



Kasper Oinonen

## Vähähiilisen betonin lämmön- ja lujuudenkehityksen seuranta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

25.1.2023

## Tiivistelmä

Tekijä:	Kasper Oinonen
Otsikko:	Vähähiilisen betonin lämmön- ja lujuudenkehityksen seuranta
Sivumäärä:	37 sivua
Aika:	25.1.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine:	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Ohjaajat:	Yliopettaja Kai Laitinen Kehityspäällikkö Tuomo Kovanen

---

Opinnäytetyössä tutkittiin vähäpäästöisemmän betonin lämmön- ja lujuudenkehitystä eri olosuhteissa. Työssä käytiin läpi betonin ominaisuuksia sekä rakennusalan ja sementin ympäristövaikutuksia.

Työ jaetaan kahteen osioon; kirjalliseen ja kokeelliseen osioon. Kirjallinen osio paneutuu enemmän betonin valmistukseen, sen osa-aineisiin ja sementinvalmistukseen.

Kokeellinen osio selvittää kahden eri säilytysolosuhteen betonisen seinärakenteiden lujuuden- ja lämmönkehitystä valun eri vaiheissa.

Työssä huomattiin, kuinka Lujabetonin vähähiilinen betoni sopii oikeissa olosuhteissa ja oikealla lämmityksellä myös talvibetonointiin

Avainsanat: vähähiilinen betoni, talvibetonointi, lujuudenkehitys

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## **Abstract**

Author: Kasper Oinonen  
Title: Monitoring the Heat and Strength Development of Low-Carbon Concrete  
Number of Pages: 37 pages  
Date: 1 March 2023  
Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Materials Technology and Surface Engineering  
Professional Major: Minna Paananen-Porkka  
Supervisors: Senior Teacher Kai Laitinen, Development manager Tuomo Kovanen

---

The Purpose of this thesis was, to research heat and strength development of low-emission concrete under different conditions. In addition, the properties of concrete and the environmental effects of the construction industry and cement manufacturing were analysed.

The thesis is divided into two part is a literature review that focuses more on concrete production, concrete's components and cement production.

The experimental section examines the strength and heat development of concrete in wall structures under two different storage conditions in different stages of concrete casting.

Result of the thesis suggest that Lujabetoni's low-carbon concrete is also suitable for winter concreting under the right conditions with the right heating.

Keywords: low carbon concrete, winter concreting, strength development

## Sisällysluettelo

1	Johdanto	<b>Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.</b>
2	Betoni	2
2.1	Kiviaines	2
2.2	Sideaineet	3
2.3	Lisäaineet	6
2.4	Muut aineet	9
2.5	Betonin rasitusluokat	10
2.6	Betonin lujuudenkehitys	11
3	Betonin ilmastovaikutukset	16
3.1	Sementin valmistus ja päästöt	18
3.2	Vähäpäästöinen betoni	20
4	Lämmön ja lujuuden seuranta	21
4.1	Koebetoni ja koekappaleiden valmistus	22
4.2	Lämpötilan mittaus	23
4.3	Koekappaleiden betonointi	24
4.4	Lujuudenkehityksen seuranta	25
5	Tulokset ja niiden analysointi	26
5.1	Lämmönseuranta	27
5.2	Lujuudenkehitys	28
6	Johtopäätökset	30
7	Lähteet	31

## 1. Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Lujabetoni Oy. Lujabetoni kuuluu Suomen johtaviin betoniyrityksiin ja se tarjoaa niin valmisbetonia, elementtejä kuin betonituotteitakin. Sen pääasiakasryhmiin kuuluvat rakennusliikkeet, rakennuttajat ja erikoisasentajat, jotka toimivat infra- ja rakennusalalla. Näille Lujabetoni tarjoaa tuotteitaan yhteensä 31 tehtaalta ympäri Suomen ja osasta Ruotsia.

Ilmastonmuutosta vastaan taistelu ja luonnon monimuotoisuuden säilyttäminen ovat viime aikoina nousseet tärkeään rooliin rakennusalalla. Sementinvalmistuksen päästöt ja niiden vähentäminen ovat osa tätä keskustelua. Lujabetoni on lähtenyt ilmastotalkoisiin mukaan omalla Luja-vähähiilisellä betonillaan. Lujabetoni tarjoaa vähintään GWP.85-päästoluokan betonia miltei jokaisella betonilaudalla ja osassa päästään jo GWP.40 luokkaan. Yrityksen tarkoituksenaan on kompensoida loput jäljelle jäävästä CO<sub>2</sub>-jalanjäljestä Gold Standard sertifioiduissa ja valvotuissa projekteissa. Niissä joko lisätään hiilinieluja tai ne vähentävät tarvittavan määrän päästöjä. [1.] Lujabetoni sai myös Suomen ensimmäisen betonitehtaan, jolle Kiwa Inspecta sertifiointi myönsi Vähähiilisen betonin valmistuksen sertifikaatin Helsingin tehtaalla vuonna 2022. [2.] Vuoden 2023 keväästä lähtien samainen sertifikaatti löytyy myös Espoon, Nokian, Tampereen ja Oulun valmisbetonitehtailta. [3.]

Betonirakenteita valmistettaessa on usein tarpeen arvioida betonin lujuuden kehitystä. Puristuslujuus on betonin tärkein ominaisuus ja sen kehitystä on tärkeää voida arvioida. Betonivalun alkaessa lämmönseuranta on yleinen tapa saada arvio betonin lujuudesta kullakin hetkellä, kunhan tunnetaan betonimassan ominaisuudet. Tässä työssä vertaillaan vähähiilisestä betonista valmistetun kahden eri seinämuotin lujuuden- ja lämmönkehitystä säilytysominaisuuksien perusteella. Työssä käytetään hyväksi lämmönseurantaa mittaavaa

etäluettavaa loggeri-mittauslaitteistoa ja betonin puristuslujuuden mittauksia koekappalein.

## 2. Betoni

Betoni on laajakäyttöinen rakennusaine, joka soveltuu lähes kaikenlaiseen rakentamiseen. Sen lujuus, kestävyys ja monipuolisuus mahdollistavat lähes kaikenlaisten muotojen rakentamisen. Betonin tärkeimmät raaka-aineet ovat sideaine eli sementti, sora eli kiviaines sekä vesi, joiden keskinäisillä suhteuksilla on suuri merkitys. Pääaineiden lisäksi betonin lujuudenkehitykseen, valettavuuteen ja haluttuun lopputulokseen voidaan vaikuttaa erilaisilla lisäaineilla ja seosaineilla. [4.] Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja sitä käytetään vuosittain noin 13 miljardia kuutiometriä. Suomessa käyttö on noin 5 miljoonaa kuutiota vuodessa. Betonia voidaan hyödyntää suuriin ja pieniin rakennelmiin, sekä infrapuolella siitä voidaan valmistaa teitä, siltoja, patoja ja voimalaitoksia. Sen käyttömahdollisuudet ovat siis lähes rajattomat. [5.]

### 2.1 Kiviaines

Betonissa käytettävän kiviaineksen tulee täyttää SFS-EN 12620: vaatimukset sekä sen tulee olla CE-merkittyä. Mikäli betonin valmistaja käyttää omaa kiviainesta, sen on valvottava tuotteen laatua laadunvalvonnallisesti standardin mukaisesti. Kiviaineksen tiheys on noin  $2\,650\text{ kg/m}^3$  ja tilavuusosuus betonissa vaihtelee 65–80 % välillä, jolloin kiviaineksen laadulla on ratkaiseva rooli betonin fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Erityisesti taloudellisesti ja ilmastonkin kannalta on edullista käyttää mahdollisimman paljon kiviainesta betonissa, jotta saadaan vähennettyä sementin kulutusta. Hyvälaatuinen kiviaines on kovaa ja hienojakoista, millä on vaikutusta sen kestävyteen ja säilyvyyteen. Tällöin työstettävyys ja koossapysyvyys säilyy sekä side- ja seosaineiden määrä pienenee. Kiviaines luokitellaan huonolaatuiseksi, mikäli se sisältää runsaasti rapautumistuotteita kuten hienojakoista kiillettä tai savea. Huonolaatuinen kiviaines lisää vedenkäytön määrää ja täten kasvattaa sementin käytön tarvetta. Rakeisuus on usein runkoaineen tärkein ominaisuus, mitä betonin valmistaja

tarvitsee. Sillä tarkoitetaan kiviainesten sisältämien erisuuruisten rakeiden määrien painosuhteita. Rakeisuus määritetään seulomalla kiviaines eli jakamalla näyte eri raekokoluokkiin, joista selviää raekokojen määrät massaprosenteina. Rakeisuutta voidaan arvioida rakeisuusluvun eli H-luvun avulla. Mitä suurempi arvo on, sitä pienempirakeisempaa kiviaines on. H-luvulla voidaan muodostaa tyyppikäyrän, joka ilmoittaa graafisesti kiviaineksen läpäisyarvon seuloilta. Hienoaines betonissa vaikuttaa betonin vesitiiveyteen, jolloin rakeisuusluvun ollessa matala sen osuutta on syytä lisätä. Vaikka rakeisuuskäyrä täyttäisi tietyt vaatimukset, mutta betoni on silti erottuvaa tai harvaa, syy voi olla kiviaineksen raemuodossa tai pinnan laadussa. Sileät ja pyöreänmuotoiset rakeet antavat parhaan muokattavuuden ja vaativat vähiten sementtiliimaa eli veden ja sementin muodostamaa seosta. Erittäin litteät ja karheat kiviainekset vaikeuttavat pumpattavuutta. Kiviainekseen vaikuttavia ominaisuuksia ovat myös kiintotiheys, kosteus ja vedenimeytyminen, pakkasenkestävyys sekä humuspitoisuus. Tärkein kiviaineksen ominaisuus on silti tasalaatuisuus. [6.]

