



SANNA LÄHTÖLÄ

# **Muottikierron optimointi talvibetonoinnissa**

CASE ARKKUKALLIO

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN  
TUTKINTO-OHJELMA  
2023

## TIIVISTELMÄ

Lähtölä, Sanna: Muottikierron optimointi talvibetonoinnissa – case Arkkukallio  
Opinnäytetyö, AMK  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma  
Toukokuu 2023  
Sivumäärä: 44

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia paksujen maanvaraisten betonilaattojen lujuudenkehitystä talviolosuhteissa ja tutkia voidaanko jollakin tietyllä jälkihoitomenetelmällä nopeuttaa lämmön- sekä lujuudenkehittymistä. Lujuudenkehityksen tarkastelukohta oli se ajanhetki, jolloin saavutetaan betonissa riittävä lujuus muottien purkua varten. Työn tilaajana oli Destia Oy.

Työssä käsiteltiin talvibetonointia, siihen varautumista sekä mitä betonille tapahtuu, mikäli jäätymslujuus ei ole täytynyt. Työssä tutkittiin kolmen eri laatan betonin kehittymislämpötiloja. Jälkihoitomenetelmiksi valikoitui lämmitettävät routamatot, lämmöneriste ja kevytpeite sekä kovetinkaapeli laatan ulkoreunalla. Betonin lämpötilojen perusteella laskettiin betonin muotinpurkulujuus kypsyysien perusteella.

Kovetinkaapelin käytöllä ei ollut huomattavaa vaikutusta valettaessa suurta laattaa. Muotinpurkulujuus saavutettiin nopeimmin lämmitettävillä routamatoilla, mutta hyvällä eristepeittelyllä saatiin tulokseksi vain tunti pidempi aika, jolloin muotinpurkulujuus täyttyy. Työssä tutkittiin myös laattojen lujuus kimmovasarakoestuksella 21 vuorokauden jälkeen. Kimmovasarakoestus tuki laskelmia ja huomioitiin jälkihoidon tarpeellisuus, mikäli kaivantojen täyttö ei voisi odottaa kauan.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan tulevaisuudessa käyttää suuntaa antavana ohjeena suunniteltaessa talvibetonointia paksuihin maanvaraisiin laattoihin.

Avainsanat: talvibetonointi, Sadgrove, lujuudenkehitys, muotinpurkulujuus

## Abstract

Lähtölä, Sanna: Optimisation of the mould cycle in winter conditions - case Arkkukallio

Bachelor's thesis

Degree programme: Construction and municipal engineering

May 2023

Number of pages: 44

The subject of the thesis was to research the development of the strength of thick ground based concrete slabs in winter conditions and to research whether a certain aftercare method can speed up the development of heat and strength. The point of research was the time in when the sufficient strength in concrete for the dismantling of moulds is achieved. Ordered by Destia Oy.

The work covered concreting in winter condition, preparation for it and what happens to concrete if the freezing strength has not been met. The work studied the development temperatures of three different tiles of concrete. After-treatment methods were selected for heated scrap mats, heat insulation and light cover, as well as a hardening cable at the outer edge of the slab. Based on concrete's temperature, the concrete's mould extrusion was calculated on the basis of ripeness.

The use of the hardening cable had no significant effect on the casting on a large slab. Demold strength was achieved the fastest with the heated scrap mats, but with good insulation cover it was only an hour longer when the demold strength was achieved. The work also examined the strength of the plates with an impact hammer test after 21 days. The impact hammer test supported the calculations and the need for aftercare was considered if filling the trenches could not wait long.

The results of the thesis can be used in the future as guidance in planning winter concrete for thick underground slabs.

Keywords: winter concreting, Sadgrove, stronger development, demoulding strength

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Destia Oy:tä ja ohjaajaani Kimmo Harjua opinnäytetyön mahdollistamisesta. Erityiskiitos rakennusammattihenkilöille, jotka olivat valassa kanssani tutkimani kohteet. 12.5.2023 Sanna Lähtölä

