omaa lämmöntuottoa ja näissä hiilipäästöistä suurin hyöty. Esimerkiksi juotosbetonit menevät erittäin hitaiksi jos niissä pyritään pääsemään GWP-luokitukseen ja näin ovat eteenkin viileään aikaan hyvin hankalasti käytettävissä.

Perustuksissa ja massiivisissa rakenteissa, GWP.85 ei juurikaan rajoituksia.

Perustukset, massiivirakenteet, elementit
Sopivissa
Perustukset ja massiivirakenteet
massiivisissa, rasitusluokiltaan helpoissa, rakenteissa joissa ei ole nopeaa muottienpurku vaatimusta

Kysymys 7: Kannattaako vähähiillistä betonia hyödyntää kaikissa rakenteissa?	Kysymys 8: Ajatteletko vähähiillisen betonin saatavuuden olevan ongelmana betonin hyödyntämisessä ?	Kysymys 9: Koetko vähähiillisen betonin olevan herkempi olosuhteide n muutokselle kuin tavallisen betonin?	Kysymys 10: Kuinka todennäköisesti vähähiillisen betonin käyttäminen asettaa liian suuria aikatauluhaasteita rakennustyömaille ?
8	2	1	6
1	4	3	3
3	2	2	7
8	2	10	7
3	0	4	1
1	1	1	9
3	3	4	6
Vastausten ka.	Vastausten ka.	Vastausten ka.	Vastausten ka.
3,9	2,0	3,6	5,6

Kysymys 11: Kuinka todennäköisesti vähähiilisen betonin hyödyntäminen vaikuttaa projektin kestoon pidentävästi ?	Kysymys 12: Koetko vähähiilisen betonin käyttämisen rakennusprojekteissa hankalaksi?	Kysymys 13: Ajatteletko että lainsäädännöllä edistetään vähähiilisen betonin hyödyntämistä tällä hetkellä?
5	8	1
3	7	3
6	6	0
7	3	8
0	5	3
5	9	3
5	7	9
Vastausten ka.	Vastausten ka.	Vastausten ka.
4,4	6,4	3,9

Kysymys 14: Mitä toimenpiteitä vähähiilisen betonin käytön lisääminen edellyttäisi?
<p>1. Urakoitsijoilta halua muutokseen ja sopeutumista uuteen. Tällä hetkellä työmaat eivät vaivaudu miettimään asioita uudella tavalla.</p> <p>2. Tiukempi lainsäädäntö joka ohjaisi tilaajaorganisaatioita vähähiilisempään suuntaan.</p>
<p>Lämpötilan ja lujuudenkehitykseen tulee kiinnittää enemmän huomiota etenkin vaativammassa GWP-luokissa. Oletettavasti monissa tapauksissa päästään kohtuun keveillä toimenpiteillä kuten routamattopeittelyllä riittäviin lujuudenkehitysominaisuuksiin, mutta nämä tulisi etukäteen mallintaa ja löytää rutiinit työmaan toimintaan.</p>

Tilajavaatimuksia. Informaation jakoa. Lujuudenkehityksen hallinnan kehittämistä (lämmitys).
Lisää käytännön kokemuksia
Vaatimukset rakentamisen vähähiilisydelle voisivat olla tiukempia.
Koulutusta työmaille. Tuotekehitystä viileiden olosuhteiden hallintaan
Tarvitaan lisää kokemusta ja myös tietoa ensikertaa vähähiilistä betonia käyttäville

Kysymys 15: Kuinka todennäköisesti vähähiilinen betoni on tulevaisuudessa eniten hyödynnetty betonilaatu?
5
8
8
10
10
9
9
Vastausten ka.
8,4

Betometri -mallinnusohjelman esimerkki raportti

Lämmön- ja lujuudenkehityslaskelma | Antura

FINNSEMENTTI
LÄMPÖMALLIT

Ympäristö

Tuulen nopeus	3	m/s
Lämpötila	15	°C

Pohja

Pohja	Sepelli	
Pohjan lämpötila	15	°C

Muotti

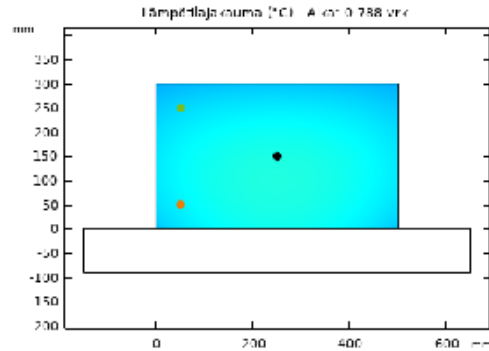
Muotin purkuajankohta	7	Vrk
-----------------------	---	-----

Suojaus

Routamatto	-	Vrk
Suojamuovi	-	Vrk

Resepti

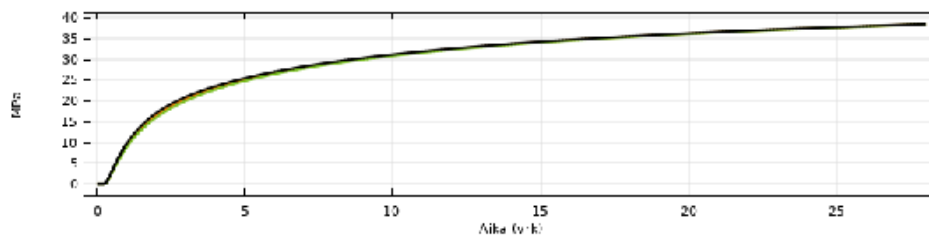
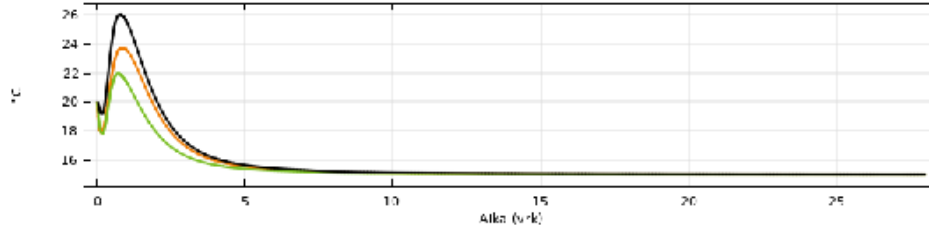
Sementti	Olva	300	kg/m ³
Sementti	-	-	kg/m ³
Masuunikuonajauhe	-	-	kg/m ³
Sillkajauhe	-	-	kg/m ³
Tehollinen vesimäärä	180	kg/m ³	
Iimimäärä	2	%	
Betoin alkulämpötila	20	°C	



Laskenta

Rakenteen korkein lämpötila: 26 °C
Rakenteen korkein lujuus: 38 MPa

Kommentit



Oheisena olevat tulokset perustuvat laboratorio ja kenttäkokeiden avulla määritettyihin sementin lämmönluodon, kypsyyssasteen ja lujuudenkehityksen välisiin riippuvuuksiin. Tuloksien vaikuttavat voimakkaasti ulkoilman lämpötila, tuulen nopeus ja suojaus tai erityksen huolellisuus ja oikea-aikaisuus. Tämän johdosta näillä laskeilla ei voi korvata työnaikaisista lujuuden seuranta, joka on suoritettava Betoninormien mukaisesti esim. olosuhtekokeilla tai rakenteen lämpömittausten avulla. Laskelmassa esitetty lujuus on arvio betonirakenteen lujuudesta, ei betonin standardilujuus.

14.03.2025,

Betometri