## 2.2 Sideaineet

### Sementti

Sideaineiden tehtävä on liittää kiviainekset yhteiseksi kovaksi rakenteeksi. Vaikkei sementti ole määrältään suurin betonin raaka-aine, se on silti tärkein. Yleisesti kun puhutaan sementistä, tarkoitetaan portlandsementtiä, jonka kiintotiheys on noin  $3\,100\text{ kg/m}^3$  ja partikkelikoko  $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ . Se reagoi kemiallisesti ollessaan kosketuksissa veden kanssa muodostaen hydraatteja. Sementti siis ei "kuivu" vaan hydratoituu. Kun seosaineet muodostavat veden kanssa kemiallisia sidoksia, reaktiotuotteena tulee sementtikiveä, jota kutsutaan myös sementtiliimaksi, joka liittää yhteen betonin muut aineosat. Veden ja sementin seosta, joka ei ole vielä hydratoitunut, kutsutaan sementtipastaksi. Sementtistandardi SFS-EN 197-1 lajittelee sementit viiteen päälajiin. Ne poikkeavat toisistaan esimerkiksi kemiallisen ja mineralogisen koostumuksen perusteella:

- CEM I portlandsementti (korkeintaan 5 % seosaineita)
- CEM II portlandseossementti
- CEM III masuunikuonasementti (masuunikuonaa 36–80 %)
- CEM IV pozzolaaniseimentti
- CEM V peossementti.

Päälajit jaetaan edelleen käytetyn seosaineen ja seosainemäärien mukaan.

Portlandseossementit, joiden tunnus on CEM II A, sisältävät portlandklinkkeriä ja 6–20 % seosaineita portlandklinkkerien määrästä. Tunnus CEM II B sisältää portlandklinkkeriä sekä 21–35 % seosaineita. Sementin jauhatuksella on tärkeä vaikutus sementin ominaisuuksiin. Mitä hienommaksi sementti on jauhettu, sitä enemmän sillä on reaktiopinta-alaa. Reaktiopinta-alan kasvu lyhentää sitoutumisaikaa ja nopeuttaa sementin hydrataatiota, lujuuskasvua ja lämmöntuotantoa. Sementin hienojakoisuus vaikuttaa myös veden tarpeeseen. Hienompi sementti vaatii enemmän vettä tietyn notkeuden saavuttamiseksi. Myös valmiin betonin kutistumat ja taipumus halkeiluun lisääntyvät sementin ominaispinta-alan kasvaessa. [7.]

## Lentotuhka

Lentotuhka on kivihiilen poltossa voimalaitoksessa syntyvä pozzolaani, joka erotetaan savukaasuista. Sen kiintotiheys vaihtelee 2100–2500 kg/m<sup>3</sup> ja partikkelikoko 10–100 µm. Pozzolaanit reagoivat veden kanssa sementin hydrataatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatitigeeliä. Lentotuhka toimii betonissa sekä sideaineena että kiviaineksena. Sitä voidaan käyttää fillerinä eli hienon kiviaineksen korvikkeena, koska lentotuhka parantaa betonimassan työstettävyyttä ja koossapysyvyyttä. Lentotuhka hidastaa betonin varhaislujuutta, mutta parantaa myöhäisiän lujuutta. Lentotuhkan aktiivisuus on 0,40 useissa rasisluokissa verrattuna sementtiin. Tämä tarkoittaa sitä, että lisätystä lentotuhkasta vain 40 % voidaan laskea sementiksi ja



loput hienoksi kiviaineksi. Suurin sallittu lentotuhkan lisäys betoniin on 45 % pakkasrasitetuista rakenteissa ja 30 % eräissä kloridirasitukselle alttiissa rakenteissa portlandsementin määrästä. Lentotuhkan lisäys betoniin alentaa sen hydratiolämpöä, mikä helpottaa suurien rakenteiden valua, mutta hankaloittaa tai jopa estää talvibetonoinnin. [5, s. 56.]

### Masuunikuonajauhe

Masuunikuonaa muodostuu raakaraudan valmistuksen sivutuotteena, kun maasuunissa syntynyttä silikaattijauhetta jäähdytetään nopeasti. Masuunikuonajauhe on hienoksijauhettua granuloitua maasuunikuonaa. Sen hydratoitumisoiminaisuudet heräävät sementin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta, jolloin kuona kehittää lujuutta. Sen raekoko on noin sementin luokkaa ja kiintotiheys vaihtelee 2 900–3 100 kg/m<sup>3</sup>. Myös masuunikuona alentaa huomattavasti betonin hydrataatiolämpötilaa, minkä vuoksi sitä käytetään yleisesti massiivirakenteissa, mutta se myös nostaa myöhäisiän lujuuksia. Masuunikuonan aktiivisuus verrattuna sementtiin on joko 1,0 tai 0,8 rasisluokan mukaan. Sen väri on hieman vaaleampaa verrattuna sementtiin, joten se voi vaalentaa hieman betonia. Masuunikuonan vedentarve on varsin pieni, eli se notkistaa betonia. Masuunikuonalla on sulfaatinkestävyyttä parantava ominaisuus ja mikäli kuonajauheen osuus on yli 70 % sideaineesta, betoni luokitellaan sulfaatinkestäväksi. [8, s.57.]

### Silika

Ferropiin ja alkuaine piin valmistuksesta syntyvä savukaasuista erotettava silika on erittäin hienojakoinen pozzalaani. Sen raekoko on >1 µm, ja sen kiintotiheys on 2200 kg/m<sup>3</sup>. Silika lisää vedentarvetta, mutta lisää myös huomattavasti betonin lujuutta parantaen samalla kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä,

tiiviyttä ja vedenpitävyyttä. Silikaa käytetään varsinkin korkealujuusbetoneissa, vaikkakin se alentaa työstettävyyttä tekemällä betonista kittimäistä. Silikan aktiivisuus verrattuna sementtiin on 2,0, poikkeuksena on rasiusluokat XC2-XC4 ja XF-luokat, joissa se on 1,0 vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,45. [8, s.57–58.]

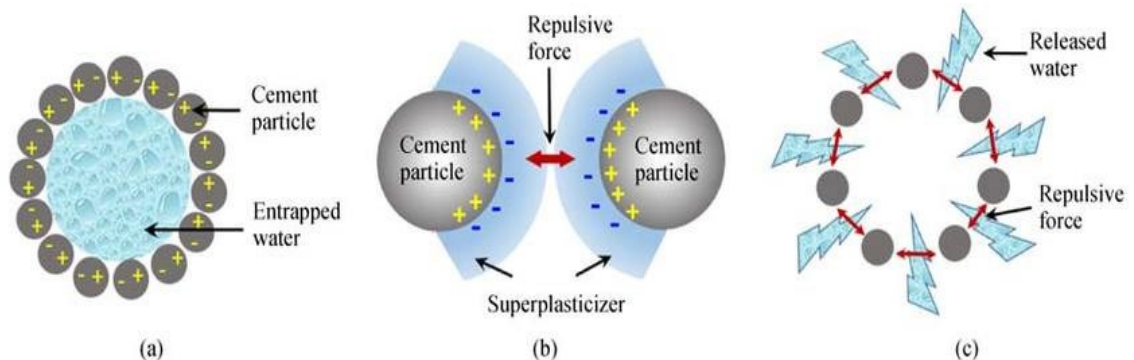
### 2.3Lisäaineet

Lisäaineilla voidaan vaikuttaa tuoreen tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Lisäksi niiden käytöllä pyritään parantamaan betonin teknisiä ominaisuuksia ja taloudellista kilpailukykyä vähentämällä sementin käytön tarvetta. Lisäaineet vaikuttavat betoniin joko kemiallisesti tai fyysisesti. Lisäaineiden tulee olla CE-merkittyjä, joiden avulla valmistaja vakuuttaa, että tuotteiden ominaisuudet ovat eurooppalaisen tuotestandardin tai eurooppalaisen teknisen hyväksynnän ETA:n mukaiset. Osa lisäaineista kuten paisuttimet, tiivistävät lisäaineet ja jälkihoitavat lisäaineet ei kuulu harmonisoidun lisäainestandardin. Uusien lisäaineiden käyttö tulee testata huolellisesti kokeellisesti mahdollisten yllätysten välttämiseksi esimerkiksi sitoutumisajassa. Lisäaineiden määrät betonissa ovat hyvin pieniä verrattuna muihin osa-ainesiin, ja niiden annostelumäärissä on käytettävä valmistajan suosituksia. Betonissa käytettäviä lisäaineita ovat esimerkiksi:

- sementin sitoutumisaikaan vaikuttavat notkistimet
- tehonotkistimet
- huokostimet
- sitoutumista tai kovettumista nopeuttavat kiihdyttimet
- sitoutumista hidastavat hidastimet
- vedenimeytymistä estävät lisäaineet
- viskositeetin säätöaineet. [8, s.60–61]

## Notkistavat lisäaineet

Notkistavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita, jotka parantavat betonin juoksevuuutta ilman lisäveden annostelua ja mahdollistavat korkealujuusbetonien valmistamisen. Notkistimet dispergoivat eli erottavat sementtipartikkelit toisistaan, ja kuvassa 1 näytetään tehonotkistimen toimintaperiaate. Notkistaminen vaikuttaa betonin työstettävyyteen, parantaa pumpattavuutta sekä koossapysyvyyttä. Notkistimet jaetaan niiden tehokkuuden perusteella notkistimiin tai tehonotkistimiin, jotka molemmat ovat yleensä polykarboksylaattipohjaisia. Sama lisäaine voi toimia sekä veden vähentäjänä että työstettävyyden parantajana, joita molempia betonin valmistaja yleensä tarvitsee. Notkistavien lisäaineiden toiminta riippuu niiden laadun lisäksi myös käytettävien sideaineiden määrästä ja laadusta, seosaineista, hienoainemäärästä, lämpötilasta ja sekoitustehosta. Notkistavien lisäaineiden annostelu vaihtelee tyypillisesti 0,3–1,0 % sideaineiden määrästä. [8, s. 62.]