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	6
2 TALVIBETONOINTI .....	7
2.1 Lujuuden tarkastelu .....	7
2.1.1 Jäätymislujuus .....	8
2.1.2 Muotinpurkulujuus.....	9
2.1.3 Nimellislujuus.....	9
3 LUJUUDENKEHITYS .....	10
3.1 Sadgroven kaava .....	11
4 JÄÄTYMISESTÄ JOHTUVAT VAURIOT .....	12
5 LAADUNVARMISTUS .....	13
5.1 Talvibetonointisuunnitelma .....	13
5.2 Jälkihoito .....	14
6 TUTKITTAVA KOHDE JA TUTKIMUSMENETELMÄ.....	15
6.1 Dataloggeri Testo 176 T4 .....	16
6.2 Jälkihoitomenetelmät.....	17
6.2.1 Routaeriste ja kevytpeite .....	17
6.2.2 Lämmitettävät routaeristeet .....	18
6.2.3 Kovetinkaapeli .....	18
6.3 Kimmovasara lyhyesti.....	20
7 TUTKIMUSPÄIVÄ.....	21
8 LÄMPÖTILAMITTAUKSET .....	23
8.1 Routaeriste ja kevytpeite .....	23
8.2 Lämmitettävät routaeristeet .....	23
8.3 Kovetinkaapeli .....	24
8.4 Lämpötilamittausten vertailu.....	25
9 SAAVUTETTU MUOTINPURKULUJUUS.....	26
9.1 Muotinpurkulujuuden laskenta.....	26
9.2 Lujuuden kehitys .....	29
10 LUJUUSKOESTUS KIMMOVASARALLA.....	30
10.1 Mittaustulokset ja niiden analysointi .....	30
10.2 Mittaustulosten arviointi .....	31
11 POHDINTA, JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET .....	33
LÄHTEET .....	35
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Työn tavoitteena on tutkia jälkihoitotoimenpiteitä, joilla voidaan vaikuttaa suurten maanvaraisten betonilaattojen muottikiertoon talvibetonointikautena. Tarkoituksena ei ole muuttaa suunnittelijan suunnitelmia, vaan huomioida työmaaolosuhteissa tehtäviä mahdollisia keinoja.

Betonointityössä on tärkeää varmistaa, että massa lähtee kehittämään lämpöä, jotta edellytykset lujuudenkehitykselle tapahtuu. Betonin lujuudenkehitys on siis riippuvainen betonin lämpötilasta. Suurissa valuissa betonimassa tuottaa itsenäisesti tarvitsemansa lämmön myös talvikautena mutta jälkihoitotoimenpiteillä täytyy varmistaa, että lämpö pysyy rakenteessa eikä rakenne pääse jäähtymään. Kantamattomien rakenteiden muotinpurkulujuus on 5 MPa, edellyttäen, että minkäänlaista rasiusta ei rakenteelle tule sillä hetkellä. Opinnäytetyössä halutaan nimenomaan tutkia tätä ajanhetkeä, sillä esim. infra-alalla on hyvin tyypillistä, että samankaltaisia laattavaluja on työnalla ns. sarjatuotantona. Lujuudenkehitys tutkitaan lämpötilamittauksilla, joka toteutetaan mittaukset tallentavalla dataloggerilla ja analysoidaan Sadgroven kaavaa apuna käyttäen.

## 2 TALVIBETONOINTI

Suomessa katsotaan talven alkaneeksi, kun vuorokauden keskilämpötila pysyy alle 0 celsiusasteen. Etelässä saattaa olla monia pitkiä leutoja ajanjaksoja, jolloin se yleensä tietää vettä, räntää sekä kovaa tuulta. Plusasteiset päivät eivät kuitenkaan katkaise termistä talvea. Terminen talvi alkaa Satakunnassa pääasiallisesti marraskuun puolivälin – joulukuun alun paikkeilla (Ilmatieteenlaitos, 2023)

Betonointi määritetään talvibetonoinniksi, kun lämpötila laskee vuorokauden aikana alle +5 °C:n. Suomen olosuhteissa talvibetonointikausi kestää seitsemästä yhdeksään kuukauteen, joten määritelmänä talvibetonointi alkaa paljon ennen termisen talven alkua. Betoni vaatii sopivat lämpöolosuhteet, jotta massan kemiallinen reaktio voi alkaa ja näin ollen voi saavuttaa haluttavat lujuudet. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018, s. 492)

