

Janne Kallio

CEM III A

Rakennustekniikan koulutusohjelma

2019

CEM III A (sementtiyhdistelmä, joka sisältää vähintään 50% masuunikuonaa)

Kallio Janne  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2019  
Ohjaaja: Lahdenmaa, Juuso  
Sivumäärä: 65  
Liitteitä: 0

Asiasanat: betoni, sementti, granuloitu masuunikuonajauhe, lämpörasitus, lujuuskato

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia betonin lämpörasituksesta aiheutuvaa mahdollista lujuuskatoa massiivivalutilanteissa. Työssä käytettiin neljää eri reseptiä. Näillä tutkittiin, onko eri sideaineseosyhdistelmillä vaikutusta betonin lämpörasituksen kestävyYTEEN.

Kaikille resepteille tehtiin tuoremassakokeet sekä niistä valmistettiin koekappaleita, joille suoritettiin lämpörasituskokeet.

Lämpörasitustestien jälkeen pystyttiin puristuslujuuskokeiden avulla vertailemaan eri reseptejä keskenään ja tutkimaan aiheuttaako lämpörasitus betonille lujuuskatoa ja voidaanko sitä mahdollisesti rajoittaa käyttämällä eri sideaineseoksia.

Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella ei voida suoraan todeta, että betonin lämpörasitus aiheuttaisi lujuuskatoa. Tuloksissa oli huomattavia eroja ja tämä tutkimus avaa varmasti lisätutkimusmahdollisuuksia Rudus Oy:lle.

CEM III A

Kallio Janne

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Civil and Construction engineering

May 2019

Supervisor: Lahdenmaa Juuso

Number of pages: 65

Appendices: 0

Keywords: concrete, blast-furnace slag, heat strain, binder mixture combination

---

The purpose of this thesis was to examine if heat strain weakens the strength of massive concrete castings. Four different concrete formulas were used to find out, if different binder mixture combinations affect the concrete's durability under heat strain.

All four concrete formulas went through fresh concrete tests and then they were cast into samples and the samples underwent heat strain tests.

After the heat strain tests compressive strength was measured from the samples. Comparing the measurement results can be determined if heat strain causes weakening in the strength of the concrete and if it can be constrained by using different binder mixture combinations.

Final test results were inconclusive. It can't be stated that heat strain causes loss in the strength of the concrete. Results varied significantly and this creates an opportunity of further investigations for Rudus Oy.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Työn tavoite .....	6
1.2	Rudus Oy yrityksenä.....	6
2	BETONI .....	7
2.1	Betoni yleisesti.....	7
2.2	Betonin raaka-aineet .....	7
2.2.1	Sementti .....	7
2.2.2	Kiviaines .....	8
2.2.3	Vesi .....	9
2.2.4	Seosaineet .....	9
2.1.2	Lisäaineet .....	10
3	BETONIN OMINAISUUDET.....	11
3.1	Puristuslujuus .....	11
3.2	Lämmönkehitys.....	12
4	TUOREEN BETONIMASSAN OMINAISUUDET JA NIIDEN MITTAAMINEN .....	13
4.1	Notkeusluokat .....	13
4.2	Betonin lujuuden arvosteluikä .....	14
4.3	Tuoreen betonimassan ominaisuuksien mittaaminen .....	15
4.3.1	Painuma .....	15
4.3.2	Tiheys .....	15
4.3.3	Ilmamäärä .....	15
5	KOKEET .....	16
5.1	Koevalmistelut .....	16
5.2	Suhteitus.....	17
5.3	Lämpörasitustestit .....	18
5.4	Valmistettavat koekappaleet ja arvosteluiät.....	24
5.5	Betonin valmistus.....	26
5.6	Betonin tuoremassakokeet .....	26
5.6.1	Lämpötilan mittaaminen.....	26
5.6.2	Painuman mittaaminen .....	26
5.6.3	Ilmamäärän mittaaminen .....	28

5.6.4	Betonin tiheyden määrittäminen.....	30
5.7	Koekappaleiden valmistus .....	31
5.8	Koekappaleiden lämpörasituskokeet .....	34
5.8.1	Koevalmistelut.....	34
5.8.2	Kokeen suorittaminen.....	34
5.8.3	Lämpörasituskokeen seuranta .....	36
5.8.4	Muottien purkaminen .....	37
5.8.5	Koekappaleiden säilyttäminen.....	39
5.9	Betonireseptien arvosteluikien seuranta .....	40
6	TUTKIMUSTULOKSET .....	41
6.1	Betonin tuoremassakokeiden tulokset sekä puristuslujuuden kehitys lämpörasituskokeen jälkeen.....	41
6.1.1	Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N) .....	41
6.1.2	Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400) .....	43
6.1.3	Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400) .....	45
6.1.4	Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400) .....	47
6.2	Koekappaleiden lämpörasituskokeiden lämpötilakaaviot.....	49
6.2.1	Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N) .....	49
6.2.2	Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400) .....	50
6.2.3	Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400) .....	51
6.2.4	Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400) .....	52
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	53
7.1	Puristuslujuus lämpörasituskokeiden jälkeen .....	53
7.1.1	Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N) .....	53
7.1.2	Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400) .....	55
7.1.3	Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400) .....	57
7.1.4	Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400) .....	60
8	YHTEENVETO .....	62
8.1	Jatkotutkimusehdotus:.....	63
	LÄHTEET.....	64

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteena oli tutkia betonin lämpörasituksesta aiheutuvaa mahdollista lujuuskatoa massiivivalutilanteissa. Työssä käytettiin neljää eri reseptiä, joiden sideainemäärät vaihtelevat. Näillä tutkittiin, onko eri sideaineseos yhdistelmillä vaikutusta betonin lämmönrasituksen kestävyysasteeseen.

Kaikille resepteille tehtiin tuoremassakokeet, jotka sisälsivät lämpötilan mittauksen, painuman mittauksen, ilmamäärän mittauksen sekä tiiveyden mittauksen. Lisäksi, joka reseptistä tehtiin koekappaleita, joille suoritettiin lämpörasituskokeet.

Lämpörasitustestien jälkeen pystyttiin puristuslujuuskokeiden avulla vertailemaan eri reseptejä keskenään ja tutkimaan aiheuttaako lämpörasitus betonille lujuuskatoa sekä voidaanko sitä mahdollisesti rajoittaa käyttämällä eri sideaineseoksia.

## 1.2 Rudus Oy yrityksenä

Rudus on yksi maan johtava betonituotteiden valmistaja, sekä kiviainestuotteiden toimittaja. Rudus kuuluu CRH-konserniin, joka on maailmanlaajuisesti toimiva rakennusmateriaalialan yritys.

Ruduksella on Suomessa 90 betonituote- ja valmisbetonitehdasta ja lähes 120 kiviainesten tuotantoaluetta eri puolella Suomea. Kaiken tuotannon lisäksi Ruduksella on noin 30 kierrätyspistettä ympäri Suomen. (Rudus Oy www-sivut 2019.)

## 2 BETONI

### 2.1 Betoni yleisesti

Betonin pääraaka-aineina käytetään kiviaineksia, sementtiä ja vettä. Niiden lisäksi käytetään betonin ominaisuuksia parantavia lisä- ja seosaineita. Betoni on maailman suosituimpia rakennusaineita maailmassa. Sen suosio perustuu sen lukuisiin hyviin ominaisuuksiin, joita esimerkiksi ovat edullinen hinta, hyvä saatavuus, kosteuden kesto, hyvä paloturvallisuus ja ennen kaikkea hyvä muokattavuus. (Betoni www-sivut 2019.) Betonia käytetään talonrakentamisessa sekä infrarakentamisessa. Talonrakentamisessa sitä käytetään runkorakenteisiin sekä julkisivurakenteisiin. Infrarakentamisessa sen pääkäyttökohteet ovat sillat, satamarakenteet, jätevedenpuhdistamot, melusteet, padot ja tunnelit. (Betoni www-sivut 2019.) Betonia käytetään paikallavaletuna työmaalla ja elementtitehtaissa esivalmistettujen betonielementtien valmistuksessa.

Käytettäviä betonilaatuja on monia ja käyttötarkoitukseen parhaiten sopivan laadun valinta on tärkeä asia, jotta betonointityö onnistuu ja kovettunut betoni täyttää siltä vaaditut ominaisuudet. (Betoni www-sivut 2019.)

### 2.2 Betonin raaka-aineet

#### 2.2.1 Sementti

Sementin pääraaka-aineena on kalkkikivi, jota esiintyy runsaasti ympäri maailmaa. Kalkkikiven lisäksi sementti sisältää piioksidia, rautaoksidia ja alumiinioksidia.

Sementti on jauhemainen hydraulinen sideaine, joka reagoi veden kanssa ja saa sen kovettumaan kestäväksi lopputuotteeksi. Sementti valmistetaan jauhamalla klinkkeriä, seosaineita (kalkki, masuunikuona) ja kipsiä kuulamylyllä hienoksi jauheeksi. Sen ominaisuuksia säädellään klinkkerin koostumuksella ja seosaineiden eri suhteilla.

Sementti vaikuttaa suuresti betonin ominaisuuksiin. Niitä ovat esimerkiksi sitoutuminen ja lujuudenkehitysnopeus, lämmönkehitys, betonin vedentarve sekä kemiallinen kestävyys. (Finnsementti www-sivut 2019.) Sementin lujuudenkehitykseen vaikuttaa paljon myös betonissa käytettävä veden määrä. Tätä kutsutaan vesi-sementtisuhteeksi.

Vesi-sementtisuhte  $w$  on:

$$w = \frac{v}{s}$$

$v$  = vesimäärä paino-osin

$s$  = sementtimäärä paino-osin

Betoninormeista löytyy vielä erikseen sementtilajien soveltuvuus eri kohteisiin rasi-  
tusluokittain.

Työssä käytetyt sementtiluokat:

1. CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N
  - plussementti, normaalisti kovettuva portlandseossementti
2. CEM I 52,5 R
  - nopeasti kovettuva portlandsementti
3. masuunikuona KJ400
  - granuloitu masuunikuonajauhe

### 2.2.2 Kiviaines

Suurin osa betonin koostumuksesta on ns. runkoainetta eli kiviainesta. Sen tilavuus-  
osuus betonista on noin 65-80%. Betonin kiviaineeksi soveltuu hyvin laaja ala eri ki-  
vilaatuja. Kunhan betonissa käytettävät kivilaadut ovat tarpeeksi lujia sekä tiiviitä,  
eikä huononna betonin muita ominaisuuksia. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 31).



### 2.2.3 Vesi

Vettä tarvitaan betonin valmistukseen:

- Betonimassan notkeuteen pystytään vaikuttamaan
- Sementti ei kovetu ilman vettä

### 2.2.4 Seosaineet

Suomessa betonin seosaineina käytetään silikaa, masuunikuonaa ja lentotuhkaa. Seosaineiden avulla saadaan betonin kustannuksia pienemmäksi sekä betoniin saadaan haluttuja ominaisuuksia, kuten säädeltyä betonin lämmönkehitystä.

#### 2.2.4.1 Masuunikuona

Masuunikuonajauhe on hydraulinen sideaine, jota valmistetaan jauhamalla granuloitua masuunikuonaa. Granuloitua kuonaa saadaan, kun raakaraudan valmistuksen yhteydessä syntyvä emäksinen sulate jäähdytetään nopeasti veden avulla ja kuonasta tulee lasimaista.

Kuonan piilevät hydrauliset ominaisuudet heräävät sementin ja veden reaktiossa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta ja kuona kehittää lujuutta lähes yhtä paljon kuin sementtiklinkkeri. Masuunikuonan hydrauliseen aktiivisuuteen vaikuttavat kuonan emäksisyys ja lasimaisuusaste sekä kuonajauheen hienous. (Finnsementti www-sivut 2019.)

Masuunikuonan avulla betoniin saadaan monia hyviä ominaisuuksia kuten:

- alentaa ja tasoittaa betonin lämmönkehitystä, sopii hyvin massiivivaluihin
- kuonabetoni kovettuu pitkään ja näin betonille saadaan korkeat loppulujuudet
- kuonajauhe tiivistää betonin pintaa ja näin ollen kuonabetoni kestää paremmin kemiallista räsitusta, koska vierasaineet eivät pääse tunkeutumaan betoniin niin hyvin
- parantaa betonin pakkas-suolakestävyyttä
- masuunikuonajauhe on edullisempaa kuin sementti

## 2.2.2 Lisäaineet

Lisäaineiden avulla betonin eri ominaisuuksia voidaan säädellä hyvin laajasti. Betonin lisäaineet ovat yleensä erilaisia polymeerejä, joilla säädellään esimerkiksi betonin notkeutta, ilmapitoisuutta tai kovettumisen nopeutta. (Betoni [www-sivut 2019](#).) Erilaisia lisäaineita ovat: huokostimet, notkistimet, hidastimet, kiihdyttimet, pakkasenkestoa parantavat aineet, tiivistysaineet ja injektointiaineet. Yleisimmin näistä käytetään huokostimia, notkistimia, hidastimia sekä pakkasenkestoa parantavia lisäaineita.