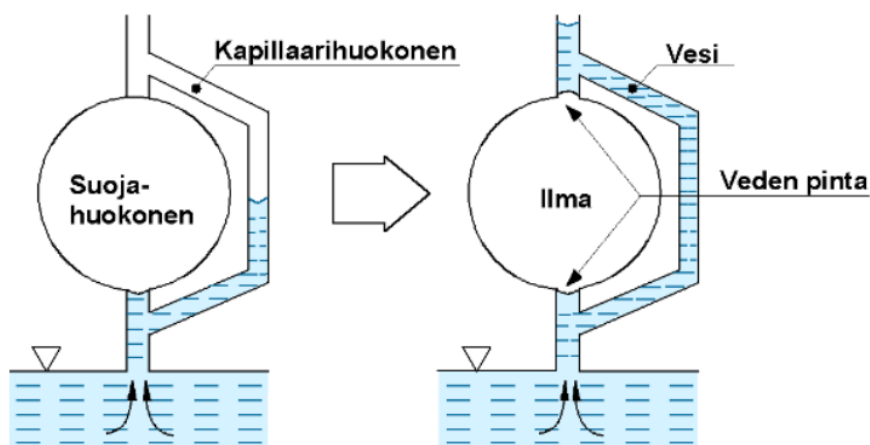


Kuva 1. Tehonotkistimen toimintaperiaate [9.]

## Huokostimet

Betonissa on normaalisti ilmaa 1–2 % eli 10–20 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, ja kun betonista halutaan pakkasenkestävää, sen ilmapitoisuutta tulee kasvattaa huokostamalla. Tällöin ilmapitoisuus kasvaa 4–8 %:iin huokostavan lisäaineen avulla. Huokostin stabiloi sekoituksen aikana syntyvät ilmakuplat tasaisesti betoniin. Huokostin ei synnytä lisää ilmaa vaan se vangitsee sekoituksessa tulevan ilman betoniin pienemmiksi ja kestäviksi ilmahuokosiksi. Riittävä betonin sekoittaminen takaa

oikean ilmamäärän betonissa. Annostelu on vain 0,01–0,03 % sideaineen määrästä, joten huokostinta on jatkettava vedellä sen sekoittuvuuden ja oikean annostelun takaamiseksi. Betonin huokostaminen lisää myös betonin muokattavuutta, notkeutta ja koossapysyvyyttä. Huokostavat lisäaineet ovat pinta-aktiivisia aineita ja niiden tulisi muodostaa kooltaan sopivia, noin ominaispinta-alaltaan  $25 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$  olevia kuplia, joiden välimatka toisistaan on riittävän lyhyt eli  $\leq 0,23 \text{ mm}$ , jotta ne toimisivat mahdollisimman tehokkaasti ja betoni kestäisi pakkasrasitusta. Suomessa lähes kaikki rakenteet altistuvat toistuvalla jäätymisellä ja sulamisella, ja siksi onkin tärkeää tehdä huokostamisella betonista pakkasenkestävää. Märässä betonissa oleva vesi laajenee jäätyessään 9 %, ja mikäli betoni ei ole huokoistettu, jäänyt vesi aiheuttaa mikrohalkeilua syntyneen paineen vuoksi. Huokostimen avulla betoniin syntyy ilmakuplia eli suojahuokosia, jotka antavat jäätyvälle vedelle tilaa laajeta. Suojahuokokset pysyvät ilmatäytteisinä veden imeytyessä kapillaarihuokosiin, koska veden pintajännitys estää, ettei vesi pääse suojahuokosiin (kuva 2). [8, s.63–64.]



Kuva 2. Suojahuokosen toimintaperiaate [8, s.118]

## 2.4 Muut aineet

### Vesi

Jos vesi näyttää puhtaalta eikä haise tai maistu pahalta, se luokitellaan yleisesti soveltuvaksi betonin valmistamiseen. Vesijohtovesi ja juomakelpoinen luonnonvesi soveltuvat lähes aina betonin valmistukseen. Talteen otettu vesi betoniteollisuuden prosessista voidaan ottaa käyttöön, mikäli soveltuvuus on ensin varmistettu. Teollisuuden jätevedet ja luonnon pintavedet eivät sovellu betonin valmistukseen ilman tarkempaa tutkimusta. Betonin valmistuksessa käytettävälle vedelle on asetettu kloridipitoisuus, mikä vaihtelee rakenteesta riippuen 500–4500 mg/l. [8 s. 59.]

### Väripigmentit

Betonin värjäykseen käytetään jauhemaisia väripigmenttejä, joissa on esimerkiksi punaisen, mustan, ruskean ja keltaisen eri sävyjä saatavilla. Nämä ovat pääosin synteettisiä rautaoksideja, jotka kestävät betonin emäksisyyden. Erikoisväreinä sininen, vihreä ja valkoinen puolestaan eivät ole rautaoksidipohjaisia. Valkoisella titaanioksidilla saadaan harmaasta betonista vaaleampaa. Vielä valkoisempi tulos saadaan, kun käytetään valkosementtiä ja valkoista kiviainesta. Värjätyt betonin väri voi silti muuttua iän myötä, mikä johtuu betonin sisältämän kalkin kulkeutumisesta pintaan. Väripigmentit ovat erittäin hienojakoisia pulvereita, ja sekoittaessa ne betonin sekaan tulee massa sekoittaa erityisen huolellisesti. [8, s.65–66.]

### Kuidut

Betonilla on hyvä puristuslujuus, mutta huono vetolujuus, minkä vuoksi sen joukkoon lisätään kuituja. Kuidut lisäävät myös betonin murtovenymää ja dynaamisten kuormien kestävyyttä. Betonissa käytettäviä kuituja on kahdenlaisia: teräskuituja ja muovikuituja. Teräskuitujen yleinen käyttöaihe on korvata

perinteistä raudoitusta esimerkiksi ruiskutusbetoneissa ja maanvaraisissa laatoissa. Teräskuitujen pituus vaihtelee 15–60 mm ja halkaisija 0,4–1,0 mm käyttökohteen mukaan. Vetolujuus vaihtelee 900–1800 Mn/m<sup>2</sup>. Tyypillinen teräskuitumäärä lattiabetoneille on 25–45 kg/m<sup>3</sup> ja ruiskubetoneissa, joissa käytetään lyhyempää kuitua, annostus on 50–80 kg/m<sup>3</sup>. Muovikuidut ovat polymeeripohjaisia kuituja, jotka jaetaan kahteen luokkaan muodon, valmistustavan ja koon puolesta. Mikrokuidut ovat kooltaan hyvin pieniä ja niiden pituus on 5–30 mm, halkaisija 10–30µm ja vetolujuus 300 MN/m<sup>2</sup>. Mikrokuituja käytetään tuoreen betonin ominaisuuksien parantamiseksi ja kovettuneen betonin lohkeilun vähentämiseksi palotilanteissa. Makrokuitujen paksuus vaihtelee 0,5–1,0 mm ja pituus 40–60 mm välillä. Makropolymeerikuitujen vetolujuus on 350–750 MN/m<sup>2</sup>, ja ne säilyttävät ominaisuutensa myös alkalisessa ja happamassa ympäristössä. Makrokuituja käytetään teräskuitujen tavoin parantamaan halkeilun jälkeistä jäännösvetolujuutta. [8, s. 66–67.]

## 2.5 Betonin rasitusluokat

Betonin säilyvyysuunnittelua varten sille määritetään suunnittelukäyttöikä, joka on 50 tai 100 vuotta. Tämä takaa 95 %:n varmuuden siihen, että suunniteltu betonirakenne kestää vähintään kyseisen ajanjakson, kunhan se asianmukaisesti huolletaan. Puolet 50 ikävuoden suunnitteluiän betoneista kestää lähes 150 vuotta ja pitkäaikaisimmat lähes 300 vuotta. Käyttöikäsuunnittelussa valitsemalla pidempi käyttöikä vähennetään vaurioiden todennäköisyyksiä [8, s. 41.] Betonille määritellään rasitusluokat vallitsevien ympäristöolosuhteiden mukaisesti. Tyypillisimmät rasitusluokkayhdistelmät ja niiden selitteet esitetään kuvassa 3. Suunnittelija valitsee rakenteen rasitusluokan seuraavien rasitustekijöiden suhteen:

1. karbonatisoitumisen aiheuttamat korroosioluokat XC1-XC4
2. kloridien aiheuttamat korroosioluokat XD1-XD3
3. merivedessä olevien kloridien aiheuttamat korroosioluokat XS1-XS3
4. jäätymis-sulamis-rasitusluokat XF1-XF4
5. kemialliset rasitusluokat XA1-XA3 [10, s. 42.]

Rasitusluokka-yhdistelmä	Selite
X0	Raudoittamattomat rakenteen kuivissa sisätiloissa
XC1	Raudoitetut rakenteet kuivissa sisätiloissa
XC2	Maanalaiset rakenteet, rakenne pysyy erittäin kosteana
XC3	Sateelta suojattu ulkorakenne, ei pakkasrasitusta (kosteuspitoisuus alhainen)
XC3; XF1	Sateelta suojattu pystyrakenne, pakkasrasitus
XC3,4; XF1	Osittain sateelta suojattu pystyrakenne, pakkasrasitus
XC3,4, XF3	Sateelta osittain tai kokonaan suojaamaton vaakarakenne, pakkasrasitus
XC4, XF3	Sateelle altis suojaamaton vaakarakenne, pakkasrasitus
XC3; XD1	Kloridirasitetut rakenteet sisätiloissa
XC3; XF2; XD1	Sateelta suojattu, sateelta suojaamaton tai osittain sateelta suojattu rakenne, kloridirasitus ja lievä pakkas-suolarasitus. XD-luokka on vaativampi kuin XC-luokka ja siten XC-luokalla ei ole merkitystä
XC4; XF2; XD1	
XC3,4; XF2; XD1	
XC3; XF4; XD2	Sateelta suojattu, sateelta suojaamaton tai osittain sateelta suojattu rakenne, kloridirasitus ja ankara pakkas-suolarasitus. XD-luokka on vaativampi kuin XC-luokka ja siten XC-luokalla ei ole käytännössä merkitystä
XC4; XF4; XD2	
XC3,4; XF4; XD2	
XC2; XS2	Merivedenalainen rakenne
XC3,4; XF4; XS3	Merenrannalla, roiskevyöhykkeessä oleva rakenne

Kuva 3. Tyypillisimmät rasitusluokkayhdistelmät ja niiden selitykset [10, s.67]

## 2.6 Betonin lujuuden kehitys

### Betonin puristuslujuus

Puristuslujuus on betonin tärkein ominaisuus. Betonit jaotellaan puristuslujuuden perusteella eri luokkiin. Betonin puristuslujuuden arviointi-ikä on 28 vrk ja se testataan standardin SFS-EN 13791 mukaan, jossa puristetaan joko 150 mm halkaisijaltaan olevia kuutioita tai 150 mm halkaisijalta ja 300 mm pituudelta olevia lieriöitä. Koekappaleen muoto vaikuttaa betonin puristuslujuuteen. Mitä pienempi on korkeuden ja leveyden suhde, sitä parempi arvo saadaan

puristuskokeessa. Näin ollen kuutiokappaleeseen nähden lieriökappale saa vain 0,78–0,8- kertaista lujuuden riippuen lujuusluokasta. Sen vuoksi lujuusluokat esitetään merkinnällä C  $f_{ck,cyl} / f_{ck,cube}$ . Ensimmäinen on lieriön puristuslujuus ja toinen on kuution puristuslujuus. Rakenteissa saavutettava puristuslujuus ei myöskään ole yksiselitteinen johtuen kuormitusalueen mittasuhteista ja toteutuksen laadusta. Rakenteissa betonin lujuusluokka määräytyy valitun lujuusluokan perusteella. Seuraavassa kuvassa 4. esitetään tarkemmin puristuslujuuden riippuvuus eri koekappaleilla. [8, s. 85–86.]