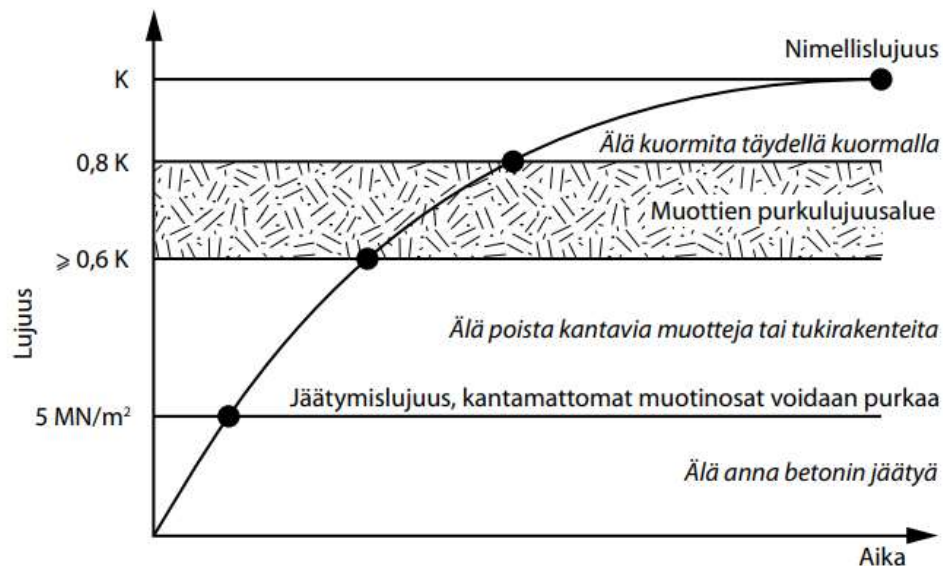
Betonimassan kemiallinen reaktio alkaa siitä, kun raaka-aineista vesi ja sementti sekoitetaan. Sementti alkaa reagoida ja muodostaa sementtiliimaa, eli tapahtuu hydrataatioreaktio. Hydrataatioreaktion sivutuotteena syntyy lämpöä. Hydrataatioreaktion seurauksena sementtiliima alkaa menettää plastisuuttaan ja massa alkaa kovettua. Kovettumisreaktiota kutsutaan myös sitoutumiseksi. Sitoutumisvaiheessa alkaa betonin lujuudenkehitys. Kylmässä valettaessa betonin hydrataatioreaktio voi olla hidasta ja voi aiheuttaa jopa lujuuskatoa. Oikein kovissa pakkaslukemissa betonointitöitä ei tule tehdä. Onnistuneen betonivalun edellytyksenä, on se, että betonimassan lämpötila pysyy +20 °C - +40 °C valun aikana sekä valun jälkeen vähintään siihen asti, kun jäätymislujuus 5 MPa:ia on saavutettu. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018, s. 35)

### 2.1 Lujuuden tarkastelu

Betonilla on hyvä puristuslujuus ja se on betonin tärkein laadunvarmistuskriteeri. Betonin laatu ilmaistaan lujuusluokalla ja nimellislujuudella. Betoni voi

olla esimerkiksi laadultaan lujuusluokassa C30/37. Laadun ensimmäinen numero tarkoittaa lieriölujuutta eli koekappale on lieriö sekä toinen luku kuutiolujuutta eli tällöin koekappale on kuutio. Esimerkin laadun nimellisljuuus on lieriössä 30 MPa. Nimellisljuuudella kuvataan rakenteen vaatima puristuslujuuus. Suomessa standardien mukaisesti koekappaleet tutkitaan kuutiolujuuksina. Koekappaleista määritetään puristuslujuuus 28 päivän ikäisenä ja se ilmoitetaan megapascaleina. (Finnsementti, 2023)

Betonin valamisessa on talvella kolme merkittävää tarkastushetkeä; jäätymisljuuus, muotinpurkuljuuus ja nimellisljuuus. Ljuuuden arvioinnissa voidaan käyttää erilaisia tietokonesovelluksia tai Sadgroven kaavaa. (Sahlsted, ym., Talvibetonointi, 2014, s. 17) Kuvassa 1 on havainnollistettu rakenteelle sallitut kuormitukset ljuuudenkehityksen eri vaiheissa.



Kuva 1: Kuormituskestävyys ljuuudenkehityksen eri vaiheissa (Talvibetonointi)

### 2.1.1 Jäätymisljuuus

Jäätymisljuuus tarkoittaa sitä ljuuutta, jonka jälkeen betoni kestää jäätymisen vaurioitumatta. Jäätymisljuuus on kaikissa betonilaaduissa sekä ljuuusluokissa sama, 5 MPa. Mikäli betoni jäätyy ennen 5 MPa:in ljuuutta, voi se aiheuttaa ljuuskatoa. Ljuuskato aiheutuu betonissa olevan veden jäätyessä,



jolloin vesi laajenee ja laajentuessaan aiheuttaa rasituksia betonin sisällä. (Sahlsted, ym., Talvibetonointi, 2014, s. 17)

### 2.1.2 Muotinpurkulujuus

Maanvaraisten laattojen muotinpurkulujuutena voidaan pitää myös 5 MPa:ia, kunhan rakenne kestää sille tulevat rasitukset ja muodonmuutokset ovat minimaaliset (Sahlsted, ym., Talvibetonointi, 2014). Huomioitavaa on, että kuormitettaessa täytyy betonin olla kovettunut 80 % nimellislujuudesta. (Sahlsted, ym., Talvibetonointi, 2014, s. 18) Opinnäytetyössä tutkittavien perustuksien kaivannontäyttöjä ei siis saa tehdä ennen kuin betonin lujuus on täyttänyt 80 % nimellislujuudesta.