### 2.2.2.1 Huokostimet

Huokostimia käytetään parantamaan betonin pakkasenkestävyyttä. Huokostimet ovat pinta-aktiivisia lisäaineita, joiden ansiosta betonimassaan muodostuu sekoituksen aikana pieniä pysyviä ilmahuokosia. (Finnsementti [www-sivut 2019](#).) Suomessa lähes kaikilta betonirakenteilta, jotka sijaitsevat ulkona vaaditaan pakkasenkestävyys. Huokostimen ansiosta betonin ilmapitoisuus nousee noin 4-8 %, kun yleensä betonissa on ilmaa noin 1-2 %.

#### 2.2.2.2 Notkistimet

Notkistimia käytetään betonin notkeuden lisäämiseen ja samalla veden käyttöä voidaan vähentää. Veden käytön vähennyksen seurauksena vesi-sementtisuhte saadaan pienemmäksi, joten betonin lujuus nousee. Vedenvähennyksen tuomaa lujuuden kasvua voidaan hyödyntää vähentämällä tarvittavaa sementtimäärää. Notkistimilla varhaislujuus kasvaa ja kutistumaa on helpompi hallita. Notkistimien avulla veden määrää voidaan jopa pienentää 5-30%. (Semtu www-sivut 2019.)

### 3 BETONIN OMINAISUUDET

#### 3.1 Puristuslujuus

Betonille on ominaista erittäin hyvä puristuslujuus. Sen lujuuden yksikkönä käytetään megapascalialia (MPa). Betonin puristuslujuuteen vaikuttaa moni asia:

- vesisementtisuhte
- sementin määrä ja laatu
- kiviaineen laatu ja rakeisuus
- jälkihoito
- seos- ja lisäaineet
- kovettuneen betonin arvosteluikä
- veden laatu

### 3.2 Lämmönkehitys

Betonin lämmönkehityksellä on suuri vaikutus sen loppulujuuteen. Sementin ja veden hydrataatioreaktiossa kehittyy lämpöä, joka kehittyy samassa suhteessa kuin lujuudenkehitys etenee. Lämmönkehitykseen vaikuttavat sementin kemiallinen koostumus ja hienous. Jo 10 °C:n lämpötilan nousu kiihdyttää kovettumisreaktion kaksinkertaiseksi normaaliolosuhteissa. Jos kovettumisreaktiota halutaan nopeuttaa, voidaan lämpötilaa nostaa jopa 50 °C:seen saakka. Lämpötilan laskeminen taas hidastaa hydrataatioreaktiota eli betonin lujuudenkehitystä. Lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n lujuudenkehitys hidastuu voimakkaasti ja lopulta pysähtyy, kun lämpötila on laskenut -10–15 °C:seen. Jos betoni on päästetty jäätymään kovettumisen aikana, sen lujuus on voinut alentua jopa 50–80 %. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 346–347, 350.)

Etenkin massiivisissa rakenteissa betonin lämpötila nousee korkeaksi valun keski-osassa, joka voi aiheuttaa suuria lämpötilaeroja rakenteen reunojen ja keskiosan välillä. Lämpötilaerot synnyttävät jännitystä rakenteeseen, jolloin betoni voi halkeilla. Hydrataatioreaktiossa syntyvään lämpöön voi vaikuttaa sementin valinnalla ja lisäainesten käytöllä tai käyttämällä mahdollisimman kylmää betonimassaa. Lämpötilaeroja voi myös ehkäistä eristämällä muotit hyvin ja käyttämällä lämmitystä tai jäähdystystä. (Finnsementti [www-sivut](http://www.finnsementti.fi) 2019.)

Betonin lämpökäsittelyn tiedetään vaikuttavan kovettuneen betonin ominaisuuksiin:

- loppulujuus alenee. Lujuuskato tavallisesti 0...30%, mutta voi nousta jopa 40%
- betonin pakkasenkestävyys alenee

Syitä mahdolliseen lujuuskatoon ovat:

- betonin osa-aineiden erilaiset lämpölaajenemiskertoimet
- epätasainen lämmittäminen
- kemialliset tekijät, jotka käsittävät mahdolliset erot hydraatio tuotteissa, hydraatioasteessa ja mikrorakenteessa

Lujuuskadon suuruutta ja haittoja voidaan vähentää:

- käyttämällä jäykähköjä notkeuksia
  - käyttämällä mahdollisimman alhaista vesisementtisuhdetta
  - käyttämällä nopeasti kovettuvia sementtejä
  - pitämällä lämmönnousunopeus alhaisena ja tasoittamalla lämpötilaeroja
- (Betonitekniikan oppikirja 2004, 357-358.)

## 4 TUOREEN BETONIMASSAN OMINAISUUDET JA NIIDEN MITTAAMINEN

### 4.1 Notkeusluokat

Betonimassan notkeus vaikuttaa massan työstettävyyteen ja tiivistettävyyteen. Betonimassat jaetaan notkeudeltaan seuraaviin luokkiin: nestemäinen, vetelä, notkea, plastinen, jäykkä, hyvin jäykkä, maakostea ja puristustärytettävä. Notkeusluokka voidaan ilmoittaa notkeuden mittaamiseen käytettävän erityisen VB-kokeen kestoajan lukuarvona ( $sVB = VB$ -sekuntia) tai kartiokokeella määritettävänä betonimassan painumana (mm) tai leviämänä (mm).

Nestemäinen (0-1 sVB, painuma yli 150 mm, leviämä yli 500 mm): Erittäin helposti leviävä ja tiivistettävä, lisäaineilla nesteytetty betonimassa. Nestemäinen massa kasvattaa valupainetta ja vaatii tiiviin muotin.

Vetelä (1-2 sVB, painuma 100...150 mm, leviämä 400...500 mm): Pienten ja tiheästi raudoitettujen rakenteiden betonointiin sopiva hyvin tiivistettävä betonimassa, joka leviää kaadettaessa helposti itsestään. Vetelä betonimassa vaatii tiiviin muotin.

Notkea (2-3 sVB, painuma 60...100 mm): Yleisesti käytetty notkeusluokka, jolla saadaan betonimassaan hyvä työstettävyys riittävän koossapysymisen ansiosta. Massasta ei kuitenkaan voi esim. muodostaa käsissään koossa pysyvää palloa. Notkeaa massaa käytetään mm. laattarakenteiden valuun.

Plastinen (3-5 sVB, painuma 30...60mm): Hyvin koossapysyvä massa, joka kaadettaessa muodostaa hupullisen kasan. Plastisesta betonimassasta voi muodostaa käsissä koossa pysyvän pallon. Työntökärryssä kuljetettuna massa painuu kuitenkin helposti kokoon ja muodostaa tasaisen pinnan. Plastinen massa on vaikea tiivistää sauvatärytyksellä. Käytetään lattioiden valuissa.

Jäykkä (5-10 sVB, painuma 0...30mm): Voimakasta tärytystä (muottitärytystä) vaativa massa. Käytetään erikoislattioiden valuissa. (Rudus Oy [www-sivut 2019.](#))

#### 4.2 Betonin lujuuden arvosteluikä

Betonilaadut jaotellaan lujuudenkehittymisnopeutensa perusteella nopeasti kovettuviin, normaalisti kovettuviin ja hitaasti kovettuviin betonilaatuihin. Betonierästä tehtävien koekappaleiden lujuus arvostellaan betonilaadun mukaan vastaavasti 7, 28 tai 91 vuorokauden kuluttua. Koekappaleita säilytetään kovettumisen aikana +20 C lämpötilassa riittävän kostean ilman ympäröimänä (mielellään vesialtaassa).

Nopeasti kovettuvat betonilaadut (arvosteluikä 7 vuorokautta) kehittävät kovettuesaan runsaasti lämpöä, mikä nostaa vastabetonoidun rakenteen lämpötilaa. Nopeasti kovettuvaa betonia käytetään suuren hydrataatiolämpönsä takia yleensä ohuiden rakenteiden betonoinnissa sekä talvibetonoinnissa, jossa on vaarana rakenteen lämpötilan laskeminen liian alhaiseksi. Riittävän korkea lämpötila nopeuttaa betonin lujuudenkehitystä.

Hitaasti kovettuvaa betonia (arvosteluikä 91 vuorokautta) käytetään pienen hydrataatiolämpönsä takia vastaavasti paksujen rakenteiden betonoinnissa kesäaikana, jolloin on vaarana betonirakenteen lämpötilan nouseminen liian korkeaksi. Kovettuvan betonin liian korkea lämpötila voi alentaa betonin loppulujuutta ja vaurioittaa betonirakennetta. (Rudus Oy [www-sivut 2019.](#))

### 4.3 Tuoreen betonimassan ominaisuuksien mittaaminen

#### 4.3.1 Painuma

Tuore betoni tiivistetään kartion muotoiseen muottiin. Muotti täytetään ja tiivistetään kolmessa eri osassa. Kun kartio vedetään ylös, antaa betonin kokoonpainumamatka mittausravon betonin notkeudelle. (SFS-EN 12350-2 2009.)

#### 4.3.2 Tiheys

Tuore betonimassa tiivistetään jäykkään, vesitiiviiseen, tilavuudeltaan ja painoltaan tunnettuun astiaan ja sitten punnitaan. Näin saadaan mitattua betonin tiheys. (SFS-EN 12350-6 2009.)

#### 4.3.3 Ilmamäärä

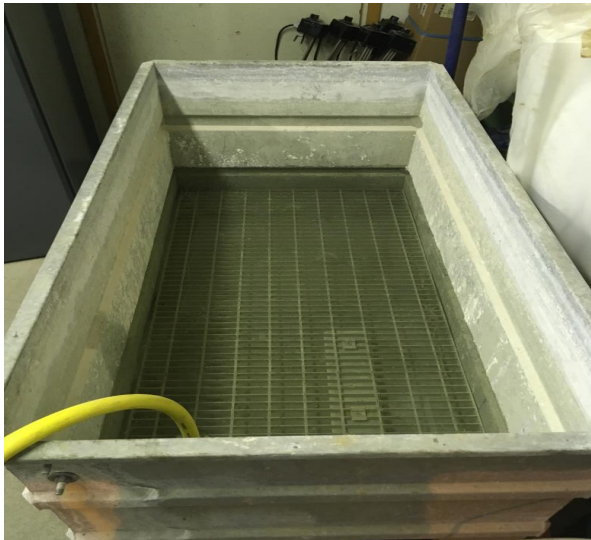
Ilmapitoisuudella tarkoitetaan työmaalla tiivistetyn betonimassan sisältämää ilmamäärää tilavuusprosentteina. Betonin sisältämä ilmamäärä vaikuttaa betonin pakkasenkestävyyteen. Betonimassan riittävällä ilmamäärällä pyritään vaikuttamaan kovettuvaan betoniin muodostuvien ilmatäytteisten suojahuokosten määrään. Lämpimitaltaan noin 0,025 – 0,05 millimetrin ilmatäytteiset suojahuokokset toimivat betonissa tyhjättilana, johon betonin sisältämä huokosvesi voi paineen kasvaessa tunkeutua. Tällöin jäätyksen aikaansaama paine ei nouse liian korkeaksi ja riko betonia. (Rudus Oy [www-sivu](http://www.rudus.fi) 2019.)

## 5 KOKEET

### 5.1 Koevalmistelut

Betonikokeet suoritettiin Rudus Oy:n betoniasemalla Kartanon toimipisteessä. Käytävissä oli hyvät tilat lämpörasituskokeiden suorittamiseen, koekappaleiden valmistukseen ja säilyttämiseen, laboratoriotilat tuoremassakokeiden tekoon sekä vaadittavat ilmastolliset olosuhteet kokeen onnistumiselle. Kokeisiin tarvittavat välineet ja laitteet sain Rudus Oy:n Porin toimipisteen asemalta.

Laboratorion valmistelu:



Koekappalesäilytysaltaan täyttöä



Muottikaluston puhdistamista ja öljyämistä



## 5.2 Suhteitus

Betonilaatuna käytettiin: *RAK 37 16mm S3*, jossa:

*RAK:*            *normaalisti kovettuva rakennebetoni*

*37:*             *lujuusluokka (C30/37)*

*16mm:*        *kiviaineksen maksimiraekoko*

*S3:*             *notkeusluokka*

Työssä käytetyt sementtiluokat:

1. CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N
  - plussementti, normaalisti kovettuva portlandseossementti
2. CEM I 52,5 R
  - nopeasti kovettuva portlandsementti
3. masuunikuona KJ400
  - masuunikuonajauhe

Koetta varten, tehtiin neljä eri reseptiä:

**1. 100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (verrokkiresepti)**

*betonilaatu:*        *RAK 37 16mm S3*

*sideaine:*            *plussementti: 370 kg/m<sup>3</sup>*

**2. 75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400**

*betonilaatu:*        *RAK 37 16mm S3*

*sideaineet:*        *pikasementti: 277,5 kg/m<sup>3</sup>*

*masuunikuona KJ400: 92,5 kg/m<sup>3</sup>*

**3. 50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400**

*betonilaatu:*        *RAK 37 16mm S3*

*sideaineet:*        *pikasementti: 185 kg/m<sup>3</sup>*

*masuunikuona KJ400: 185 kg/m<sup>3</sup>*

**4. 25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400**

*betonilaatu:*        *RAK 37 16mm S3*

*sideaineet:*        *pikasementti: 92,5 kg/m<sup>3</sup>*

*masuunikuona KJ400: 277,5 kg/m<sup>3</sup>*

Jokainen resepti pidettiin muutoin samanlaisena paitsi sideainemäärät sekä laadut vain vaihtelivat, niin kuin yllä on nähtävissä.