Lujuusluokka mukaan	Alin 150x300 lieriöillä määrätty ominaislujuus (C) $f_{ck,cyl}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Alin 150 mm:n kuutiolla määrätty ominaislujuus (K) $f_{ck,cube}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105

Kuva 4. Betonin puristuslujuudet kappaleen muodon perusteella. [10, s. 28]

### Betonin lujuuden kehitys

Kun tuoreessa betonissa vesi ja sementti alkavat reagoimaan keskenään, sementtihiukkaset alkavat muodostamaan sauvamaisia ja levymäisiä kiteitä. Kiteet muodostavat hydrataatioreaktiossa sementtigeeliä. Sementin ja veden välisen reaktion alkamista kutsutaan massan sitoutumiseksi, jolloin seos muuttuu

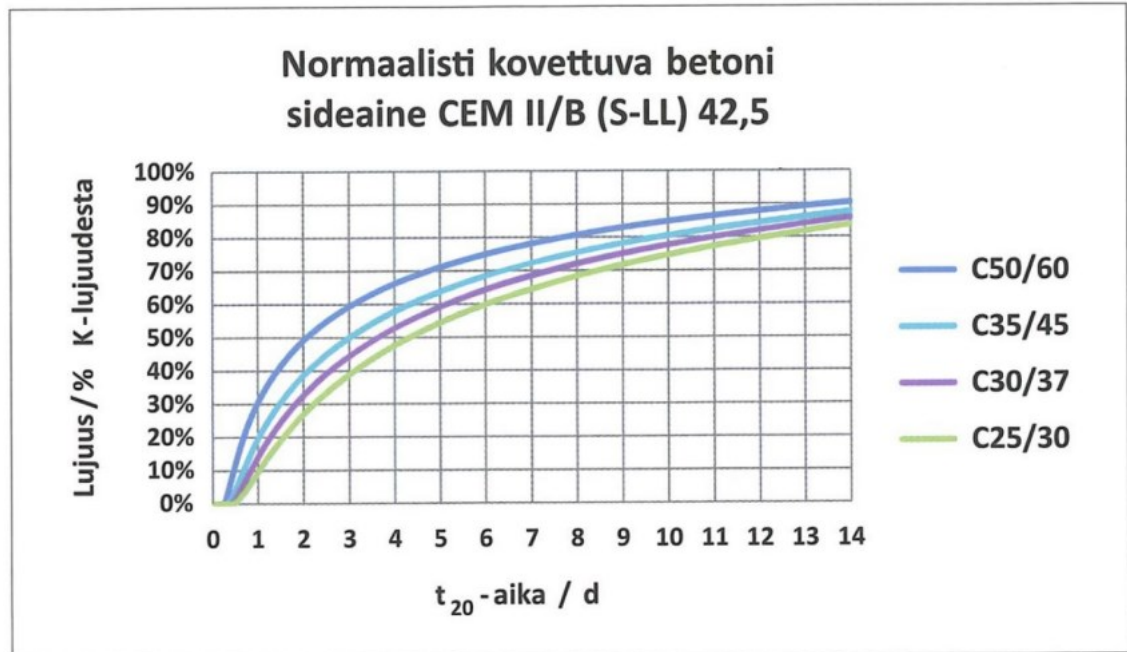


hyttelömäiseksi. [7, s. 24, 35–36]. Kun sitoutumien päättyy, alkaa varsinainen betonin lujuuden kehittyminen ja betonimassan kovettuminen. Lujuudenkehitysvaihe alkaa sitoutumisen jälkeen ja kestää käytännössä niin pitkään kuin betonissa on jäljellä hydratoitumiseen osallistumiskykyistä vettä. Vesi-sementti-suhde on betonin tehollisen vesimäärän (V) ja sementin (S) määrän suhde (V/S), josta sementin lujuusreaktiot ovat voimakkaasti riippuvaisia. Suurimmat betonin lujuudet saavutetaan pienillä vesi-sementtisuhteilla. Saatavilla oleva vesimäärä määrittelee sementtiliiman hydrataatioasteen ( $\alpha$ ). Sementti sitoo noin 25 % sementin painosta itseensä hydratoituessaan. Sen lisäksi vettä sitoutuu 20 % sementin painosta fysikaalisesti geelihuokosiin, joten täydellinen hydrataation vaatima vesimäärä on noin 40–45 %. Yleisesti vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,40 sementtipartikkelien sisään jää hydratoitumatonta sementtiä. Tämä puolestaan reagoi vapaan veden kanssa esimerkiksi betonirakenteen halkeilun seurauksena, jolloin rakenne korjaa itse itseään. Betonin lujuuden kehitysnopeus on riippuvainen sementtityypistä, mahdollisista seosaineista, jälkihoidosta, olosuhteista ja betonin lämpötilasta [8, s 37] Betonin lujuudenkehitystä voidaan arvioida laskennallisesti mitattujen lämpötilojen avulla. Yleinen tapa on laskea nuoren betonin kypsyysikä  $t_{20}$ . Tätä lukua vertaamalla käytetylle betonille laadittuun lujuudenkehityskäyrään voidaan arvioida betonin lujuus kuten kuvassa 5. Siinä nähdään eri betonilujuusluokkien lujuudenkehitystä kypsyysiän funktiona. [11.] Kypsyysikä lasketaan käyttäen Sadgroven kaavaa:

$$t_{20} = \left( \frac{T + 16 \text{ °C}}{36 \text{ °C}} \right)^2 \times t$$

jossa T on betonin lämpötila aikana t [°C]

t on kovettumisaika [d]. [8.s 92]

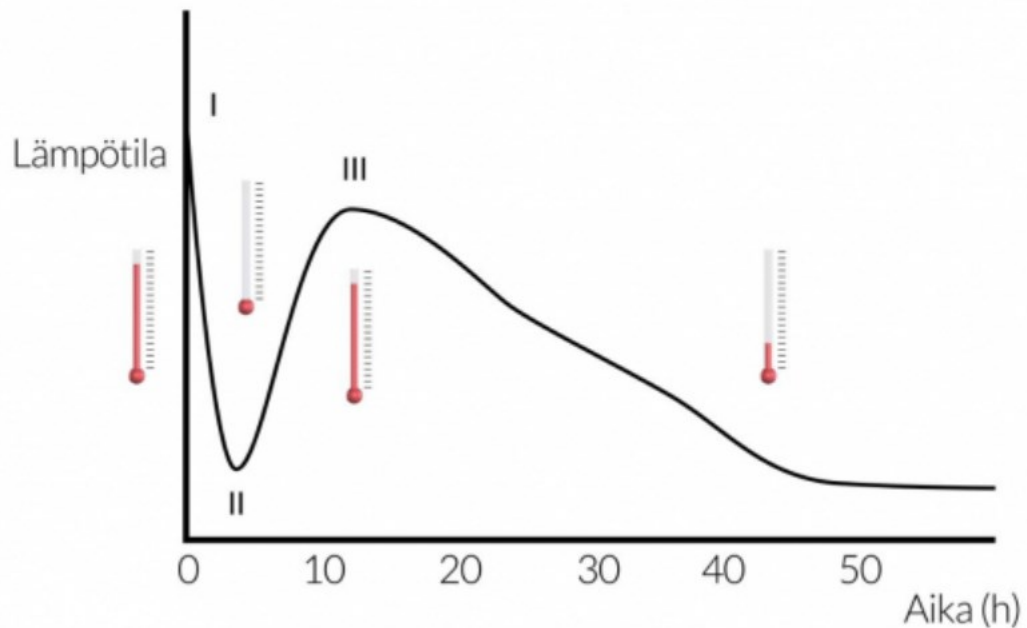


Kuva 5. Normaalisti kovettuva betoni sideaine CEM II/B (S-LL) 42,5 lujuudenkehitys kypsyysian funktiona [8, s. 93]

### Betonin lämmönkehitys

Betonin lämmönkehitystä seuraamalla voidaan suoraan arvioida samalla sen lujuudenkehitys. Tämä on työmaille erityisen tärkeää, sillä siitä voidaan päätellä muotin purkulujuus. Tämä tarkoittaa lujuusarvoa, jolloin muotit ja tukirakenteen voidaan purkaa, kun betoni ja rakenteet kestävät niille tulevat rasitukset. Rakenteissa, joiden rasitusluokkina on X0 ja XC1, muotin purkulujuus on 50 % nimellislajuudesta, rasitusluokissa XF2 ja XF4 se on 70 % nimellislajuudesta. Nimellislajuudella tarkoitetaan betonin lujuusluokkaa, jolle rakenne on suunniteltu. Betonin riittävästä kosteudesta on huolehdittava, että betonin kovettuminen tapahtuu suunnitellusti, jotta se saavuttaa muotinpurkulujuuden haluttuna ajankohtana. [12.]

Alussa betonin lämpötila laskee ympäristöolosuhteiden mukaisiksi. Seuraavaksi betonin lämmöntuotanto alkaa aiemmin mainitun sitoutumisen aikana. Veden ja sementin reagoidessa alkaa muodostumaan kalsiumsilikaattia, jonka reaktio tuottaa lämmönousua (kuva 6). Nousun jälkeen betoni laskee lopulta sitoutumisen jälkeen takaisin olosuhteiden lämpötilaan. [13.]