### 2.1.3 Nimellislujuus

Nimellislujuus valitaan rakenteen vaatiman puristuslujuuden perusteella ja toimii rakennussuunnitelmien perustana (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018, s. 493). Nimellislujuus koestetaan laboratoriossa koekappaleesta puristamalla 28 vuorokauden iässä. Puristuslujuuden määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 13791:n mukaisesti testauslaboratoriossa. Myös testauskoneelle on määritetty tarkat standardit, jotka ovat määritetty standardissa SFS-12390-4. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2021, s. 96)

### 3 LUJUUDENKEHITYS

Jotta betonin ainesosat voivat alkaa sitoutua ja kehittämään lujuutta, vaaditaan lämpöä. Betoni itsessäänkin reagoidessaan tuottaa lämpöä, mutta ympäristöolosuhteet vaikuttavat kuinka nopeasti massan lämpötila kehittyy ja toisaalta myös, kuinka nopeasti massa jäähtyy. Betonin ihanteellisin kovettuminen tapahtuu vähintään +20 °C lämpötilassa, mutta kovettuu ja kehittyy myös viileämmässäkin olosuhteessa. Kesällä lämpimällä lujuudenkehitysreaktiot nopeutuvat ja talvella päinvastaisesti hidastuvat. Massa saattaa jäähtyä betonoinnin aikana, mutta jälkihoitotoimenpiteillä voidaan varmistaa lämmönkehitys. Lämpötila ei kuitenkaan saa nousta liian korkeaksi, sillä myös tällöin on riski, että rakenteeseen syntyy lujuuskatoa sekä säilyvyys voi heiketä. Lämpötilan tulisi pysyä alle +60 °C. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018, s. 496)

Mikäli massan lämpötila pysyisi tasaisena +20 asteessa, tällöin tavoitelujuus saavutettaisiin 28 vuorokauden kuluttua. Suositeltava kovettumislämpötila on +30 - +40 °C. (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018, s. 497) Taulukossa 1 on esitetty betonin kovettumiseen teoreettisesti tarvittava aika eri lämpötiloissa.

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

Taulukko 1 (Betonitekniikan oppikirja)

### 3.1 Sadgroven kaava

Sadgroven kaavalla voidaan laskea betonin lämpötilan perusteella lujuudenkehitystä ja sitä käytetään silloin, kun halutaan määrittää muotinpurkuhetki tai riskit halkeilun mahdollisuudelle. Sadgroven kaavalla ei kuitenkaan oteta huomioon betonin koostumusta eikä mahdollisia seosaineita. Sadgroven kaavaa ei voida käyttää alle -16 °C lämpötilassa. (Betonitieto.fi, 2023)

Sadgroven kaavalla lasketaan betonin kypsyttä eli kumulatiivista ikää. Lämpötilamittauksilla todetaan betonin keskilämpötila tunneittain ja tästä lasketaan kumulatiivista ikää alla olevan kaavan mukaisesti. Kumulatiivinen ikä vaikuttaa olennaisesti muotinpurkuun ja muottikiertoon. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s. 92)