### 5.3 Lämpörasitustestit

Testin tarkoituksena oli simuloida massiivirakenteisen betonivalun lämmönkehitystä, jossa lämpötilat betonin ytimessä voi nousta jopa 70 asteeseen. Tästä esimerkkinä tuulimyllyn jalustan betonivalu (600 kuutioita). Lämpörasitustestin kesto oli 7 vrk, joka kuvaa oikean betonivalun lämmönkehitystä. Koetta varten valmistelin kolme lämpörasitusallasta. Ensimmäisen altaan tavoitelämpötila oli 60 astetta, toisen altaan tavoitelämpötila oli 70 astetta ja kolmannen altaan tavoitelämpötila oli 80 astetta.

Testin suorittamiseen tarvittavat välineet:

Lämpörasitusaltaiden valmistelu:

Kokeen suorittamiseksi tarvittiin 4 kpl vanhoja lisäainesäiliöitä (tilavuudeltaan 1000 l). Ennen niiden paikalleen vientiä ja vedellä täyttämistä säiliöt eristettiin ulkopuolelta villalla. Alusta, jossa kontit säilytettiin kokeiden ajan, eristettiin uretaanilevyillä. Näin minimoitiin ympäristöstä aiheutuvat lämpöhäviöt.



1000l lisäainesäiliö



Lämpörasitusaltaiden valmistelu



Lämpörasitusaltaiden pohjan eristys



Lämpörasitusaltaan eristäminen villalla



Lämpörasitusaltaiden eristystyötä



Valmiit eristetyt lämpörasitusaltaat

Muut tarvittavat välineet:

- 7 kpl tynnyrilämmittimiä (1500 w, Termostaatti +20 - +85 °C)
  - o jokaiseen altaaseen asennettiin 2 kpl tynnyrilämmittimiä kuvan mukaisella tavalla



- Dataloggeri (Testo 176T4), lämmönkehityksen seuraamiseen



Lämpörasituskokeen suorittaminen:

Kokeessa tehtiin mahdollisimman realistinen 7 vuorokauden mittainen lämmönkehitystesti, joka kuvaa mahdollisimman paljon oikeaa betonivalun lämmönkehitystä.

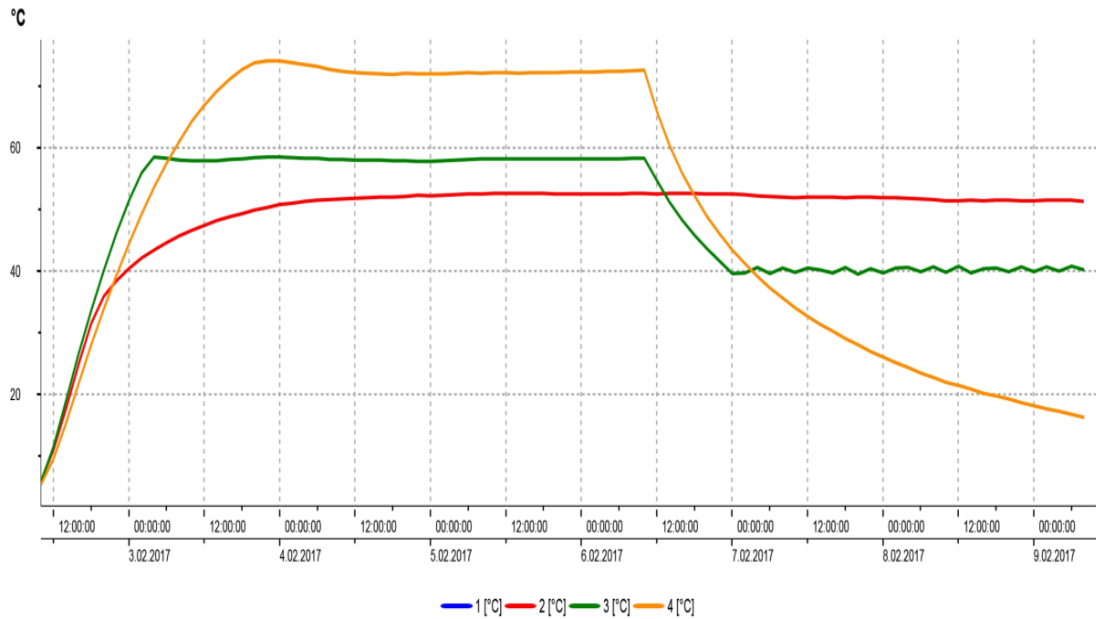
Kokeessa minulla oli käytettävissä kolme allasta ja jokaisen altaan tavoitelämpötila oli eri. Tällä tavoin testattiin, että pystytäänkö vesialtailla ja sauvalämmittimillä luomaan mahdollisimman realistiset olosuhteet kuvaamaan massiivivalurakenteen lämmönkehitystä.

Lämpötiloiksi valikoitui 60, 70 ja 80 astetta. Nämä siksi, koska isoissa massiivirakenteisissa betonivaluissa ytimen lämpötila voi nousta jopa 70 asteeseen.

Laatikot kuvaavat lämpörasitusaltaita:

- 60 astetta	- 70 astetta	- 80 astetta
--------------	--------------	--------------

Instrument name: Satakunta 3		9.2.2017 11:07:01			Page	1/1
Start time: 2.2.2017 10:00:00		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values	
End time: 9.2.2017 10:00:00	1 [°C]	----	----	----	-195,0/1000,0	
Measurement channels: 4	2 [°C]	5,90	52,60	48,852	-195,0/1000,0	
Measured values: 85	3 [°C]	5,80	58,50	48,411	-195,0/1000,0	
SN 40705185	4 [°C]	5,30	74,10	49,638	-195,0/1000,0	
Oppari						



Kuva: lämpörasitustestin lämmönkehityskäyrät

Kuvassa on nähtävillä kolme eri lämmönkehityskäyrää:

Käyrä	Tavoitelämpötila
2 punainen	60
3 vihreä	70
4 keltainen	80

Jokaisella eri tavoitelämpötilalla testattiin hieman eri tavalla lämpötilan laskemista normaalilämpötilaan (20 astetta), jotta saataisiin luotua mahdollisimman realistinen tilanne, mikä kuvaisi todenmukaisesti oikean betonivalun lämmönkehityskäyrää.

**Käyrä 2:** Molemmat sauvalämmittimet asennettiin päälle 60 asteeseen ja annettiin olla seitsemän vuorokauden ajan.

**Käyrä 3:** Molemmat sauvalämmittimet asennettiin päälle 70 asteeseen ja annettiin olla päällä 4 vuorokauden ajan. Sen jälkeen toinen sauvalämmittimistä otettiin kokonaan päältä pois ja toinen sauvalämmitin jätettiin päälle 70 asteeseen, kunnes 7 vrk tuli täyteen.

**Käyrä 4:** Molemmat sauvalämmittimet asennettiin päälle 80 asteeseen ja annettiin olla päällä neljän vuorokauden ajan. Sen jälkeen molemmat sauvalämmittimet otettiin pois päältä kokonaan, kunnes 7 vrk tuli täyteen.

Lämpörasitustestin tulokset:

Tulokset vaihtelivat huomattavasti, kuten lämmönkehityskäyräkuvasta on nähtävissä. Halusin selvittää eri lämpötilan vaihdosvariaatioilla mahdollisimman realistisen tilanteen oikeata betonivalua ajatellen ja tilanteessa neljä (käyrä 4) tulokseksi tuli lähestulkoon se tilanne, jota testissä lähdettiin hakemaan.

Tilanteesta neljä (käyrä 4) valikoitui se, jolla lähdettiin suorittamaan betonin hallittua lämpörasitusta koetilanteessa sellaisella muutoksella, että lämmöt pidettiin päällä 2,5 vrk. Jonka jälkeen lämmöt otettiin kokonaan pois.

#### 5.4 Valmistettavat koekappaleet ja arvosteluiät

Kaikille resepteille suoritettiin täsmälleen samanlaiset tuoremassakokeet, lämpörasituskokeet, betonin arvosteluikien seuranta ja lujuudenseurantakokeet. Jokaisen reseptin kokeet suoritettiin omana erillisenä työnään

Jokaisesta reseptistä valmistettiin 3 koekappaletta kutakin arvosteluikää kohden. Näin ollen hajontaa saatiin pienemmäksi ja kokeesta mahdollisimman luotettava.



**Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)**

Arvosteluikä (vrk)	20 astetta	60 astetta	70 astetta	80 astetta
7	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
28	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
91	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
120				3kpl
yhteensä:	9	9	9	12

**Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400)**

Arvosteluikä (vrk)	20 astetta	60 astetta	70 astetta	80 astetta
7	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
28	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
91	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
120				3kpl
yhteensä:	9	9	9	12

**Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400)**

Arvosteluikä (vrk)	20 astetta	60 astetta	70 astetta	80 astetta
7	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
28	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
91	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
120				3kpl
yhteensä kpl:	9	9	9	12

**Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400)**

Arvosteluikä (vrk)	20 astetta	60 astetta	70 astetta	80 astetta
7	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
28	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
91	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
120				3kpl
yhteensä kpl:	9	9	9	12

Yhteensä kaikista resepteistä koekappaleita kertyi 156 kpl.

## 5.5 Betonin valmistus

Betonimassa valmistettiin Porin betoniasemalla, josta se kuljetettiin betoniautolla Kartanon toimipisteelle. Kaikki reseptit valmistettiin samalla tavalla (sekoitusaika, annoskoko, vesiannostusprosentti, jolloin saatiin minimoitua mahdolliset poikkeamat eri betonireseptien välillä).

## 5.6 Betonin tuoremassakokeet

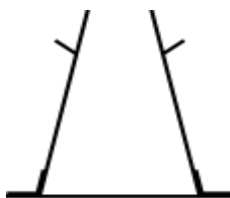
### 5.6.1 Lämpötilan mittaaminen

Ennen muita kokeita, betonimassasta mitattiin lämpötila digitaalisella lämpömittarilla ja kirjattiin ylös.

### 5.6.2 Painuman mittaaminen

Lämpötilan mittaamisen jälkeen mitattiin betonimassasta painuma. Painuman mittamiseen tarvittavat välineet ovat:

- **Kartion muotoinen muotti** ja sen tulee olla varustettu kahdella, lähellä yläosaa sijaitsevalla kädensijalla sekä lähellä pohjaa sijaitsevilla kiinnityssalvoilla tai jalkatuilla, joilla muotti pidetään vakaana. Muotin mitat ovat:



pohjan halkaisija:	(200 ±2) mm
yläosan halkaisija:	(100 ±2) mm
korkeus:	(300 ±2) mm

- **Sulloinsauva**, joka on poikkileikkaukseltaan pyöreä, suora, teräksestä valmistettu, päistään pyöristetty ja jonka halkaisija on  $16 \pm 1$  mm ja pituus  $600 \pm 5$ mm
- **Rullamitta**
- **Pohjalevy/pinta**, jonka päällä painumamittaus voidaan suorittaa
- **Kosteä pyyhe**
- **Kauha**
- **Ajanottolaite**

Työn suoritus:

Muotti ja pohjalevy kostutettiin märällä pyyhkeellä ja muotti laskettiin vaakasuoraan pohjalevyn päälle. Ennen muotin täyttämistä, jalat asetetaan tiukasti muotin jalkatukien päälle. Muotti täytettiin kolmessa eri kerroksessa ja jokainen kerros tiivistettiin 25 sulloinsauva iskulla, niin että iskut osuivat tasaisesti eri puolille muottialaa. Alimmainen kerros tiivistetään, niin ettei sulloinsauva kosketa pohjalevyä. Keskimäinen ja päällimmäinen kerros tiivistetään siten, että sulloinsauva tunkeutuu juuri alempaan kerrokseen. Ennen kuin ylimmäistä kerrosta aletaan tiivistämään, muotin päälle kasataan pieni keko betonia. Jos betonimassan pinta tippuu muottireunan alapuolelle tiivistyksen aikana, lisätään betonia siten, että päällä on koko ajan ylimääräistä betonia. Kun tiivistys on suoritettu, tasoitetaan betonin pinta sahaavin ja pyörivin liikkein. Ylimääräinen betoni poistetaan muotin sekä pohjalevyn päältä.