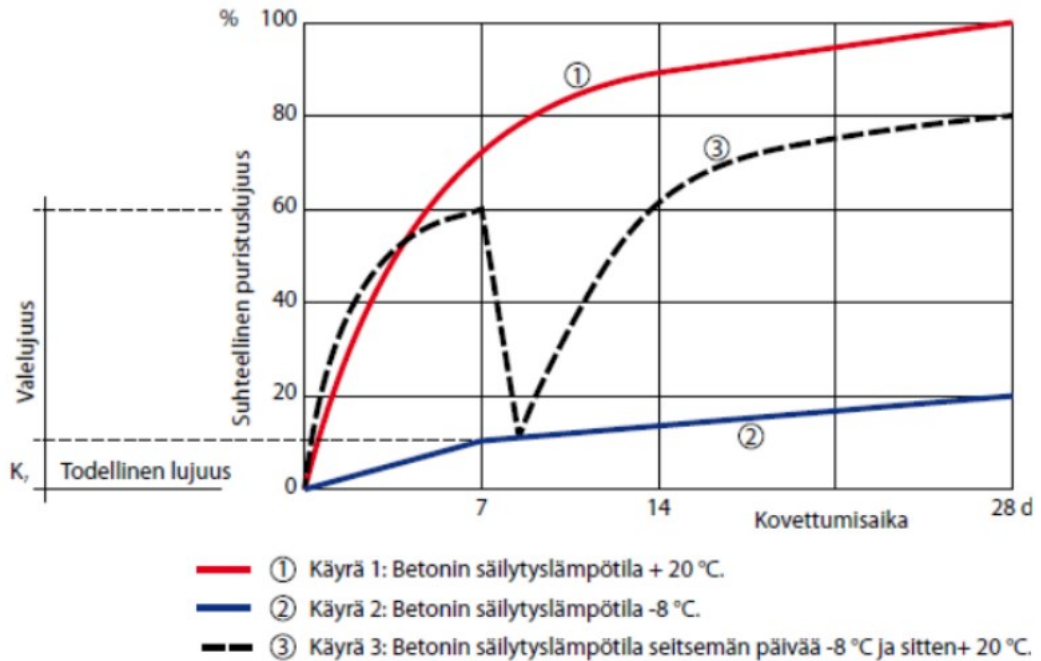


Kuva 6. Sementin hydrataatioprosessin eri vaiheet ja niissä tapahtuva lämmön vapautuminen. [7.]

#### Talvibetonointi

Sementin vaikutuksia enemmän lujuudenkehitykseen vaikuttaa betonin lämpötila. Tavoitelämpötila betonille on 20 °C:ssa, ja lujuuden kehitys hidastuu jo 10 °C:ssa, sekä hidastuu huomattavasti laskiessa 0 °C:seen ja lopulta pysähtyy 0... -15 °C: ssa. [8. s. 493]

Rakennetta ei myöskään saa päästää jäätymään ennen kuin se on saavuttanut jäätymislujuuden  $5 \text{ MN/m}^2$ , jotta se kestää jäätymisen vaikutukset. Mikäli betoni jäätyy ennen jäätymislujuutta, sen loppulujuus jää vajaaksi, vaikkakin se keräisi lisälujuutta myöhemmin. Tämä tunnetaan nimellä valelujuus, kun vesi aluksi jäätyessään nostaa lujuutta, joka häviää betonin sulaessa vaurioittaen pysyvästi rakennetta. [8. s.494] Seuraavassa kuvassa 7 näytetään, kuinka säilytyslämpötila ja jäätyminen vaikuttaa lujuudenkehitykseen.

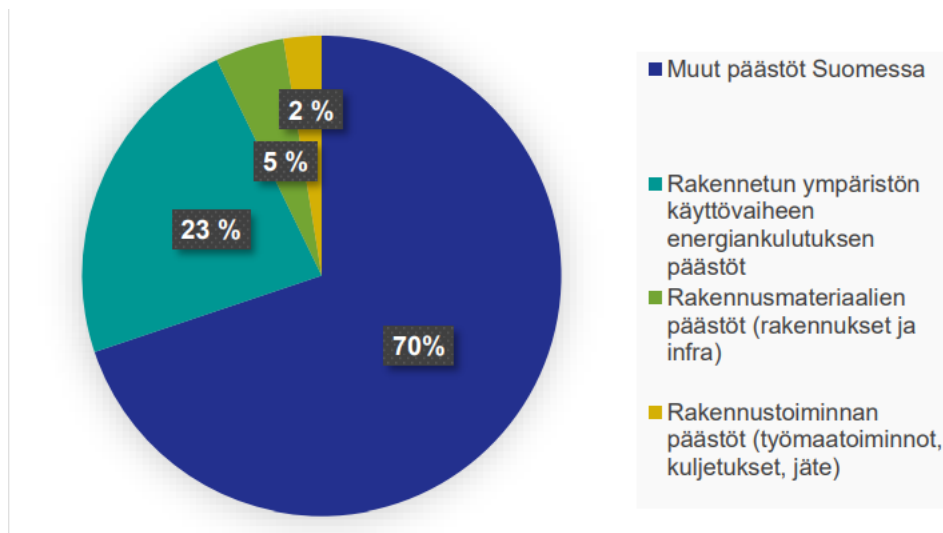


Kuva 7. Jäätymisen vaikutus betonin lujuudenkehitykseen [8, s. 495]

### 3 Betonin ilmastovaikutukset

Vuoden 2019 hallitusohjelman yhtenä tavoitteena on saada Suomesta ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta maailmassa sekä tulla hiilineutraaliksi 2035 mennessä. Tämä vaatii nopeita ratkaisuita kaikilta sektoreilta

päästöjen vähentämiseksi ja hiilinielujen kasvattamiseksi. Rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen on yksi osa taistelua ilmastonmuutosta, luonnon monimuotoisuuden katoa ja ylikulutusta vastaan. [14.] Vuonna 2018 Suomen kasvihuonepäästöt olivat 56,5 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>. Tästä rakennetun ympäristön elinkaaren osuus oli 30 %, kun huomioidaan myös sen käyttövaiheen energiankäyttö. Keskeinen osa rakennusalan tulevaisuutta on Suomen koko rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen pienentäminen. Rakennetun ympäristön hiilijalanjäljellä tarkoitetaan olemassa olevan rakennetun ympäristön energiankäytöstä syntyvien kasvihuonepäästöjen määrää vuodessa. Rakennetun ympäristön elinkaaripäästöjen laskentaan sisältyvät raaka-aineiden käyttö ja valmistus, kuljetus, siirrot, työmaatoiminta, rakennuksen käyttö mukaan lukien ylläpito, huolto ja korjaus sekä lopuksi uudelleenkäyttö, kierrätys tai loppusijoitus. Rakennusmateriaalien, kuten betoni, teräs, puu ja bitumi osuus tästä oli 5 %. Rakennustoiminnan osuus oli 2 %, sisältäen työmaatoiminnan, kuljetukset ja jätteet. [15.] Suomen päästöistä noin 2,2 % aiheutuu betonista, tästä isoin osa noin 80 % tulee sementin valmistuksesta. Seuraavassa kuvassa 8 on koottuna Suomen rakennusteollisuuden rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen päästöosuudet. [16.]

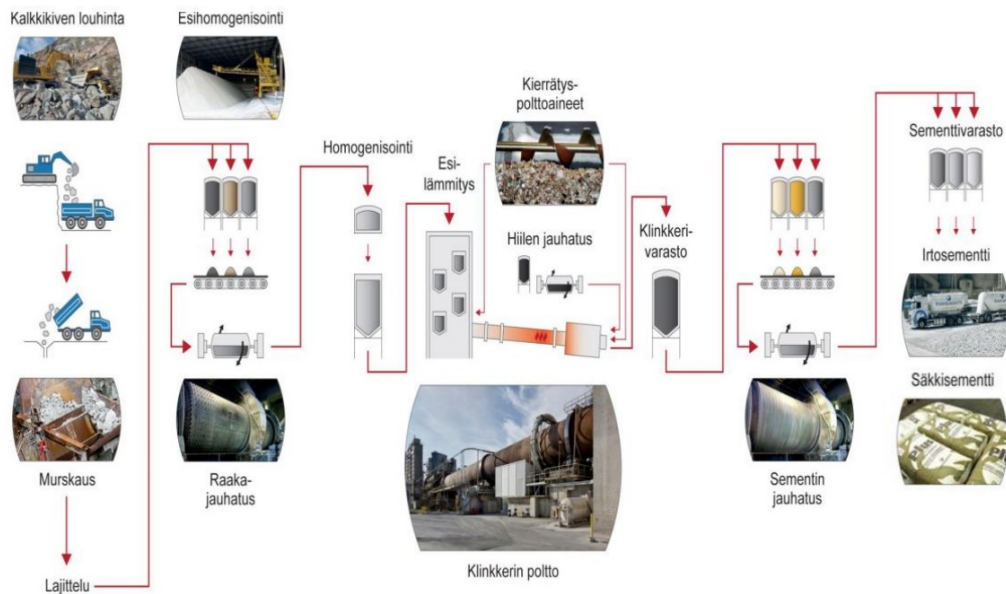


Kuva 8. Rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen osuus Suomen päästöistä [15.]