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

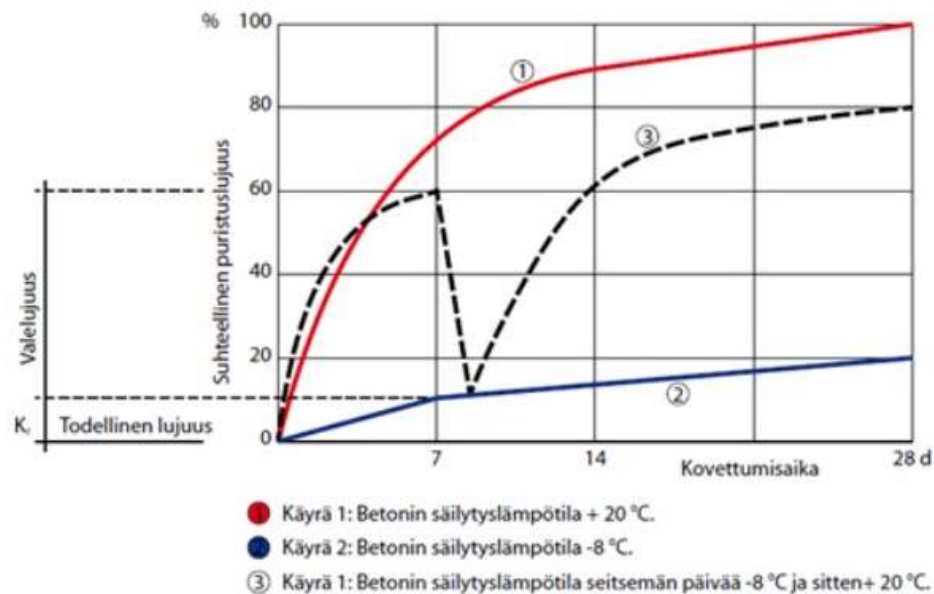
*T = betonin lämpötila aikana t [°C]*

*t = kovettumisaika vrk [d]*

## 4 JÄÄTYMISESTÄ JOHTUVAT VAURIOT

Betonin jäätymisellä tarkoitetaan betonin massassa olevan veden jääymistä. Vesi jäätyessään laajenee noin 9 % ja laajentuessaan aiheuttaa rasituksia betoniin. Mikäli betonin lujuus ei ole täyttänyt 5 MPa lujuutta, vaurioituu se pysyvästi. (Betonitieto, 2023)

Betonin jäätyminen seurauksena on vajaa loppulujuus sekä betonin muiden ominaisuuksien heikkeneminen. Kuvassa 2 on tutkimuksellinen vertailu, miten betonin lujuudenkehitys käyttäytyy betonin jäätyessä. Käyrässä 3 on betoni pakastettu suoraan valun jälkeen, jolloin vesi pääsee jäätymään ennen jäätymlujuuden täyttymistä. Näyttää, että lujuudenkehitys on nopeaa, mutta todellisuudessa jäätyneet vesi aiheuttaa valelujuutta. Koekappaleen sulatuksen jälkeen puristuslujuus voi olla jopa 10–20 MPa pienempi kuin oletettu. (Betonitieto.fi, 2023)



Kuva 2: Tutkimus jäätyksen vaikutuksesta lujuudenkehitykseen. (Betoniteknikan oppikirja)

## 5 LAADUNVARMISTUS

### 5.1 Talvibetonointisuunnitelma

Talvibetonoinnit tulee suunnitella hyvin ja hyvissä ajoin, etenkin lämmitys- ja suojausmenetelmät, joilla voidaan varmistaa betonoinnin onnistuminen. Menetelmään vaikuttaa betonoitavan kohteen sijainti, koko, sääolosuhteet, muotitjärjestelmä etc. Taulukossa 2 on ohjekortti, jossa on esitetty huomioitavat asiat, joilla voidaan varmistaa talvibetonoinnin onnistuminen.

Talvibetonoinnissa on tärkeää huomioida, että sääolosuhteet voi muuttua radikaalistikin. Betonivalu on tehtävä oikeissa olosuhteissa, jotta voidaan välttää lujuskadolta. Betonimassan tulee pysyä yli +10 asteen sitoutumisen alkuun asti, ja sillä voidaan varmistaa, että betonin lujuudenkehitys käynnistyy ja massa alkaa tuottamaan lämpöä. (Rudus, 2023)

Vaikka terminen talvi alkaa Etelä-Suomessa aikaisimmillaan lokakuun puolivälin jälkeen, on silti talvibetonointitoimenpiteisiin ryhtyä jo lämpötilan laskeessa alle +5°C:een. Sementin ja veden reaktiot hidastuvat merkittävästi alhaisissa lämpötiloissa ja näin ollen vaikuttaa lujuudenkehitykseen ja muotinpurkulujuuteen negatiivisesti. (Mannonen, 2004)

Alue	Toimenpiteet
Työsisältö	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selvitetään kohteen koko, rakenteiden vahvuudet ja rakenteelle asetetut vaatimukset.</li> <li>• Suunnitellaan työsaumojen sijoitus.</li> <li>• Tehdään alustava betonilaatujen valinta muottikiertovaatimusten perusteella (muotinpurkulujuuden saavuttaminen eri valuolosuhteissa lämmitys ja suojaus huomioiden).</li> <li>• Varaudutaan häiriöihin.</li> </ul>
Muotit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suunnitellaan muottikierto ja sen yhteensopivuus työaikataulujen kanssa.</li> <li>• Tarkistetaan muottikaluston riittävyys suunniteltuun muottikiertoon nähden.</li> <li>• Määritetään betonin vaadittavat muotinpurkulujuudet rakenneosittain.</li> <li>• Suunnitellaan muottien tuenta ja purkujärjestys sekä rakenteiden tuenta muottien poiston jälkeen.</li> </ul>
Suojaus ja lämmitys	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vertaillaan lämmitys- ja suojausvaihtoehtoja ja niiden soveltuvuutta työkohteeseen. Otetaan huomioon työmäärän, energian kulutukset ja energian hinta.</li> <li>• Selvitetään rakenteiden, muottien sekä suojausten yhteensopivuus lämmityksen kanssa.</li> <li>• Varataan tarvittava määrä lämmitys- ja suojauskalustoa. Varaudutaan myös äkillisiin sääolosuhteiden muutoksiin ja konerikkoihin.</li> <li>• Suunnitellaan lämmitys ja lämpötilaseuranta.</li> </ul>
Kalusto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selvitetään tarpeelliset laitteisto- ja tarvikkehankinnat.</li> </ul>
Työntekijät	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suunnitellaan henkilökunnan koulutus- ja opastustoimenpiteet ja niiden toteutus.</li> </ul>