Muotti nostetaan kohtisuoraan ylöspäin tasaisella nostonopeudella 2-5 sekunnin aikana. Betoniin ei saa kohdistua kiertävää tai sivusuuntaista liikettä.

Muotin täyttämisen aloittamisesta muotin poistamiseen saa kulua enintään 150 s

Painuma ( $h$ ) mitattiin ja kirjoitettiin muistiin välittömästi muotin poistamisen jälkeen. Määrittämällä muotin korkeuden ja kokoon painuneen koekappaleen korkeimman kohdan erotus kuten kuvassa:



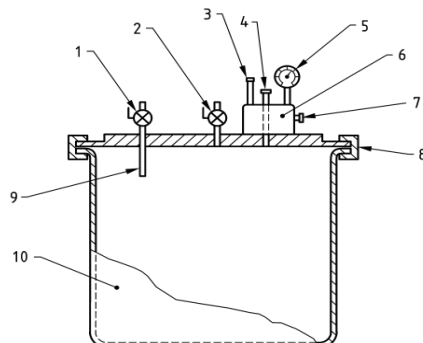


Painuman mittaamista

### 5.6.3 Ilmamäärän mittaaminen

Painumakokeen jälkeen tuoreesta betonista mitattiin ilmamäärä. Ilmamäärän mittaaminen suoritettiin painemittarimenetelmällä. Ilmamäärän mittaamiseen tarvittavat välineet ovat:

- **Painemittauslaite, esim.**



Selite:

- 1) Hana A
- 2) Hana B
- 3) Pumppu
- 4) Paineentasausventtiili
- 5) Paine mittari
- 6) Paine kammi
- 7) Ilmaventtiili
- 8) Kristin
- 9) Pidentetty putki kalibroinnin tarkistamiseksi
- 10) Säiliö

(Kuva: SFS-EN 12350-7, Rakennustuoteteollisuus RTT ry)

- **Betonin tiivistysväline, sauvatärytin**
- **Kauha**
- **Lasta/suorareunainen tasoitusviivain**
- **Astia/ämpäri**
- **Lapio**
- **Käsiruisku, tarvitaan veden lisäämiseksi paineilmasäiliöön**
- **Puhdistusliina/paperia**

Työn suoritus:

Säiliö täytetään betonimassalla kahdessa eri kerroksessa, näin pyritään saavuttamaan betonin paras mahdollinen tiivistyminen. Paras mahdollinen tiivistyminen tarkoittaa: se on saatu mekaanisella tärytyksellä, kun betonin pinnalle ei enää ilmaannu isoja ilmakuplia, pinta muuttuu sileäksi ja ulkonäöltään kiiltäväksi, eikä liiallista erottumista esiinny. Sauvatärytintä käytettäessä, käytetään lyhintä tärytysaikaa, tällä tavalla huolehditaan, ettei betonista poistu huokosilma. Betoni tärytettiin kolmesta eri kohtaa ja kahdessa eri kerroksessa.

Kun betoni on tiivistetty, sen pinta tasoitetaan hierrinlevyllä astian reunojen kanssa tasan. Sen jälkeen astian reunat ja kansilaipan tiivisteet siistitään paperilla ym. siistiksi ja asetetaan kansi huolellisesti paikoilleen. Kiristetään kansilaitteisto. Varmistutaan että kannen ja säiliön väli on painetiivis. Suljetaan paineentasausventtiili ja avataan hanat A ja B. Käyttäen käsiruiskua ruiskutetaan vettä joko hanasta A tai B, kunnes vettä tulee ulos toisesta hanasta. Suljetaan ilmaventtiili painekammiossa ja pumpataan ilmaa kammioon, kunnes mittarin osoitin on alkupainemerkinnän kohdalla. Odotetaan muutama sekunti paineilman jäähtymistä ympäristön lämpötilaan ja vakautetaan osoitin alkupaineen merkinnän kohdalle joko pumppaamalla lisää ilmaa tai päästämällä ilmaa ulos tarpeen mukaan. Suljetaan hanat A ja B ja avataan sitten paineentasausventtiili. Kopautetaan terävästi säiliön seinämää. Koputtaen kevyesti painemittaria luetaan asteikolta mittarin näyttämä arvo, joka on näennäinen betonin ilmamäärä prosentteina, A1, 0,1 % tarkkuudella. Avataan hanat A ja B, jotta paine poistuisi ennen kansilaitteiston irrottamista.

(SFS-EN 12350-7 2009.)

#### 5.6.4 Betonin tiheyden määrittäminen

Samalla kun betonista määritettiin ilmamäärä, mitattiin betonin tiheys. Periaate on, että betonimassa tiivistetään tilavuudeltaan tunnettuun astiaan, jonka jälkeen se punnitaan.

Tiheyden mittaamiseen tarvittavat välineet ovat:

- **Vesitiivis, jäykkä astia, jonka tilavuus on vähintään 5 l**
- **Sauvatärytin**
- **Vaaka**
- **Suorareunainen tasoitusviivain**
- **Lapio**
- **Kauha**
- **Metallinen lasta/hierrin**
- **Ämpäri**

Työn suoritus:

Ennen astian täyttöö, otetaan muistiin astian massa ( $m_1$ ), joka määritetään punnitsemalla. Sen jälkeen astia täytettiin kahdessa eri kerroksessa. Molemmat kerrokset tiivistettiin sauvatäryttimellä. Sauvatärytintä käytettäessä, käytetään lyhintä tärytysaikaa, tällä tavalla huolehditaan, ettei betonista poistu huokosilma. Betoni tärytettiin kolmesta eri kohtaa ja kahdessa eri kerroksessa.

Kun betoni on tiivistetty, sen pinta tasattiin hierrinlevyllä astian yläreunan kanssa tasan. Astia puhdistettiin huolellisesti betoniroiskeista. Tämän jälkeen astia punnitaan sisältöineen ja merkitään massa ( $m_2$ ) muistiin. Betonin tiheys saadaan laskettua yhtälöstä:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

missä

$D$  on tuoreen betonimassan tiheys,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$m_1$  on tyhjän astian massa, kg

$m_2$  on tiivistetyllä betonilla täytetyn astian massa, kg

$V$  on astian tilavuus,  $\text{m}^3$

## 5.7 Koekappaleiden valmistus

Näyte otetaan standardin EN 12350-1 mukaisesti. Koekappaleiden valmistukseen tarvittavat välineet ovat:

- **Kuutiomuotti**
- **Sauvatärytin**
- **Suorareunainen tasoitusviivain**
- **Muottiöljy**
- **Suti/pensseli**
- **Kauha**
- **Muottikansi (metalli)**

Työn suoritus:

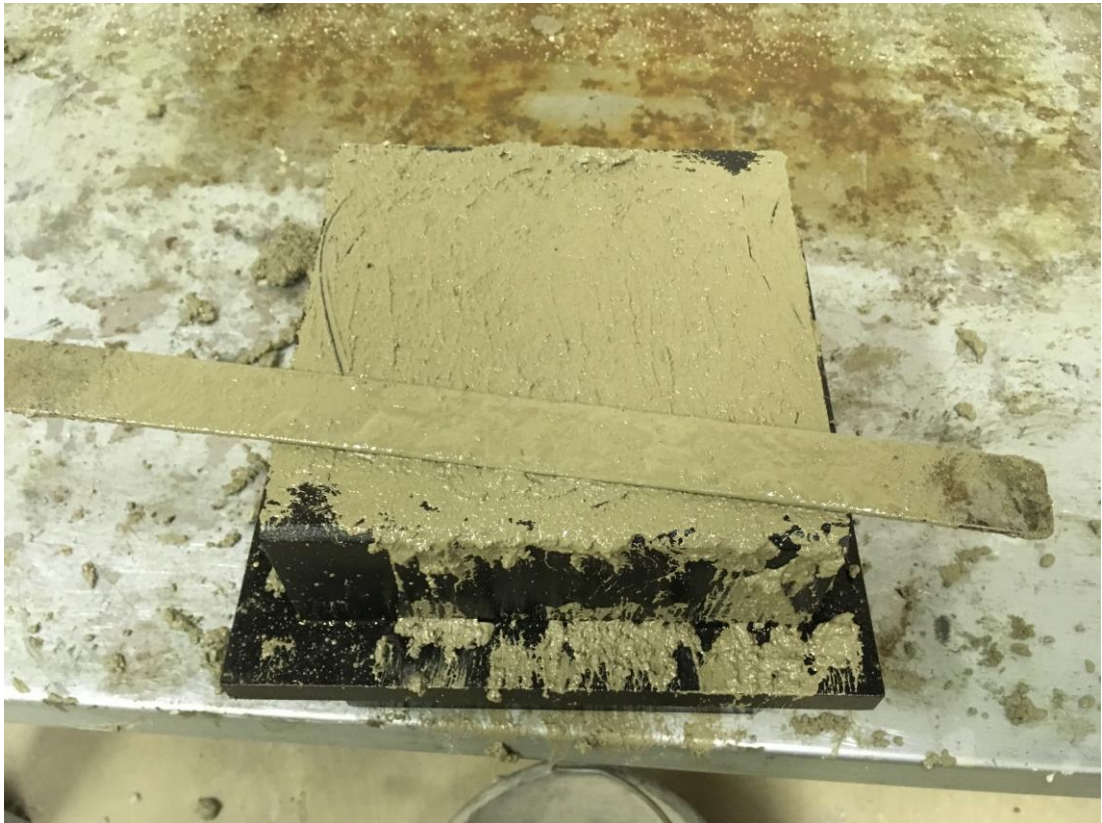
Muotti täytettiin kahdessa eri osassa ja molemmat kerrokset tiivistettiin huolellisesti sauvatäryttimellä. Tiivistyksen jälkeen betonin pinta tasattiin tasoitusviivaimella muottin yläreunan kanssa tasan. Tämän jälkeen muottin päälle laitettiin metallikansi.



Kuutiomuotteja



Betonilla täytettyjä ja tiivistettyjä kuutiomuotteja



Betonipinnan tasoitus tasoitusviivaimella





Valmiin muotin päälle on laitettu metallikansi

## 5.8 Koekappaleiden lämpörasituskokeet

Kun kaikki betonin tuoremassakokeet oli tehty sekä koekappaleet oli saatu valmistettua, aloitettiin koekappaleiden lämpörasituskokeet. Koekappaleet laitettiin tuoreina lämpörasitusaltaisiin.

### 5.8.1 Koevalmistelut

Suurimmat koevalmistelut oli jo tehty, koska ennen oikeaa koetta olin jo suorittanut lämpörasitustestit ja saanut näin hankittua tietoa siitä, miten lämpörasitustestit tulee tehdä oikeiden koekappaleiden kanssa.

Lämpörasitustesteihin verrattuna ainoana lisänä kokeisiin tuli 20-asteinen vesiallas, joka kuvaa ihanteellisinta koekappaleiden säilytyslämpötilaa. Tässä altaassa lämpötila pyrittiin pitämään koko testin ajan 20°C asteessa.

Arvosteluikä (vrk)	20°C allas	60°C allas	70°C allas	80°C allas
7	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
28	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
91	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
120				3kpl
yhteensä:	9kpl	9kpl	9kpl	12kpl

### 5.8.2 Kokeen suorittaminen

Ennen lämpörasituskokeen aloittamista:

- jokaisen vesialtaan lämpötila oli esilämmitetty 20 asteeseen
- dataloggerin lämpötilamittausjohdot asennettiin valmiiksi ja itse loggeriin oli säädetty oikeat mittaustiedot ja raja-arvot
- sauvalämmittimet olivat valmiina asennettuina oikeaan lämpötilaan

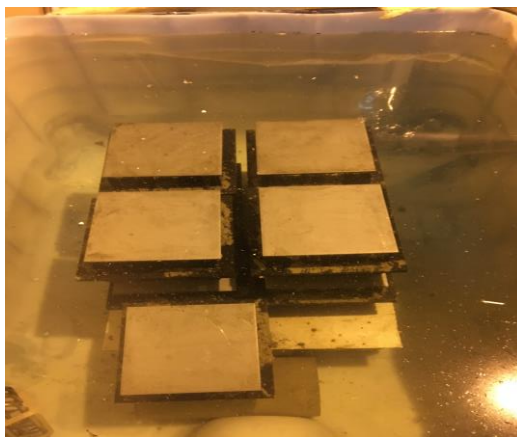
- lämpörasitusaltaiden pohjalle asennettiin koekappaleita varten ritilä, jolle ne laskettiin. Näin saatiin koekappaleet irti astian pohjasta, jotta vesi pääsi kiertämään vapaasti altaassa. Tämä mahdollisti tasaisen lämpötilan ympäri allasta kokeen ajan.



- tuoreet betonikoekappaleet kannettiin valmiiksi altaiden eteen.



- juuri valmistetut koekappaleet laskettiin varovasti lämpörasitusaltaisiin.



- kannet asennettiin altaisiin paikoilleen.