### 3.1 Sementin valmistus ja päästöt

Sementin valmistuksen tärkein pääraaka-aine on portlandklinkkeri, jota saadaan kalkkikivestä, joka on pääosin kalsiumkarbonaattia  $\text{CaCO}_3$ . Sen lisäksi klinkkerin valmistukseen tarvitaan piioksidia  $\text{SiO}_2$ , rautaoksidia  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ja alumiinioksidia  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . [8 s. 24] Sementin valmistus aloitetaan murskaamalla louhittu kalkkikivi, jossa erotetaan graniitti sekä muut sivukivilaadut. Tasalaatuisuuden takaamiseksi lajitellun kalkkikiven koostumus määritellään kemiallisesti. Tätä kutsutaan esihomogenisoinniksi. Raakajauhatuksessa kalsiumkarbonaatti, pii-, rauta- ja alumiinioksidi jauhetaan hienoksi jauheeksi tarkan kemiallisen reseptin mukaan. Tämä takaa tarkan oikean koostumuksen sementtiklinkkerille. Hienoksi jauhettu jauhe varastoidaan ja tarkistetaan tasalaatuisuus homogenoinnilla. Homogenointisiiloista raakajauhe syötetään uunin esilämmitysjärjestelmään, joka muodostuu sykloneista ja nousuputkista tai kalsinaattorista. Esilämmityksen tarkoitus on lämmittää ja sekoittaa jauhe poltossa tuleviin savukaasuihin. Tätä reaktiota kutsutaan nimeltä esikalsinointi. Siinä kalsiumkarbonaatti hajoaa kalsiumoksidiksi ja hiilidioksidiksi  $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Sementtiklinkkerin poltossa kiertouuniin lämpötila nostetaan hitaasti  $1\,450\text{ °C}$ :seen. Jauhe sulaa osittain muodostaen klinkkerimineraaleja. Tämä prosessi käyttää polttoaineena kivihiihtä, petrokoksia ja erilaisia kierrätyspolttoaineita. Uunin loppupäässä sementtiklinkkeri jäähdytetään nopeasti  $200\text{ °C}$ :seen minkä jälkeen se muistuttaa karkeaa soraa. Tämän jälkeen poistetaan savukaasut tekstiilisuodattimessa, minkä tarkoitus on vähentää typen oksideja ja pölypäästöjä. Näitä sivutuotteita hyödynnetään palauttamalla ne takaisin homogenisointisiilon raaka-aineiksi. Savukaasujen lisäksi hyödynnetään myös niiden sisältämä lämpö raaka- ja hiilimyllyssä syötettävän materiaalin kuivatukseen. Sementin jauhatuksessa varastoidut klinkkerit jauhetaan myllyssä seosaineiden ja kipsin kanssa. Jokaisella sementtilaadulla on oma reseptinsä. Lopuksi valmis sementti varastoidaan, ja se päättyy joko pienrakentajille säkkisementiksi tai irtosementtinä kuljetettavaksi

laivoilla tai säiliöautoilla asiakkaille. [17.] Tämä koko prosessi näytetään seuraavassa kuvassa 9.



Kuva 9. Sementin valmistusprosessi [18.]

Sementin valmistuksen päästöistä isoin osa tapahtuu esilämmityksessä ja sementtiklinkkeriä polttaessa. Kun kalkkikivi kalsinoituu se aiheuttaa 70 % päästöistä ja loput 30 % tulee polttoaineiden palamisesta. Kalkkikiven polttaminen vaatii paljon energiaa mutta se on silti välttämätön osa sementin valmistuksessa. Pienen vaikutuksen päästöjen vähentämiseksi voidaan kalkkikiven lisäksi käyttää teollisuuden sivuaineita, kuten kuona, lentotuhka ja kalkkikiviseoksesta saatavat lisäaineet. Suurempi päästöjen vähentämispotentiaali sijaitsee polttoaineiden palamisessa. Osa kivihiilestä ja öljynjalostuksen sivutuotteen petrokoksin sijaan voitaisiin korvata biopolttoaineilla, kuten asfalteeni, kierrätysöljy, nestekartonkien valmistuksessa kertyvä PPAF-reunanauha, rengasmurske sekä kaupan pakkausmateriaalijätteistä valmistuva SRF-kierrätyspolttoaine. Suomen ainoalla sementin valmistajalla Finnsementillä energiatehokkuus on hyvällä tasolla. Savukaasuista syntyvä lämmön hyödyntäminen toimittaa Finnsementin Paraisten ja Lappeenrannan tehtaiden kaukolämpöverkkoihin 30 gigawattituntia, mikä vastaa 2 100 pientalon vuosittaista energiankulutusta. Yksi

Finnsementin toteuttamista hiilidioksidin talteenoton vaiheista sementintuotannossa on pysyvä varastointi. Tässä hiilidioksidi paineistetaan nesteeksi varastoimista varten 800 metrin syvyydessä. Tällöin lämpötila ja paine saa sen pysymään nestemäisessä muodossa. Lopuksi se varastoidaan tyhjentyneisiin öljy- ja kaasuesiintymiin. [17.] Rakennusalan kysyntään ilmastotavoitteissa Finnsementti on luonut 40 % vähempipäästöisemmän sementin kolmossementin. Se sisältää noin 60 % masuunikuonaa säilyttäen silti työstettävyyden, säilyvyyden ja korkean loppulujuuden. [19.]

### 3.2 Vähäpäästöinen betoni

Ilmastovaikutuksien hillitsemisen vuoksi Suomen Betoniyhdistys ry. on luonut kansallisen BY-Vähähiilisyysluokituksen. Se on täysin vapaaehtoinen menetelmä luoda täysin tuotemerkeistä riippumaton yhtenäinen tapa kuvata erilaisia vähähiilisiä betonilaatuja. Tarkoituksena on luoda tilaajalle tai suunnittelijalle mahdollisuus valita vähähiilisemmän betonin ilman, että kilpailua rajoitetaan. Betonin lujuusluokkien kanssa oleva päästöluokitus helpottaa suunnittelijaa vähähiilisten rakennusmateriaalien valitsemisessa. Toistaiseksi luokitus soveltuu vain valmisbetonin valitsemiseen. Vähähiilisyysluokitus betonissa tulee tarpeen erityisesti, kun vuoden alussa 2025 astuu voimaan EU:n asettama rakennusten lupavaiheiden hiilidioksidikatto. Lupavaihe sisältää esityksen rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöistä. Tämän vuoksi BY-Vähähiilisyysluokitus esittelee betonin hiilidioksidipäästöt valmistajakohtaisesti ilman tuotenimiä BY-Vähähiilisyyslaskurin mukaan. Laskurissa otetaan huomioon raaka-aineiden hankinta, kuljetus sekä valmistusprosessin päästöt. Vähähiilisyysluokituksen on tarkoitus helpottaa suunnittelijaa määrittämään rakennusvaiheiden päästöluokitusta.

Betonilaadut jaotellaan viiteen eri luokkaan hiilidioksidipäästöjen perusteella nimikkeillä GRP.Referenssibetoni, GRP.85, GWP.70, GWP.55, GWP.40. Esimerkiksi GWP.85 tarkoittaa että betonin hiilidioksidipäästöt ovat korkeintaan 85 % verrattuna referenssitason. Referenssitaso kuvaa suomalaisten valmisbetonivalmistajien keskimääräistä päästötasoa vuonna 2021. Tämän lisäksi huomioidaan kyseiset päästöluokat betonin lujuuden mukaan 16 eri betonilaadulla.



Vähähiilisyysluokat eivät kumoa betonille asetettuja vaatimuksia esimerkiksi lujuuden ja säilyvyyksien kannalta. Seuraavassa kuvassa 10 esitetään betonin vähähiilisyysluokkien raja-arvot kg CO<sub>2</sub>/betoni m<sup>3</sup> [20.]

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

Kuva 10. BY-vähähiililuokitukset sekä vähähiilisyysluokkien raja-arvot kg CO<sub>2</sub> / Betoni m<sup>3</sup> [20.]

#### 4 Lämmön ja lujuuden seuranta

Työssä seurataan talvella 2023 Lujabetonin vähähiilisen betonin käyttäytymistä seinärakenteissa kahden eri säilytyslämpötilan välillä. Selvitetään, kuinka ympäristön lämpötila ja olosuhteet vaikuttavat vähähiilisen betonin seinärakenteen lujuudenkehitykseen ja lämmöntuotantoon. Lämpötilan ja lujuudenkehitystä seurataan 10 vuorokauden ajan aikavälillä 7.-16.2.2023.

#### 4.1 Koebetoni ja koekappaleiden valmistus

Tutkittava betoni on Lujabetonin vähähiilisten betonien C35/45-lujuusluokan betoni, joka täyttää BY-vähähiililuokituksen GWP.85. Sen sideaineet ovat CEM I, CEM II ja masuunikuona. Se kattaa lujuusluokaltaan C35/45 ja 50 vuoden ikäisenä kaikki rasitusluokat.

Työssä valmistettiin kaksi seinämuottia, joista toinen asetettiin lämmitettyyn sisätilaan vastaamaan lähes optimia betonin säilytystilaa suojaten pinta lämpömatolla. Lämpömaton tarkoitus on sulkea tuorebetoni tiiviiseen tilaan mahdollisimman tiiviisti. Tämä estää lämmönkarkauksen pinnan kautta. Toinen muotti asetettiin ulos vallitseville sääolosuhteille suojaten lämpömatolla muotin pinnasta ja peitettiin suojapeitteellä tuulen vaikutusten vähentämiseksi. Muottien rakentamisen apuna käytettiin naulapyssyä ja käsipyörösahaa. Kaksi muottia valmistettiin 12 mm paksusta havuvanerista, joiden sisätilan poikkipinta-alan mitat olivat leveys 1 000 mm x korkeus 1 000 mm x syvyys 200 mm. Muotteihin rakennettiin 200 mm ylimääräistä tilaa lisävaraa tasaisen valamisen ja suojaamisen helpottamiseksi. Samasta betonierästä valmistetaan 13 lieriömäistä koekappaletta standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Niiden tarkoituksena on vertailla koekappaleen puristuslujuutta eri olosuhteissa ja lujuuden kehitystä eri kypsyydeniässä. Seuraavassa kuvassa 11. valmis seinämuotti.



Kuva 11. Sisätiloihin sijoitettava valmis seinämuotti

#### 4.2 Lämpötilan mittaus

Molempien muottien sisään asetettiin kolme lämpöanturia pohjasta 200 mm, 500 mm ja 800 mm:n korkeuteen mittaamaan muottien alaosan, keskiosuuden ja pintaosan lämpötilaa. Sen lisäksi yksi lämpöanturi molempien muottien pintaosan yläpuolelle kiinnitettynä teipillä mittaamaan ympäristön lämpötilaa. Lämpöanturit kytkettiin lämpömittaaviin dataloggereihin.

Sisätilan seinämuotissa käytettiin tallentavaa dataloggeria, jonka tulokset piti erikseen lukea tietokoneelta muistikortin avulla. Käytetty malli oli 4-kanavainen Testo 176T4.