*Taulukko 2: Betonointisuunnitelmassa huomioitavat asiat (Talvibetonointi)*

## 5.2 Jälkihoito

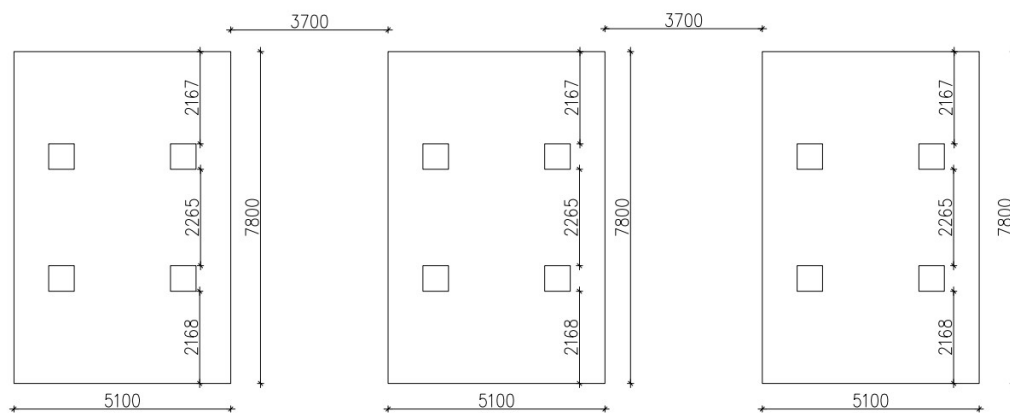
Betonin jälkihoidolla tarkoitetaan valupinnan suojaamista, jotta saavutetaan betonin halutut ominaisuudet. Talviolosuhteissa suojaaminen tapahtuu valupinnan suojaamisella ja/tai lämmittämällä. Suurissa valuissa pyritään ehkäisemään suuret lämpötilaerot rakenteen eri osissa. (Suomen betoniyhdistys ry, 2021)

Betonissa liian nopea kuivuminen voi aiheuttaa halkeilua betonipinnalla. Talviolosuhteissa liian nopeaa kuivumista estetään pinnan kunnollisella peittelyllä eikä vettä käytetä suuren jäätymisvaaran vuoksi. Myös lujuudenkehitys voi vaarantua liian alhaisessa lämpötilassa. (Sahlsted, ym., Talvibetonointi, 2014, s. 62)

Jälkihoitotapoja on monenlaisia, lämmitettävistä muoteista sääsuojiin ja erilaisiin lämmittämiin. Pääasiallisesti yli 0°C lämpötilassa riittää kunnollinen peittely, mutta lämpötilan ollessa pakkasella, täytyy varautua lisälämmittämiin. (Sahlsted, ym., Talvibetonointi, 2014, s. 42)

## 6 TUTKITTAVA KOHDE JA TUTKIMUSMENETELMÄ

Kohteessa rakennetaan 400 kV ja 110kV:n voimalinjoja. Kaikkiaan paikallavaltavissa perustuksissa oli kuusi kappaletta, joista kaksi on 110kV linjoja. 110 kV perustuksissa on kolme identtistä laattaa peräkkäin. Kyseiset laatat ovat 600 mm paksut ja perustamissyvyys -2.7 m maanpinnasta sekä betonimassamäärä oli 23,9 m<sup>3</sup> per laatta. Perustuspaikka oli hieman kallioinen. Perustuspaikkaan ei valunut vesiä ympäristöstä ja kaivanto pysyi kuivana.



*Kuva 3: Rakennepiirustus (Sanna Lähtölä)*

Tutkittavassa kohteessa betoni on C30/37, rasitusluokassa XC2 ja betonin toimittaja Rudus Oy. Tutkimus suoritettiin molemmissa 110 kV perustuksissa. Tutkimuksessa tutkittiin betonin lämpötilaa ja tästä muodostuvaa lujuudenkehitystä. Työn tavoitteena oli saada tietoa, voidaanko jollain tietyllä jälkihoitomenetelmällä nopeuttaa muotinpurkua ja näin ollen nopeuttaa muottikiertoa. Perustuslaattojen betonointi tehtiin samana valukertana, jälkihoitona käytettiin eri menetelmiä ja jokaiseen asennettiin omat lämpömittauslangat. Lämpötilat tallennettiin dataloggerilla ja tämän jälkeen analysoitiin Sadgroven kaavaa apuna käyttäen.