Lämpörasituskokeen aloittaminen:

- tarkistettiin vielä kertaalleen kaikki eri altaat ja varmistettiin, että altaiden lämmityssauvoihin oli asetettu oikea lämpötila.
- varmistettiin dataloggerin säädöt ja asetukset, että ne olivat oikein.
- koe aloitettiin kytkemällä altaiden kaapeleihin virta sekä laittamalla dataloggeri päälle.

### 5.8.3 Lämpörasituskokeen seuranta

Lämpörasituskokeen aikana oli ehdottoman tärkeää käydä tarpeeksi usein valvomassa tilannetta, ettei esimerkiksi sulake/sähköt ole menneet pois päältä. Näin taattiin kokeen onnistuminen ja minimoitiin mahdolliset mittausvirheet lämpörasituskokeen aikana.

Kun 7 vrk tuli täyteen lämpörasitustestissä. Muotit nostettiin altaistaan pois ja vietiin laboratorioon muottien purkamista varten. Oli erityisen tärkeää, ettei vahingossakaan sotkenut eri altaista tulleita koekappaleita keskenään, jottei sekaisin menneet koekappaleet pilaa koetuloksia.



Muotit nostettu altaista pois lämpörasituskokeen jälkeen.

#### 5.8.4 Muottien purkaminen

Kaikki 39 kpl betonimuotteja purettiin paineilman avulla. Purkaminen suoritettiin ns. "altaittain". Näin eri altaiden koekappaleet eivät sekoittuneet keskenään.



Muoteista saadut koekappaleet siistittiin huolellisesti.



Siistimisen jälkeen suoritettiin välittömästi koekappaleiden merkintä.



Kuvassa nähtävissä ylhäältä alaspäin lueteltuna:

1. koekappaleen numero
2. arvosteluikä
3. lämpörasitustestin altaan lämpötila, jossa koekappale on ollut.

### 5.8.5 Koekappaleiden säilyttäminen

Muotista poiston jälkeen koekappaleita säilytettiin puristusluujden testaukseen saakka vedessä, jonka lämpötila oli 20 astetta.



Koekappaleiden säilytysallas.

## 5.9 Betonireseptien arvosteluikien seuranta

Arvosteluikä määrittää sen, koska kyseisen koekappaleen puristuslujuus testataan koekappaleen valmistuspäivästä lukien.

Arvosteluikä (vrk)	20 astetta	60 astetta	70 astetta	80 astetta
7	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
28	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
91	3kpl	3kpl	3kpl	3kpl
120				3kpl
yhteensä:	9kpl	9kpl	9kpl	12kpl

(Tutkimuksessa käytetyt arvosteluiät, rasituslämpötilat ja koekappalemäärät)

Esimerkki:

Koekappale numero 1 on valmistettu 1.1.2018 ja sen puristuslujuus testataan:

Arvosteluikä (vrk)	Puristuslujuuden testaus pvm.
7	8.1.2018
28	29.1.2018
91	2.4.2018
120	1.5.2018



Koekappaleen puristuslujuuden testaus.



## 6 TUTKIMUSTULOKSET

6.1 Betonin tuoremassakokeiden tulokset sekä puristuslujuuden kehitys lämpörasituskokeen jälkeen.

6.1.1 Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)

### Tuoremassakokeiden tulokset:

Lämpötila: 15 °C

Tuoreesta betonista mitattu ilmamäärä: 2,5 %

Tuoreen betonimassan tiheys: 2301 kg/m<sup>3</sup>

Painuma: 140 mm

### Puristuslujuudet:

#### 20-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
1. 7vrk	41,99	
2. 7vrk	41,94	42,2 (7vrk)
3. 7vrk	42,56	
4. 28vrk	50,77	
5. 28vrk	50,83	51,1 (28vrk)
6. 28vrk	51,77	
7. 91.vrk	60,33	
8. 91vrk	60,08	59,9 (91vrk)
9. 91vrk	59,20	

#### 60-asteinen lämpörasitus

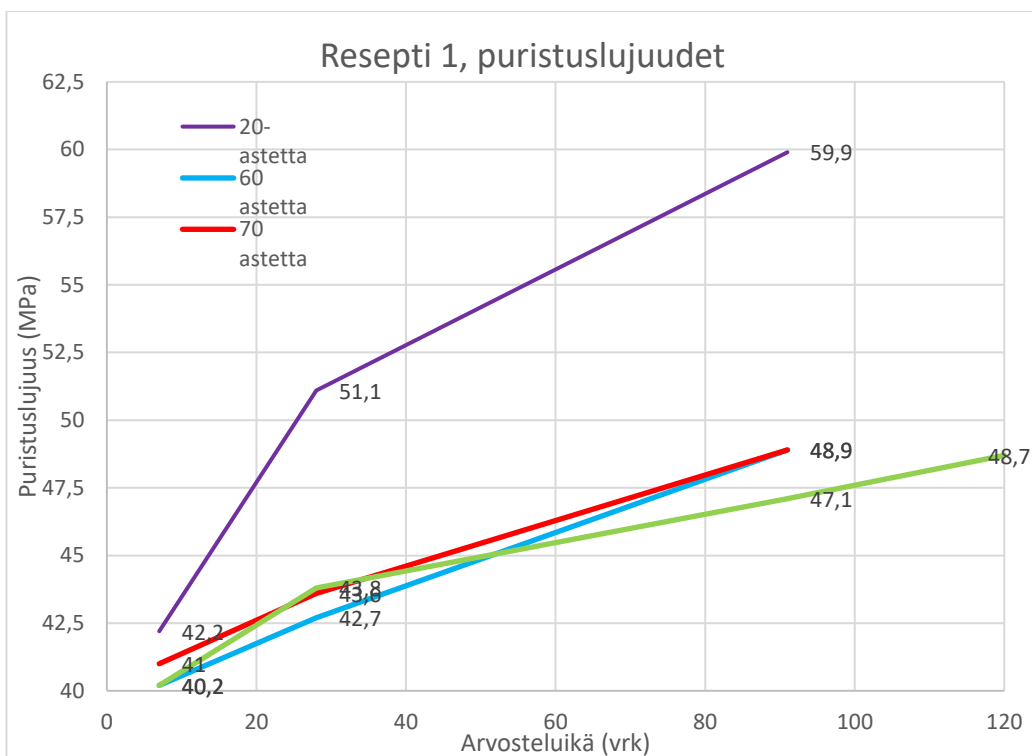
Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
10. 7vrk	40,87	
11. 7vrk	40,28	40,2 (7vrk)
12. 7vrk	39,50	
13. 28vrk	41,91	
14. 28vrk	43,00	42,7 (28vrk)
15. 28vrk	43,33	
16. 91.vrk	48,37	
17. 91vrk	49,62	48,9 (91vrk)
18. 91vrk	48,79	

### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
19. 7vrk	41,03	
20. 7vrk	41,26	41,0 (7vrk)
21. 7vrk	40,81	
22. 28vrk	42,93	
23. 28vrk	43,24	43,6 (28vrk)
24. 28vrk	44,73	
25. 91.vrk	48,93	
26. 91vrk	47,04	48,0 (91vrk)
27. 91vrk	47,91	

### 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (Mpa)
28. 7vrk	39,28	
29. 7vrk	40,09	40,2 (7vrk)
30. 7vrk	41,30	
31. 28vrk	44,25	
32. 28vrk	42,88	43,8 (28vrk)
33. 28vrk	44,19	
34. 91.vrk	46,68	
35. 91vrk	47,09	47,1 (91vrk)
36. 91vrk	47,56	
37. 120vrk	49,00	
38. 120vrk	48,84	48,7 (120vrk)
39. 120vrk	48,12	



## 6.1.2 Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400)

### Tuoremassakokeiden tulokset:

Lämpötila: 16,5 °C

Tuoreesta betonista mitattu ilmamäärä: 1,7 %

Tuoreen betonimassan tiheys: 2345 kg/m<sup>3</sup>

Painuma: 95 mm

### Puristuslujuudet:

#### 20-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
40. 7vrk	50,41	
41. 7vrk	48,02	49,0 (7vrk)
42. 7vrk	48,70	
43. 28vrk	57,69	
44. 28vrk	60,81	60,1 (28vrk)
45. 28vrk	61,68	
46. 91.vrk	67,94	
47. 91vrk	69,25	68,1 (91vrk)
48. 91vrk	67,16	

#### 60-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
49. 7vrk	49,87	
50. 7vrk	48,86	49,5 (7vrk)
51. 7vrk	49,78	
52. 28vrk	52,82	
53. 28vrk	52,84	52,5 (28vrk)
54. 28vrk	51,76	
55. 91.vrk	59,07	
56. 91vrk	57,68	58,2 (91vrk)
57. 91vrk	57,86	

#### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
58. 7vrk	50,65	
59. 7vrk	48,45	49,2 (7vrk)
60. 7vrk	48,64	
61. 28vrk	53,54	

62. 28vrk	53,67	54,4 (28vrk)
63. 28vrk	56,10	
64. 91.vrk	59,50	
65. 91vrk	59,26	59,0 (91vrk)
66. 91vrk	58,28	

### 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
67. 7vrk	47,92	
68. 7vrk	48,67	48,6 (7vrk)
69. 7vrk	49,17	
70. 28vrk	51,93	
71. 28vrk	53,53	52,8 (28vrk)
72. 28vrk	52,96	
73. 91.vrk	58,85	
74. 91vrk	57,90	58,3 (91vrk)
75. 91vrk	58,23	
76. 120vrk	58,48	
77. 120vrk	57,71	58,0 (120vrk)
78. 120vrk	57,91	



### 6.1.3 Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400)

#### Tuoremassakokeiden tulokset:

Lämpötila: 17,5 °C

Tuoreesta betonista mitattu ilmamäärä: 1,8 %

Tuoreen betonimassan tiheys: 2338 kg/m<sup>3</sup>

Painuma: 140 mm

#### Puristuslujuudet:

##### 20-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
79. 7vrk	39,95	
80. 7vrk	39,29	39,7 (7vrk)
81. 7vrk	39,84	
82. 28vrk	56,88	
83. 28vrk	56,87	57,0 (28vrk)
84. 28vrk	57,12	
85. 91.vrk	69,56	
86. 91vrk	65,11	67,4 (91vrk)
87. 91vrk	67,41	

##### 60-asteinen lämpörasitus

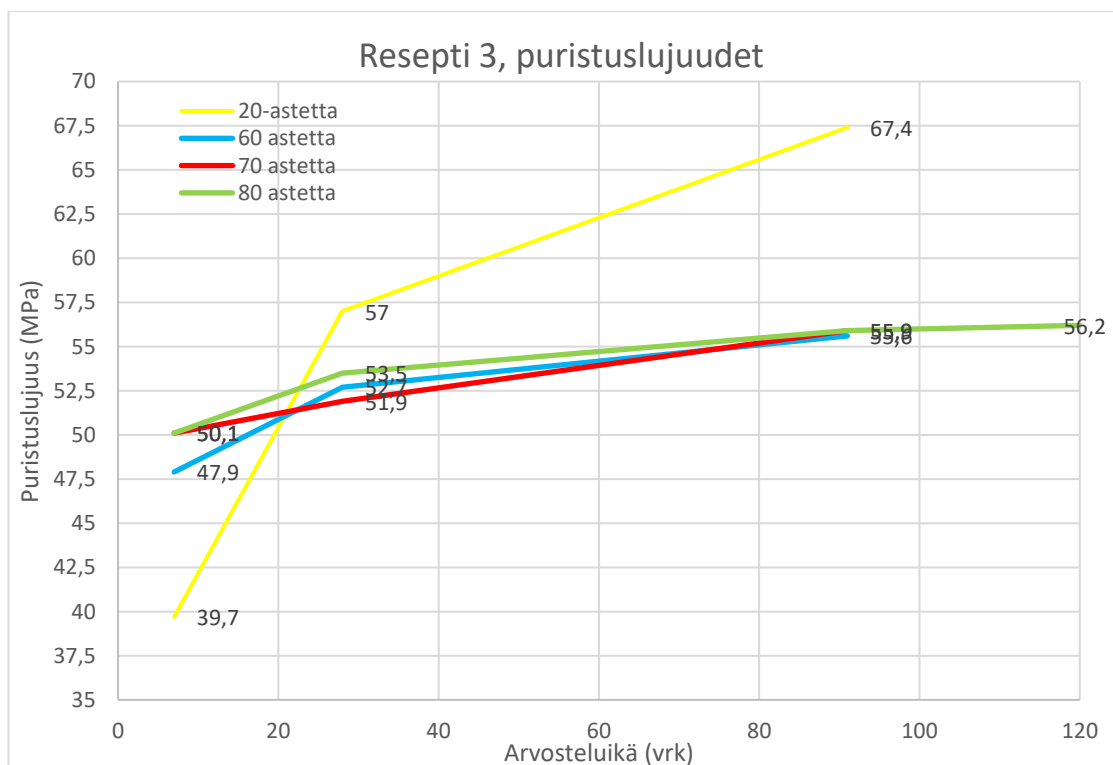
Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
88. 7vrk	48,65	
89. 7vrk	46,98	47,9 (7vrk)
90. 7vrk	47,94	
91. 28vrk	53,35	
92. 28vrk	51,92	52,7 (28vrk)
93. 28vrk	52,68	
94. 91.vrk	56,73	
95. 91vrk	55,95	55,6 (91vrk)
96. 91vrk	54,02	

### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
97. 7vrk	50,45	
98. 7vrk	50,22	50,1 (7vrk)
99. 7vrk	49,71	
100. 28vrk	50,40	
101. 28vrk	52,72	51,9 (28vrk)
102. 28vrk	52,64	
103. 91.vrk	57,41	
104. 91vrk	55,15	55,9 (91vrk)
105. 91vrk	55,03	

### 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
106. 7vrk	50,42	
107. 7vrk	50,05	50,1 (7vrk)
108. 7vrk	49,96	
109. 28vrk	54,15	
110. 28vrk	53,44	53,5 (28vrk)
111. 28vrk	52,86	
112. 91.vrk	55,29	
113. 91vrk	57,13	55,9 (91vrk)
114. 91vrk	55,41	
115. 120vrk	56,59	
116. 120vrk	56,47	56,2 (120vrk)
117. 120vrk	55,57	



#### 6.1.4 Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400)

##### **Tuoremassakokeiden tulokset:**

Lämpötila: 13 °C

Tuoreesta betonista mitattu ilmamäärä: 1,5 %

Tuoreen betonimassan tiheys: 2345 kg/m<sup>3</sup>

Painuma: 190 mm

##### **Puristuslujuudet:**

##### **20-asteinen lämpörasitus**

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
118. 7vrk	25,50	
119. 7vrk	25,70	25,4 (7vrk)
120. 7vrk	25,11	
121. 28vrk	46,50	
122. 28vrk	49,42	48,2 (28vrk)
123. 28vrk	48,74	
124. 91.vrk	61,87	
125. 91vrk	63,10	63,1 (91vrk)
126. 91vrk	64,31	

##### **60-asteinen lämpörasitus**

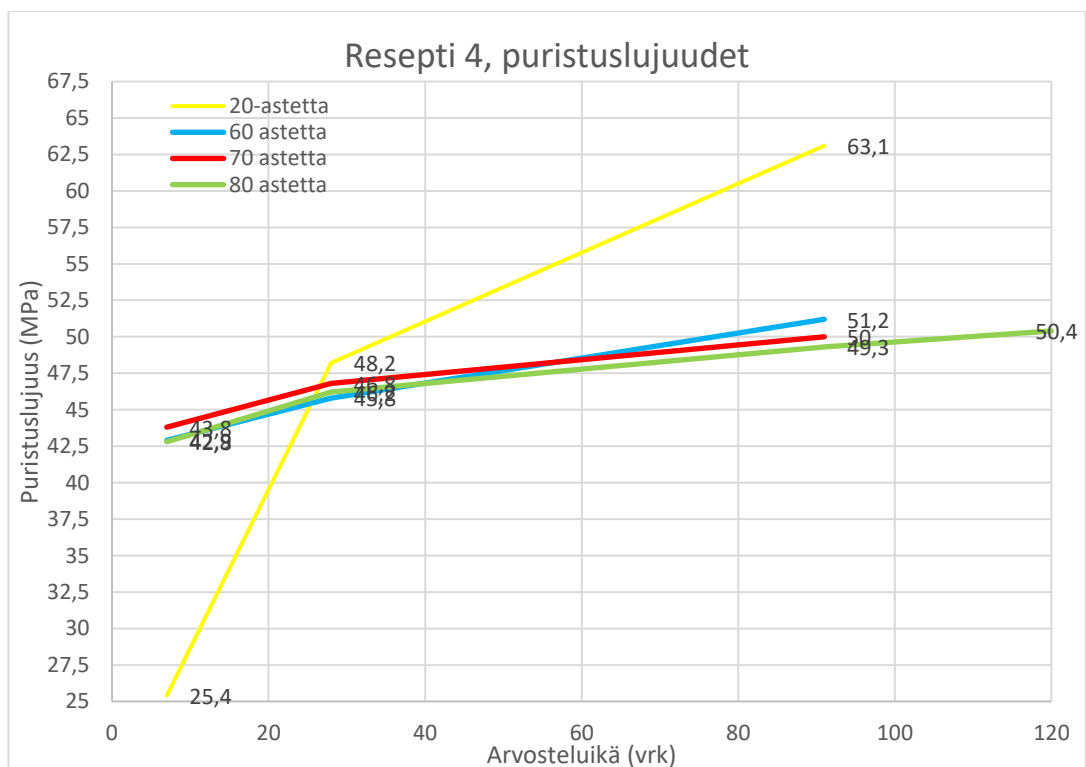
Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
127. 7vrk	42,74	
128. 7vrk	42,49	42,9 (7vrk)
129. 7vrk	43,58	
130. 28vrk	46,90	
131. 28vrk	45,10	45,8 (28vrk)
132. 28vrk	45,44	
133. 91.vrk	50,80	
134. 91vrk	51,78	51,2 (91vrk)
135. 91vrk	51,10	

### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
136. 7vrk	42,44	
137. 7vrk	43,92	43,8 (7vrk)
138. 7vrk	44,89	
139. 28vrk	47,36	
140. 28vrk	46,83	46,8 (28vrk)
141. 28vrk	46,31	
142. 91.vrk	50,14	
143. 91vrk	48,57	50,0 (91vrk)
144. 91vrk	51,32	

### 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
145. 7vrk	42,58	
146. 7vrk	41,26	42,8 (7vrk)
147. 7vrk	44,64	
148. 28vrk	44,55	
149. 28vrk	48,28	46,2 (28vrk)
150. 28vrk	45,85	
151. 91.vrk	50,52	
152. 91vrk	48,69	49,3 (91vrk)
153. 91vrk	48,54	
154. 120vrk	49,66	
155. 120vrk	50,62	50,4 (120vrk)
156. 120vrk	50,83	



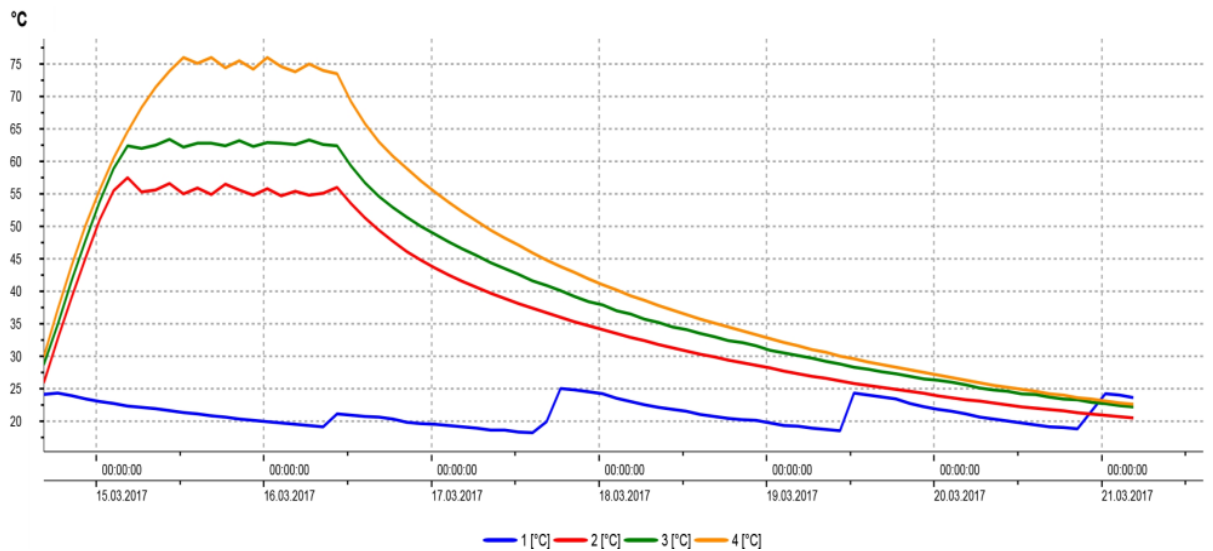


## 6.2 Koekappaleiden lämpörasituskokeiden lämpötilakaaviot

Jokaiselle neljälle reseptille suoritettiin lämpörasituskokeet edellä mainitulla tavalla. Alla nähtävillä lämpötilakäyrät resepteittäin.

### 6.2.1 Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N)

Instrument name: Satakunta 3		21.3.2017 17:08:11			Page	1/1
Start time: 14.3.2017 16:30:00		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values	
End time: 21.3.2017 14:30:00	1 [°C]	18,20	25,00	21,125	-195,0/1000,0	
Measurement channels: 4	2 [°C]	20,50	57,50	36,901	-195,0/1000,0	
Measured values: 84	3 [°C]	22,20	63,40	40,900	-195,0/1000,0	
SN 40705185	4 [°C]	22,60	76,00	45,270	-195,0/1000,0	
Oppari						



**Sininen**= 20-asteinen allas

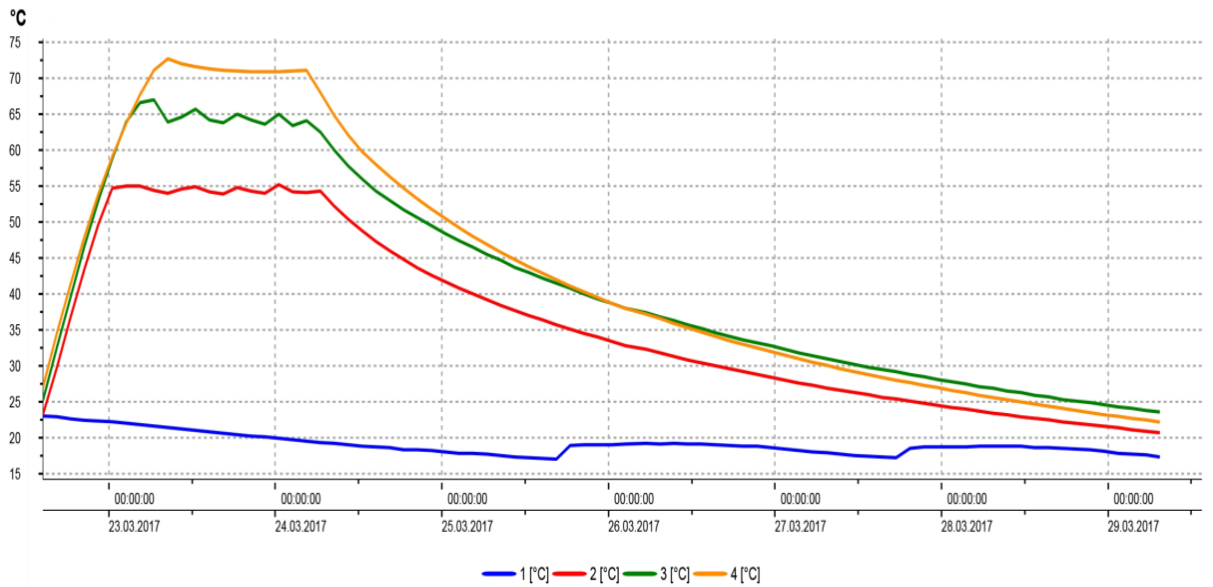
**Punainen**= 60-asteinen allas

**Vihreä**= 70-asteinen allas

**Keltainen**= 80-asteinen allas

## 6.2.2 Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400)

Instrument name: Satakunta 3		29.3.2017 16:47:40			Page 1/1
Start time: 22.3.2017 14:30:00		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values
End time: 29.3.2017 13:30:00	1 [°C]	17,00	23,00	19,077	-195,0/1000,0
Measurement channels: 4	2 [°C]	20,70	55,20	36,073	-195,0/1000,0
Measured values: 84	3 [°C]	23,60	67,00	41,681	-195,0/1000,0
SN 40705185	4 [°C]	22,20	72,70	42,886	-195,0/1000,0
Oppari					