Ulkotiloissa säilytetyn seinämuotin mittausdataa pystyi seuraamaan mittaushetkellä E-gaten lämmönseurantaohjelmalla. Mittauslaite koostui kahdesta osasta, lähetin oli FTR264-TCK sekä keskusyksikkö oli Ovalink MTR.

Seinämuoteissa olevan lämpöanturit mittaavat lämpölukemia 10 minuutin välein. Jokaisesta mittauskohdasta. Mittausdataa seurataan 10 vuorokauden ajan jokaisesta mittauspisteestä:

1. lämpötila muotin pohjassa
2. lämpötila muotin keskellä
3. lämpötila muotin yläosassa
4. ympäristön lämpötila.

Lopuksi mittauksista muodostetaan lämpötilan muutosten kuvaaja.

#### 4.3 Koemuottien betonointi

Valmistettiin betonimyllyssä 2,5 m<sup>3</sup>:n annos betonia, joka pudotettiin betoniautoon. Betoniautosta otettiin näytteet kahteen kottikärryyn. Tutkimus suoritettiin tuulisessa säässä, jonka lämpötila oli 2 °C. Tuoreen betonin notkeus, ilmamäärä, lämpötila, vesi-sementtisuhde ja tiheys mitattiin ja tuorebetoni testattiin SFS-EN 12350:n mukaisesti. Seuraavaksi betoniauton rännillä valettiin seinämuotit. Seinämuotin täyttö tapahtui viidessä kerroksessa nousten aina 20 cm:n verran kerrallaan. Muottia tärytettiin betonivibralla neljässä pisteessä per kerros 3–5 sekunnin ajan betonimuotin tiiveyden takaamiseksi. Molempien betonimuottien yläosa suojattiin vaahtomuovista leikatulla palasella lämmönkarkauksen vähentämiseksi. Sen lisäksi tuulen vaikutusten minimoimiseksi ja lämmönkarkauksen hillitsemiseksi molemmat seinämuotit peitettiin pressun alle koko kokeen ajaksi.

#### 4.4 Lujuudenkehityksen seuranta

Koekappaleita valmistettiin 13 kpl SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus standardin mukaisesti lieriömuotteihin. Taulukossa 1 on esitetty tehtyjen koekappaleiden määrät puristusikänsä mukaan ja niiden säilytysolosuhteet.

Taulukko 1. Koekappaleiden säilytysolosuhde ja testausikä.

<b>Koekappaleiden puristusikä (vrk)</b>	<b>Ulko-olosuhde</b>	<b>Vesiupotus 20 °C</b>
1	1	1
2	1	1
3	1	1
5	1	1
8	1	1
10	1	1
28	0	1

Olosuhdekappaleilla tarkoitetaan ulkosäilytyksessä olevan seinän vallitsevia olosuhteita. Eli koekappaleet sijoitetaan muotin viereen pressun alle. Ulkosäilytykseen ei nähty tarvetta tehdä 28 vuorokauden puristuskoekappaletta sillä sen kyseisen betonin arviointi-ikä on 28 vuorokautta normaaliolosuhteissa ja työ- maita kiinnostaa vain muotinpurkulujuus. Vakio-olosuhdekappaleilla tarkoitetaan betonille suositeltavaa 20 °C:n säilytystilaa. Tässä tapauksessa ne säilytetään tasalämpöisessä vesialtaassa.

## 5. Tulokset ja niiden analysointi

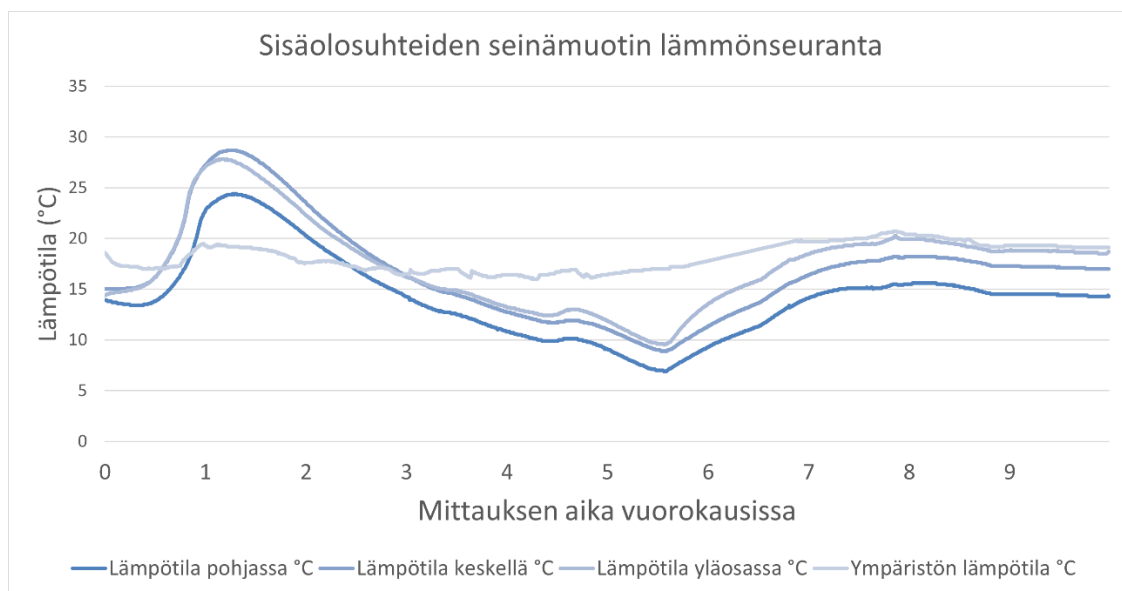
Tuoreen betonin ominaisuudet standardin SFS-EN 12350 mukaan olivat

- lämpötila 19,5 °C
- painauma 160 mm
- ilmapitoisuus 7,5 %
- vesi-sementtisuhte 0,419
- tiheys 2301 kg / m<sup>3</sup>.

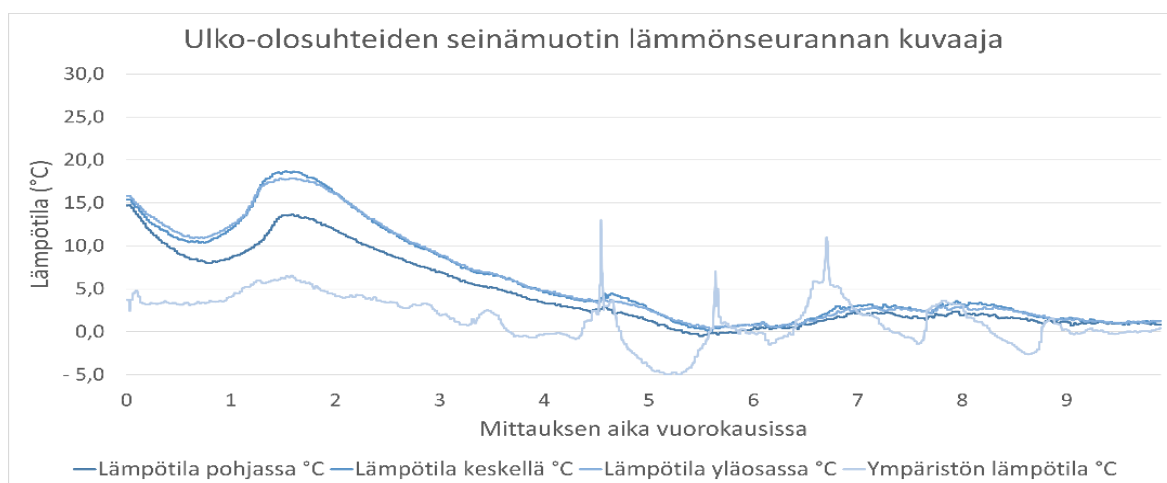
Talviolosuhteisiin betonin lämpötila olisi pitänyt olla kuumempaa, jotta lujuuden ja lämmönkehitys olisi lähtenyt nopeammin käyntiin. Tuulinen kylmä keli vaikutti mitatun betonin lämpötilaan. Painauma oli suhteellisen pieni mutta mahtui toivottuun painaumaluokkaan standardin SFS-EN 12350-2:n painauman mukaisesti. Ilmapitoisuus oli reseptin salliman maksimin korkeimmassa ääripäässä SFS-EN 12350:n ilmamittauksen mukaisesti. Vesi-sementtisuhte oli tarpeeksi alhainen ja täyttää kaikki vaaditut rasitusluokat. Vaativimmat rasitusluokat vesi-sementtisuhteen mukaan 50-vuoden ikäisenä vaatii korkeintaan 0,45- vesi-sementtisuhteen. Betonin tiheys oli SFS-EN 12350-6 standardin antamissa rajoissa.

## 5.1 Lämmönseuranta

Lämmönkehityksestä muodostettiin kuvaajat (kuva 12 ja kuva 13.) kymmenen päivän seurannan mukaan.



Kuva 12. Sisäolosuhteiden seinämuotin lämmönseuranta



Kuva 13. Ulko-olosuhteiden seinämuotin lämmönseuranta

Molempien kuvaajien lämmönkehitys alussa on samanlainen. Alussa betonin lämpötilä asettuu lähelle ympäristön lämpötilää. Seuraavaksi alkaa

eksoterminen reaktio, kun vesi ja sementti alkavat reagoimaan toistensa kanssa kemiallisesti. Reaktio tuottaa aluksi lämpöä, kunnes lämmöntuotanto lakkaa ja betoni alkaa seuraamaan ympäristön lämpötilaa. Sisätiloissa ympäristön lämpötilaa mittaava anturi reagoi herkemmin ympäristön lämpötilanmuutoksiin, kuten oven avaukseen ja patterin lämpötilan säätämiseen. Koemateriaalin seinärakenteeseen pienet lämpötilanmuutokset eivät ehtineet vaikuttamaan rakenteen koon vuoksi.