Tutkimuksessa haasteena oli kohteen sijainti ja tarvittava sähkö tuotettiin agrikaatein. Agrikaattien polttoainemäärä oli arvioitu siten, että sähköllä toimivat jälkihoitomuodot lämmittävät noin 12 tuntia.

## 6.1 Dataloggeri Testo 176 T4

Testo 176 T4 dataloggerilla voidaan mitata neljää mittaustulosta samanaikaisesti. Dataloggeriin sopii kolme eri liitintyyppiä, J-, K-, ja T tyypit ja mittaus tapahtuu termolangalla. Mittauksien tarkkuus on 0.1°C tarkkuudella. Dataloggeri voi tallentaa yhteensä kaksi miljoonaa mittaustulosta omaan muistiin, mutta loggerissa on myös paikka muistikortille. Mittaustulokset voidaan ottaa 1 sekunnin – 24 tunnin välein. Laite on myös IP54 eli pölyn ja roiskeveden kestävä. Opinnäytetyön tutkimuksessa käytetään K-tyyppin liitintä, jonka mittaussväli on -195...+1000 °C.

Dataloggerissa on suuri ja helppolukuinen näyttö, jossa on vain yksi "Go" näppäin. Mittauksen ollessa päällä, näytössä näkyy viimeisin mitattu lämpötilatulokset. Go -näppäimellä saadaan näkyviin liitinkohtaisesti kuluvan mittaushistorian maksimi sekä minimi tulos. Kuvassa 4 on esitetty dataloggeri.

Loggerin käyttöönotto tapahtuu ComSoft Basic 5 -tietokoneohjelmalla, jossa asennetaan halutut asetukset. Asetuksissa määritetään mittauksen aloitus ja lopetus, mikä liitinmalli sekä mitkä liitinpaikat ovat käytössä. Mittaustulokset luetaan kyseisen ohjelman kautta. (Testo, 2023)



*Kuva 4: Dataloggeri (Sanna Lähtölä)*



## 6.2 Jälkihoitomenetelmät

Jälkihoitomenetelmiksi valittiin kolme erilaista menetelmää. Menetelmät oli suunniteltu vallitsevat sääolosuhteet huomioiden ja menetelmä on toteutettavissa työmaalla.

### 6.2.1 Routaeriste ja kevytpeite

Suurissa ja paksuissa valuissa pääsääntöisesti riittää peittely routaeristeellä sekä peitteillä. Eristeet asennetaan tiiviisti valun pinnalle kauttaaltaan ja tämän lisäksi vielä peitellään peitteillä. Routaeriste on solumuovia.



*Kuva 5: Routaeriste (Stark.fi)*

### 6.2.2 Lämmitettävät routaeristeet

Routamatto on suunniteltu maan roudan sulatukseen sekä lämpimänä pitoon. Maton avulla routaa voidaan sulattaa jopa 50 cm / vuorokaudessa. Maton materiaali on PVC-pinnoitettua nailonkuitua ylikuumenemissuojin varustettuna. Matossa on myös automaattinen lämpötilarajoin. Yhden maton koko on 1 m \* 3 m ja teho on 1000 W, eli noin 333 W/m<sup>2</sup>. (Ramirent, 2023)