**Sininen**= 20-asteinen allas

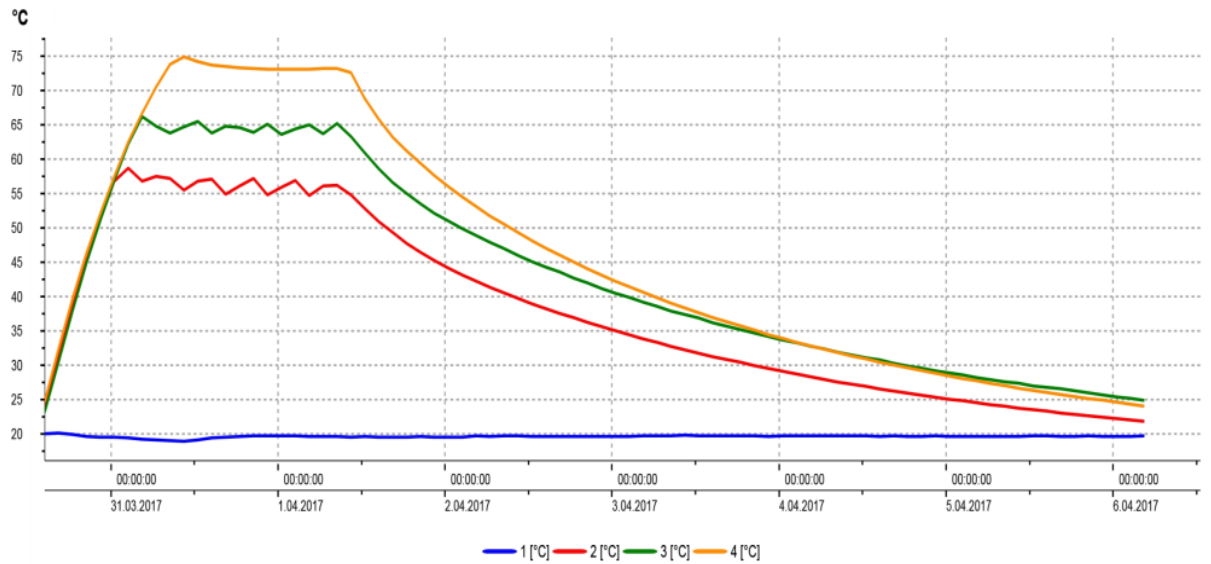
**Punainen**= 60-asteinen allas

**Vihreä**= 70-asteinen allas

**Keltainen**= 80-asteinen allas

### 6.2.3 Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400)

Instrument name: Satakunta 3		6.4.2017 15:08:09			Page	1/1
Start time: 30.3.2017 14:30:00		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values	
End time: 6.4.2017 12:30:00	1 [°C]	18,90	20,10	19,601	-195,0/1000,0	
Measurement channels: 4	2 [°C]	21,80	58,70	37,874	-195,0/1000,0	
Measured values: 84	3 [°C]	23,20	66,20	43,135	-195,0/1000,0	
SN 40705185	4 [°C]	24,00	74,90	45,845	-195,0/1000,0	
Oppari						



**Sininen**= 20-asteinen allas

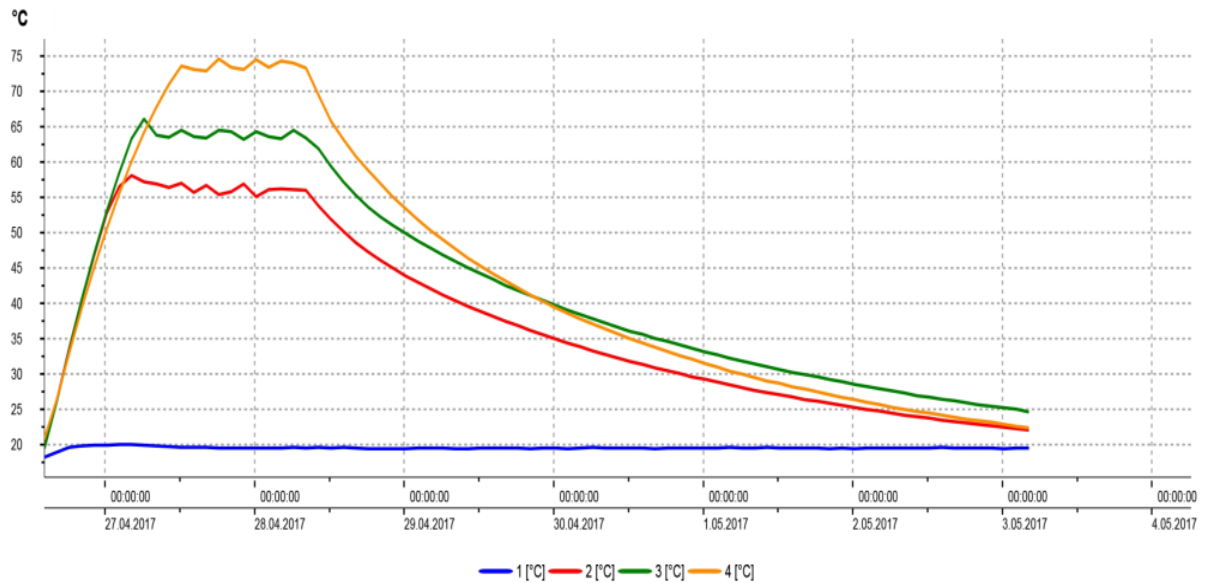
**Punainen**= 60-asteinen allas

**Vihreä**= 70-asteinen allas

**Keltainen**= 80-asteinen allas

## 6.2.4 Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400)

Instrument name: Satakunta 3		4.5.2017 10:07:54			Page	1/1
Start time: 26.4.2017 14:15:00		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values	
End time: 4.5.2017 6:15:00	1 [°C]	18,20	20,00	19,512	-195,0/1000,0	
Measurement channels: 4	2 [°C]	19,70	58,10	37,576	-195,0/1000,0	
Measured values: 93	3 [°C]	19,40	66,10	42,136	-195,0/1000,0	
SN 40705185	4 [°C]	20,80	74,60	43,329	-195,0/1000,0	
Oppari						



**Sininen**= 20-asteinen allas

**Punainen**= 60-asteinen allas

**Vihreä**= 70-asteinen allas

**Keltainen**= 80-asteinen allas

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 7.1 Puristuslujuus lämpörasituskokeiden jälkeen

#### 7.1.1 Resepti 1 (100% CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N) (VERROKKI-resepti)

##### 20-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
1. 7vrk	41,99	
2. 7vrk	41,94	42,2 (7vrk)
3. 7vrk	42,56	
4. 28vrk	50,77	
5. 28vrk	50,83	51,1 (28vrk)
6. 28vrk	51,77	
7. 91.vrk	60,33	
8. 91vrk	60,08	59,9 (91vrk)
9. 91vrk	59,20	

##### 60-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
10. 7vrk	40,87	
11. 7vrk	40,28	40,2 (7vrk)
12. 7vrk	39,50	
13. 28vrk	41,91	
14. 28vrk	43,00	42,7 (28vrk)
15. 28vrk	43,33	
16. 91.vrk	48,37	
17. 91vrk	49,62	48,9 (91vrk)
18. 91vrk	48,79	

##### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
19. 7vrk	41,03	
20. 7vrk	41,26	41,0 (7vrk)
21. 7vrk	40,81	
22. 28vrk	42,93	
23. 28vrk	43,24	43,6 (28vrk)
24. 28vrk	44,73	
25. 91.vrk	48,93	
26. 91vrk	47,04	48,0 (91vrk)
27. 91vrk	47,91	

## 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (Mpa)
28. 7vrk	39,28	
29. 7vrk	40,09	40,2 (7vrk)
30. 7vrk	41,30	
31. 28vrk	44,25	
32. 28vrk	42,88	43,8 (28vrk)
33. 28vrk	44,19	
34. 91.vrk	46,68	
35. 91vrk	47,09	47,1 (91vrk)
36. 91vrk	47,56	
37. 120vrk	49,00	
38. 120vrk	48,84	48,7 (120vrk)
39. 120vrk	48,12	

### 7-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus ei ole aiheuttanut missään lämpötilassa suurta eroa verrattuna 20-asteiseen altaaseen
- eroa tuli maksimissaan -2 MPa
- voidaan todeta, ettei lämpörasitus vaikuta betonin lujuudenkehitykseen ensimmäisen 7 vrk aikana

### 28-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus aiheuttanut huomattavasti eroa varsinkin 20-asteiseen altaaseen verrattuna. Sillä ei niinkään ollut merkitystä, oliko lämpörasitus suoritettu 60°C, 70°C vai 80°C
- suurin ero oli 60°C altaassa verrattuna 20-asteiseen altaaseen, joka oli -8,4 MPa
- lämpörasitus hidastaa selvästi betonin lujuudenkehitystä, mutta olisi mielenkiintoista nähdä missä lämpötilassa niin sanottu hidastuminen tapahtuu. Koska sillä ei näyttänyt olevan paljoakaan merkitystä, oliko allas 60°C vai 80°C.

### 91-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus aiheuttanut huomattavasti eroa, vaikka se on noussut 28 vrk tuloksista. Sama huomio, kuin edellisessä: sillä ei niinkään ole ollut merkitystä onko lämpörasitus ollut 60°C, 70°C vai 80°C
- lujuudenkehityksessä eroa tuli enimillään -12,8 MPa verrattuna 20-asteiseen altaaseen.

- lämpörasitus hidastaa selvästi betonin lujuudenkehitystä, mutta olisi mielenkiintoista nähdä missä lämpötilassa niin sanottu hidastuminen tapahtuu. Koska sillä ei näyttänyt olevan paljoakaan merkitystä, oliko allas 60°C vai 80°C.

#### 120-vrk arvosteluikä:

- 120-vrk koekappale otettiin ainoastaan 80-asteisesta lämpörasitusaltaasta
- verrattuna 91-vrk tulokseen lujuudenkehitys on lähestulkoon pysähtynyt, nousua tapahtunut vain 1,6 MPa
- ajatuksena tästä olisi mielenkiintosta nähdä mitä puristuslujuus olisi esimerkiksi 365 vrk päästä. Onko tapahtunut nousua vai laskua lujuudessa. Ja aiheuttaako lämpörasitus lujuuskatoa

#### 7.1.2 Resepti 2 (75% CEM I 52,5 R / 25% masuunikuona KJ400)

#### 20-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
40. 7vrk	50,41	
41. 7vrk	48,02	49,0 (7vrk)
42. 7vrk	48,70	
43. 28vrk	57,69	
44. 28vrk	60,81	60,1 (28vrk)
45. 28vrk	61,68	
46. 91.vrk	67,94	
47. 91vrk	69,25	68,1 (91vrk)
48. 91vrk	67,16	

#### 60-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
49. 7vrk	49,87	
50. 7vrk	48,86	49,5 (7vrk)
51. 7vrk	49,78	
52. 28vrk	52,82	
53. 28vrk	52,84	52,5 (28vrk)
54. 28vrk	51,76	
55. 91.vrk	59,07	
56. 91vrk	57,68	58,2 (91vrk)
57. 91vrk	57,86	

### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
58. 7vrk	50,65	
59. 7vrk	48,45	49,2 (7vrk)
60. 7vrk	48,64	
61. 28vrk	53,54	
62. 28vrk	53,67	54,4 (28vrk)
63. 28vrk	56,10	
64. 91.vrk	59,50	
65. 91vrk	59,26	59,0 (91vrk)
66. 91vrk	58,28	

### 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
67. 7vrk	47,92	
68. 7vrk	48,67	48,6 (7vrk)
69. 7vrk	49,17	
70. 28vrk	51,93	
71. 28vrk	53,53	52,8 (28vrk)
72. 28vrk	52,96	
73. 91.vrk	58,85	
74. 91vrk	57,90	58,3 (91vrk)
75. 91vrk	58,23	
76. 120vrk	58,48	
77. 120vrk	57,71	58,0 (120vrk)
78. 120vrk	57,91	

#### 7-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus ei ole aiheuttanut missään lämpötilassa suurta eroa verrattuna 20-asteiseen altaaseen
- eroa ei juurikaan tullut, vaan lujuudet pysyivät melkein samoina
- voidaan todeta, ettei lämpörasitus vaikuta betonin lujuudenkehitykseen ensimmäisen 7 vrk aikana

#### 28-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus aiheuttanut eroa varsinkin 20-asteiseen altaaseen verrattuna. Sillä ei niinkään ollut merkitystä, oliko lämpörasitus suoritettu 60°C, 70°C vai 80°C
- suurin ero oli 60°C altaassa verrattuna 20-asteiseen altaaseen, joka oli -7,6 MPa
- lämpörasitus hidastaa selvästi betonin lujuudenkehitystä, mutta olisi mielenkiintoista nähdä missä lämpötilassa niin sanottu hidastuminen



tapahtuu. Koska sillä ei näyttänyt olevan paljoakaan merkitystä, oliko allas 60°C vai 80°C

#### **91-vrk arvosteluikä:**

- lämpörasitus on aiheuttanut eroa, vaikka se on noussut 28 vrk tuloksista. Sama huomio, kuin edellisessä: sillä ei niinkään ole ollut merkitystä onko lämpörasitus ollut 60°C, 70°C vai 80°C
- lujuudenkehityksessä tuli enimillään -9,9 MPa eroa verrattuna 20-asteiseen altaaseen.
- lämpörasitus hidastaa betonin lujuudenkehitystä, mutta olisi mielenkiintoista nähdä missä lämpötilassa niin sanottu hidastuminen tapahtuu. Koska sillä ei näyttänyt olevan paljoakaan merkitystä, oliko allas 60°C vai 80°C

#### **120-vrk arvosteluikä:**

- 120-vrk koekappale otettiin ainoastaan 80-asteisesta lämpörasitusaltaasta
- verrattuna 91-vrk tulokseen lujuudenkehitys on pysähtynyt ja jopa tipunut 0,3 MPa
- ajatuksena tästä olisi mielenkiintosta nähdä mitä puristuslujuus olisi esimerkiksi 365 vrk päästä. Onko lujuuskatoa tapahtunut lisää, vai oliko tuloksessa virhe