Pohjan lämpötila on molemmissa muoteissa kylmin osuus. Tämä on seurausta sille, että lämpö nousee ylöspäin sekä muotin alaosaan karkaa lämpöä. Keskeällä lämpö säilyy lähes samana, kuin yläosassa mutta varsinkin sisäolosuhteissa lämpö siirtyy muotin yläosan alueelle. Ulko-olosuhteiden kuvaajasta huomataan, että muotti painui lähelle pakkasta vasta 5- vuorokauden jälkeen, joten voidaan olettaa sen saavuttaneen tarvittavan jäätymislajuuden. Ulko-olosuhtekappaleiden ympäristön lämpötila nousee muutamana päivänä yllättävän korkealle. Tämän arvellaan johtuvan muottiin kohdistuvasta auringonpaisteesta, joka luo nopeasti nousevan ja laskevan lämpötilapiikin mittauksessa. Auringonpaiste lämmittää suojapeitettä, mikä häiritsee mittauslaitteistoa.

## 5.2 Lujuudenkehitys

Koekappaleiden puristustuloksista näytetään taulukossa 2.

Taulukko 2 Koekappaleiden puristustulokset ja vertaus suunnittelulujuuteen C35/45 betonilla

<b>Kuivumis- aika (vrk)</b>	<b>Ulko-olo- suhde (MPa)</b>	<b>Suunnittelu- lujuudesta (%)</b>	<b>Vakio-olo- suhdekapp- pale</b>	<b>Suunnittelu- lujuudesta (%)</b>



1	4,6	10,22	13,2	29,33
2	9,5	21,11	27,8	61,78
3	15,3	34,0	32,0	72,67
5	22,3	49,56	42,1	93,56
8	28,4	63,11	45,3	100,67
10	30,0	66,67	47,5	105,56
28	-	-	53,35	118,56

Puristuskappaleista ulko-olosuhdekappaleet eivät saavuttaneet muotipurkamiseen vaadittua 70 %:n määrää suunnittelulujuudesta. Vertaamalla tuloksia vakio-olosuhdekappaleisiin huomataan, että 20 °C:ssa säilytetyt koekappaleet saavuttivat muotipurkulujuuden jo 3 vuorokauden jälkeen. Ero voi johtua siitä, että ulkona säilytettyjen koekappaleiden koko on niin pieni verrattuna seinärakenteeseen, että sen lämpötila laskee liian nopeasti. Kun tarkastellaan lämpötilamittauksia ulkona säilytetyn seinärakenteen kylmimmästä kohdasta eli pohjasta Finnsementin tekemällä kypsyysian laskurilla Betometrillä, huomataan taulukosta 3, että seinämuotti saavuttaa 70 % suunnittelulujuuden noin neljän vuorokauden jälkeen.

Taulukko 3. Finnsementti Oy:n tekemä betonin kypsyyssikä-/lujuudenkehitysarvio C35/45 betonille

Mittaustulokset			Aika valusta		Keskilämpötila aikavälillä (C)	Kypsyyssikä aikavälillä (d)	Kypsyyssikä $t_{20}$ (d)	Lujuus- arvio (MPa)	Suunnittelu lujuudesta (%)
Päiväys	Kello	Lämpötila (C)	tunteina (h)	vuorokausina (d)					
7.2.2023	12:40	14,7	0,0	0,00	----	----	0,00	0	0 %
7.2.2023	15:49	12,6	3,2	0,13	13,7	0,09	0,09	0	0 %
7.2.2023	20:01	10,2	7,4	0,31	11,4	0,10	0,19	0	0 %
8.2.2023	4:25	8,0	15,8	0,66	9,1	0,17	0,36	4	9 %
8.2.2023	17:02	11,5	28,4	1,18	9,8	0,27	0,63	14	31 %
8.2.2023	22:18	13,7	33,6	1,40	12,6	0,14	0,77	18	41 %
9.2.2023	8:17	11,5	43,6	1,82	12,6	0,26	1,03	23	51 %
9.2.2023	20:54	8,5	56,2	2,34	10,0	0,27	1,30	26	58 %
10.2.2023	11:36	5,5	70,9	2,96	7,0	0,25	1,55	29	64 %
11.2.2023	1:15	3,5	84,6	3,52	4,5	0,18	1,74	30	67 %
12.2.2023	4:32	0,4	111,9	4,66	2,0	0,28	2,02	32	72 %
12.2.2023	11:21	-0,5	118,7	4,95	-0,1	0,06	2,08	32	72 %
12.2.2023	19:13	0,2	126,6	5,27	-0,2	0,06	2,14	33	73 %
13.2.2023	19:52	2,4	151,2	6,30	1,3	0,24	2,38	34	76 %
14.2.2023	10:02	1,4	165,4	6,89	1,9	0,15	2,52	35	78 %
14.2.2023	16:20	2,4	171,7	7,15	1,9	0,06	2,59	35	79 %
15.2.2023	11:13	1,2	190,6	7,94	1,8	0,19	2,78	36	80 %
16.2.2023	10:18	0,8	213,6	8,90	1,0	0,21	3,00	37	82 %

## 6. Johtopäätökset

Talvibetonoinnin tärkein ominaisuus on riittävän lämpötilan ylläpitäminen, varsinkin alkuvaiheessa. Mikäli betonirakenne pääsee jäätymään alkuvaiheessa ennen, kuin on saavuttanut 5 MPa jäätymslujuuden se aiheuttaa vakavaa lujuuskatoa. Työssä huomattiin kuinka suuri merkitys säilytyslämpötilalla ja suojauksella on betonin lujuudenkehitykseen. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen onnistuu Lujabetonin vähähiilisellä betonilla myös talviaikaan, kunhan suojauksesta ja lämmityksestä huolehditaan. Muotinpurkulujuuteen on mahdollista päästä jo neljässä vuorokaudessa, mikäli muotti suojataan hyvin ja huolehditaan lämmityksestä. Tulevaisuudessa voisi koettaa yhdistää kiihdyttimet ja vähähiiliset betonit, mikäli rakenteen lämmittäminen ei ole helposti ratkaistavissa.

## 7 Lähteet

[1.] Puolitamme betonin hiilijalanjäljen! Verkkoaineisto. Lujabetoni Oy. <<https://lujabetoni.fi/vahahiilibetoni/>> Luettu 13.4.2023.

[2.] Kovanen, Tuomo 2022, Lujabetonin tehtaalle ensimmäisenä Suomessa vähähiilisen betonin valmistuksen sertifikaatti. Verkkoaineisto. Lujabetoni Oy 17.10.2022 <<https://lujabetoni.fi/2022/10/17/lujabetonin-tehtaalle-ensimmaisena-suomessa-vahahiilisen-betonin-valmistuksen-sertifikaatti/>> Luettu 13.4.2023.

[3.] Sertifikaatit Lujabetoni. Verkkoaineisto. Lujabetoni Oy. <<https://lujabetoni.fi/aineistopankki/sertifikaatit/>> Luettu 13.4.2023.

[4.] Mitä betoni on? Verkkoaineisto. Rakentaja. <[https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita\\_betoni\\_on.htm](https://www.rakentaja.fi/artikkelit/8989/mita_betoni_on.htm)> Luettu 22.3.2023.

[5.] Betoni rakennusmateriaalina. Verkkoaineisto. Betoni.com. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/>> Luettu 14.2.2023.

[6.] Betonin osa-aineet, kiviaines. Verkkoaineisto. Betonitieto. <<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/kiviaines.html>> Luettu 23.3.2023.

[7.] Betonin osa-aineet, sementti, Verkkoaineisto. Betonitieto. <<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/sementti.html>> Luettu 25.3.2023.

[8.] Suomen Betoniyhdisty ry. Oppikirja by201 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 2018.

[9.] Researchgate 2017. <[https://www.researchgate.net/figure/Action-of-superplasticizer-on-cement-particles-a-Flocculated-cement-particles-b\\_fig1\\_319366674](https://www.researchgate.net/figure/Action-of-superplasticizer-on-cement-particles-a-Flocculated-cement-particles-b_fig1_319366674)>

[10.] Suomen Betoniyhdistys ry. Betoninormit By 65. Helsinki: BY Koulutus Oy, 2016.

[11.] Betonielementtien talvisaumasohje 2011. Verkkoaineisto. Elementtisuunnittelu. <<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23673/Betonielementtien%20talvisaumasohje%202011.pdf>> Luettu 26.4.2023.

[12.] Finnsementti 2020. Lämmön ja lujuudenkehityksen koulutus. Verkkoaineisto. Lujabetoni Oy. <<https://www.lujabetoni.fi/app/uploads/sites/2/2020/09/Finnsementti-2020-Koulutus-1.3.pdf>> Luettu 27.3.2023.

[13.] Betonin valmistus, betonin osa-aineet, sementti. Verkkoaineisto. Betonitieto. <<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/sementti.html>> Luettu 13.3.2023.

[14.] Hallituksen ilmastopolitiikka: Kohti hiilineutraalia Suomea 2035. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>> Luettu 14.3.2023.

[15.] Gaia Consulting Oy, 2020. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035, Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta. Verkkoaineisto. Rakennusteollisuus <[https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys\\_uudet/rt\\_4.-raportti\\_vahahiilisyiden-tiekartta\\_lopullinen-versio\\_clean.pdf](https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyiden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf)> Luettu 14.3.2023.

[16.] Detterborn, Taavi. Kainulainen, Laura. Pirttikoski, Kasper. Martikkala, Katarina. Huurinainen, Esa. Ramboll Oy. 2022 Infrarakentamisen betonin hiilijalanjäljen vähentäminen. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki. <<https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/aineistot/aineistoja-02-22.pdf>> Luettu 14.3.2023.

[17.] Ympäristöraportti 2022. Verkkoaineisto. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Ymparistoraportti-Finnsementti-2022-1.pdf>> Luettu 16.3.2023.

[18.] Aluehallintavirasto, 2018. Lappeenrannan sementtitehtaan ympäristöluvan tarkistaminen ja toiminnan olennainen muuttaminen <<https://ylupa.avi.fi/api/v1/documents/attachment/4501482>>

[19.] Vähäpäästöinen Kolmossementti on vastuullisen rakentajan valinta. 2022. Verkkoaineisto. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/yleinen/vahapaastoinen-kolmossementti-on-vastuullisen-rakentajan-valinta/>> Luettu 29.3.2023.

[20.] BY-vähähiilisyysluokitus. 2022. Verkkoaineisto. Vähähiilinen betoni <<https://vahahiilinenbetoni.fi/>> Luettu 29.3.2023.