### 7.1.3 Resepti 3 (50% CEM I 52,5 R / 50% masuunikuona KJ400)

#### **20-asteinen lämpörasitus**

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (Mpa)
79. 7vrk	39,95	
80. 7vrk	39,29	39,7 (7vrk)
81. 7vrk	39,84	
82. 28vrk	56,88	
83. 28vrk	56,87	57,0 (28vrk)
84. 28vrk	57,12	
85. 91.vrk	69,56	
86. 91vrk	65,11	67,4 (91vrk)
87. 91vrk	67,41	

### 60-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
88. 7vrk	48,65	
89. 7vrk	46,98	47,9 (7vrk)
90. 7vrk	47,94	
91. 28vrk	53,35	
92. 28vrk	51,92	52,7 (28vrk)
93. 28vrk	52,68	
94. 91.vrk	56,73	
95. 91vrk	55,95	55,6 (91vrk)
96. 91vrk	54,02	

### 70-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
97. 7vrk	50,45	
98. 7vrk	50,22	50,1 (7vrk)
99. 7vrk	49,71	
100. 28vrk	50,40	
101. 28vrk	52,72	51,9 (28vrk)
102. 28vrk	52,64	
103. 91.vrk	57,41	
104. 91vrk	55,15	55,9 (91vrk)
105. 91vrk	55,03	

### 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
106. 7vrk	50,42	
107. 7vrk	50,05	50,1 (7vrk)
108. 7vrk	49,96	
109. 28vrk	54,15	
110. 28vrk	53,44	53,5 (28vrk)
111. 28vrk	52,86	
112. 91.vrk	55,29	
113. 91vrk	57,13	55,9 (91vrk)
114. 91vrk	55,41	
115. 120vrk	56,59	
116. 120vrk	56,47	56,2 (120vrk)
117. 120vrk	55,57	

### **7-vrk arvosteluikä:**

- lämpörasitus on nostanut huomattavasti betonin lujuuksia verrattuna 20-asteiseen altaaseen, jopa 10,4 MPa
- voidaan todeta, että tässä vaiheessa 7 vrk kohdalla lämpörasituksesta on ollut hyötyä betonin lujuudenkehitykseen

### **28-vrk arvosteluikä:**

- tässä kohtaa asetelma on kääntynyt niin, että 20 asteinen lämpörasitus on nostanut lujuuttaan paremmin kuin 60°C, 70°C ja 80°C
- lämpörasitus hidastaa betonin lujuudenkehitystä, mutta tässä kohtaa lujuudenkehityksessä ei ole tapahtunut niin paljon eroa kuin aikaisemmillä resepteillä (-5.1 MPa)

### **91-vrk arvosteluikä:**

- lämpörasitus aiheuttanut eroa, vaikka se on noussut 28 vrk tuloksista
- lujuudenkehityksessä tuli enimillään eroa -11,8 MPa verrattuna 20-asteiseen altaaseen
- lämpörasitus hidastaa betonin lujuudenkehitystä, mutta olisi mielenkiintoista nähdä missä lämpötilassa niin sanottu hidastuminen tapahtuu Koska sillä ei näyttänyt olevan paljoakaan merkitystä, oliko allas 60°C vai 80°C

### **120-vrk arvosteluikä:**

- 120 vrk koekappale otettiin ainoastaan 80-asteisesta lämpörasitusaltaasta
- verrattuna 91 vrk tulokseen lujuudenkehitys on lähestulkoon pysähtynyt. Nousua ainoastaan 0,3 MPa
- ajatuksena tästä olisi mielenkiintosta nähdä mitä puristuslujuus olisi esimerkiksi 365 vrk päästä. Onko lujuutta tullut lisää vai onko jopa tullut lujuuskatoa

7.1.4 Resepti 4 (25% CEM I 52,5 R / 75% masuunikuona KJ400)

**20-asteinen lämpörasitus**

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
118. 7vrk	25,50	
119. 7vrk	25,70	25,4 (7vrk)
120. 7vrk	25,11	
121. 28vrk	46,50	
122. 28vrk	49,42	48,2 (28vrk)
123. 28vrk	48,74	
124. 91.vrk	61,87	
125. 91vrk	63,10	63,1 (91vrk)
126. 91vrk	64,31	

**60-asteinen lämpörasitus**

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
127. 7vrk	42,74	
128. 7vrk	42,49	42,9 (7vrk)
129. 7vrk	43,58	
130. 28vrk	46,90	
131. 28vrk	45,10	45,8 (28vrk)
132. 28vrk	45,44	
133. 91.vrk	50,80	
134. 91vrk	51,78	51,2 (91vrk)
135. 91vrk	51,10	

**70-asteinen lämpörasitus**

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
136. 7vrk	42,44	
137. 7vrk	43,92	43,8 (7vrk)
138. 7vrk	44,89	
139. 28vrk	47,36	
140. 28vrk	46,83	46,8 (28vrk)
141. 28vrk	46,31	
142. 91.vrk	50,14	
143. 91vrk	48,57	50,0 (91vrk)
144. 91vrk	51,32	

## 80-asteinen lämpörasitus

Koekappale	Puristuslujuus (MPa)	Keskiarvo (MPa)
145. 7vrk	42,58	
146. 7vrk	41,26	42,8 (7vrk)
147. 7vrk	44,64	
148. 28vrk	44,55	
149. 28vrk	48,28	46,2 (28vrk)
150. 28vrk	45,85	
151. 91.vrk	50,52	
152. 91vrk	48,69	49,3 (91vrk)
153. 91vrk	48,54	
154. 120vrk	49,66	
155. 120vrk	50,62	50,4 (120vrk)
156. 120vrk	50,83	

### 7-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus on nostanut huomattavasti betonin lujuuksia verrattuna 20 asteiseen altaaseen, jopa 17,4 MPa
- voidaan todeta, että tässä vaiheessa 7 vrk kohdalla lämpörasituksesta on ollut huomattavasti hyötyä betonin lujuudenkehitykseen

### 28-vrk arvosteluikä:

- tässä kohtaa asetelma on kääntynyt niin, että 20 asteinen lämpörasitus on nostanut lujuuttaan paremmin kuin 60°C, 70°C ja 80°C
- lämpörasitus hidastaa betonin lujuudenkehitystä, mutta tässä kohtaa lujuudenkehityksessä ei ole tapahtunut niin paljon eroa kuin aikaisemmillä resepteillä (-2,4 MPa)

### 91-vrk arvosteluikä:

- lämpörasitus aiheuttanut eroa, vaikka se on noussut 28 vrk tuloksista
- lujuuskatoa tuli enimillään -13,8 MPa verrattuna 20 asteiseen altaaseen
- lämpörasitus hidastaa betonin lujuudenkehitystä, mutta olisi mielenkiintoista nähdä, missä lämpötilassa niin sanottu hidastuminen tapahtuu Koska sillä ei näyttänyt olevan paljoakaan merkitystä, oliko allas 60°C vai 80°C

### **120-vrk arvosteluikä:**

- 120 vrk koekappale otettiin ainoastaan 80-asteisesta lämpörasitusaltaasta
- verrattuna 91 vrk tulokseen lujuudenkehitys on lähestulkoon pysähtynyt. Nousua ainoastaan 1,1 MPa
- ajatuksena tästä olisi mielenkiintosta nähdä, mitä puristuslujuus olisi esimerkiksi 365 vrk päästä. Onko lujuutta tullut lisää vai onko lämpörasitus aiheuttanut jopa lujuuskatoa

## **8 YHTEENVETO**

Jokaisessa neljässä eri reseptissä lämpörasituksella oli vaikutusta puristuslujuuteen. 20-asteinen lämpörasitus, joka on koekappaleen suositeltu säilytyslämpötila kehitti jokaisessa reseptissä lujuutta hyvin ja tasaisesti, niin kuin oli oletettu.

60°C, 70°C ja 80°C lämpörasitus aiheutti resepteille 1 ja 2 lujuudenkehityksen hidastumista jo alusta asti. Kun taas resepteille 3 ja 4 lujuudenkehityksen muutosta alkoi tapahtumaan vasta noin 28 vrk kohdalla.

Mielenkiintoinen huomio tuli, kun koetta suoritettiin resepteille 3 ja 4. Näissä tapauksissa lämpörasituksesta oli suurta hyötyä varhaislujuuden kehityksessä. Näiden reseptien puristuslujuus 7vrk kohdalla oli huomattavasti parempi kuin 20°C lämpörasitukseen verrattuna. Käännekohta lujuuden kehityksessä tapahtui noin 28 vrk kohdalla, jolloin se alkoi hidastumaan, niin kuin resepteissä 1 ja 2. Lujuuden kehittyminen hidastui melko paljon verrattuna 20°C-altaaseen jokaisessa neljässä reseptissä, niin kuin lämmönkehityskaavioissa on huomattavissa.

Edellä mainittuun varhaislujuuden hyvään kehitykseen syynä on varmasti ollut masuunikuonan hyvät lämpöominaisuudet. Masuunikuona tasaa ja alentaa betonin lämmönkehitystä, joten varhaislujuuden nopea kehittyminen johtuu osaltaan siitä.

Resepteissä 3 ja 4 käytettiin paljon masuunikuonaa ja masuunikuonan tiedetään kehittävän loppulujuuttaan kauemmin verrattuna sementtiin, joten olisi ollut hienoa valmistaa vielä koekappale molemmista resepteistä ja testata niiden puristuslujuus esimerkiksi 365 vrk päästä. Näin saataisiin selville aiheuttaako lämpörasitus suorastaan lujuuskatoa resepteille.

Tämän tutkimuksen tulokset eivät todista sitä, että lämpörasitus aiheuttaisi lujuuskatoa. Mutta se voidaan todeta, että lämpörasitus aiheuttaa lujuudenkehityksen hidastumista jokaisessa neljässä eri reseptissä. Puristuslujuuksien tulokset eivät ole niin hyviä, mitä kaikkien neljän reseptin 20°C asteisen lämpörasituksen saaneet koekappaleet ovat.

#### 8.1 Jatkotutkimusehdotus:

Lämpörasituskokeet olisi mielenkiintoista tehdä isommilla lämpötilaeroväleillä. Esimerkiksi 30°C, 50°C ja 80°C. Tämä voisi antaa hieman paremmin kuvaa siitä, milloin lujuudenkehityksessä alkaa tapahtumaan selviä eroja sekä alkaako lujuudenkehityksessä näkymään eroja alemmilla lämpörasitusasteilla.

Mielestäni koekappaleita tehtiin sopiva määrä ja koe oli luotettava, mutta mielenkiintoisena lisänä arvostuiät osioon voisi lisätä 182 vrk, 365 vrk ja mahdollisesti myös 730 vrk. Tämä mahdollistaisi pidemmän ajan seurannan siitä, kehittääkö betonin altistuminen korkeille lämpötiloille lujuuskatoa vai pelkästään sen hidastumista/pysähtymisen.

## LÄHTEET

Betonitekniikan oppikirja 2004

Betoni www-sivut. 2019. Viitattu 14.1.2019. <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/>

Betoni www-sivut. 2019. Viitattu 17.1.2019. <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/>

Betoni www-sivut. 2019. Viitattu 18.1.2019. <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/>

Betoni www-sivut. 2019. Viitattu 29.1.2019. <http://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/lisaaineet/>

Finnsementti www-sivut. 2019. Viitattu 18.1.2019. <http://www.finnsementti.fi/sementti>

Finnsementti www-sivut. 2019. Viitattu 18.1.2019. <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/seosaineet-ja-silikajauheet/masuunikuonajauhe-kj400>

Finnsementti www-sivut. 2019. Viitattu 29.1.2019. <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/parmix-lisaaineet/huokostimet>

Finnsementti www-sivut. 2019. Viitattu 29.1.2019. <http://www.finnsementti.fi>

Rudus Oy www-sivut. 2019. Viitattu 14.1.2019. <https://www.rudus.fi/rudus-yrityksena/toiminta>

Rudus Oy www-sivut. 2019. Viitattu 15.1.2019. [www.rudus.fi/Download/23937/Betonityomaohje.pdf](http://www.rudus.fi/Download/23937/Betonityomaohje.pdf)

Rudus Oy www-sivut. 2019. Viitattu 12.2.2019. [www.rudus.fi/Download/23937/Betonityomaohje.pdf](http://www.rudus.fi/Download/23937/Betonityomaohje.pdf)

Rudus Oy www-sivut. 2019. Viitattu 15.2.2019. [www.rudus.fi/Download/23937/Betonityomaohje.pdf](http://www.rudus.fi/Download/23937/Betonityomaohje.pdf)

Semtu www-sivut. 2019. Viitattu 29.2.2019. <http://www.semtu.fi/fi/tuotteet/betonin-lisa-aineet/notkistimet-2-2/>

Suomen Betoniyhdistys 2004

SFS-EN 12350-2 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 12350-6 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 6: Tiheys. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.



SFS-EN 12350-7 2009. Tuoreen betonin testaus. Osa 7: Ilmamäärä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.