*Kuva 6: Routamatto (Ramirent.fi)*

### 6.2.3 Kovetinkaapeli

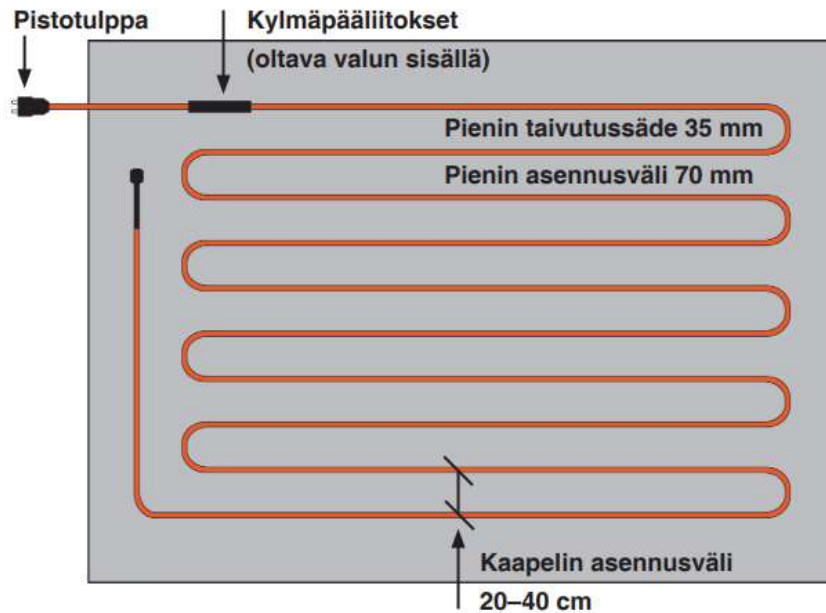
Betonin kovetinkaapelia käytetään ainoastaan betonin kovettamiseen, lämmitykseen sekä lämpimänä pitoon. Kaapelia ei saa asentaa yli -15 °C pakkassessa, sillä kaapelin muoviosat kovettuvat pakkassäällä ja kaapeli voi vaurioitua. Betonimassan lämpötila tulee pysyä alle 60 °C:ssa.

Kovetinkaapelin asennukseen ja kiinnittämiseen voidaan käyttää esimerkiksi nippusiteitä. Kaapelia ei saa asentaa paloherkkään materiaaliin ja näin ollen tulee kiinnittää raudoitukseen ja kiinnitys tulisi olla vähintään 20 cm:n välein. Kuvassa 8 on esitetty Pistesarjan asennusohje.

Mikäli kaapeli osuu styroksiin tai vastaavaan eristeeseen, saattaa sekin vaurioittaa kaapelia. Myös ristikkäin asettelu on kielletty. Kaapelin saa kytkeä päälle, kun se on kokonaan betonimassan joukossa. Huomioitava on, että myös kylmäpäälliitos on valun sisällä. (Pistesarjat, 2023)



Kuva 7: Kovetinkaapeli rullassa. (Sanna Lähtölä)



Kuva 8: PST-BET-betoninkovetuskaapelin asennusohje (Pistesarjat)

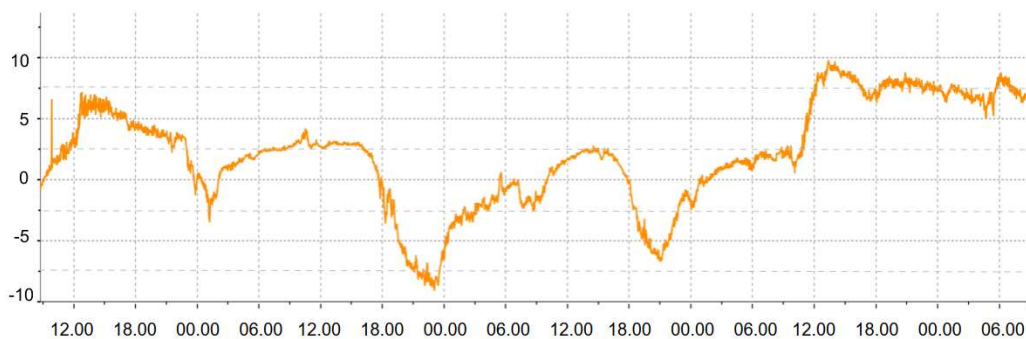
### 6.3 Kimmovasara lyhyesti

Kimmovasara on testauslaite, jolla testataan rakenteen kovuutta rikkomatta rakennetta. Kovuus muutetaan taulukon 12 mukaisesti megapascaliksi.

Mittauksen aluksi laite kalibroidaan laitteen omalla kalibrointialasimella. Kalibroinnin jälkeen kimmovasaraa painetaan rakennetta kohti ja laitteen jousimekanismi aiheuttaa iskun. Kun laite iskee, se samalla piirtää mittaustuloksen laitteen sisällä olevalle paperille. Tulos luetaan laitteessa olevan mitta-asteikon avulla. (RATU 1215-S, 2006, s. 11)

## 7 TUTKIMUSPÄIVÄ

Tutkittava valupäivä oli 24.2.2023, jolloin sääolosuhteet olivat oikein hyvät talvibetonointipäiväksi. Betonointi alkoi 8.00 aamulla, jolloin pakkasta oli  $-7^{\circ}\text{C}$  ja valun aikana lauhtui noin  $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ :seen. Ilma oli kirkas ja aurinkoinen. Dataloggerin asetukset oli määritelty mittaamaan minuutin välein. Yksittäinen lämpöpiikki noin klo 10.00 johtuu mahdollisesti termolangan mittauspäähän kohdistuneesta kosketuksesta. Taulukossa 3 on esitetty 4 vuorokauden ilman lämpötilamittaukset.



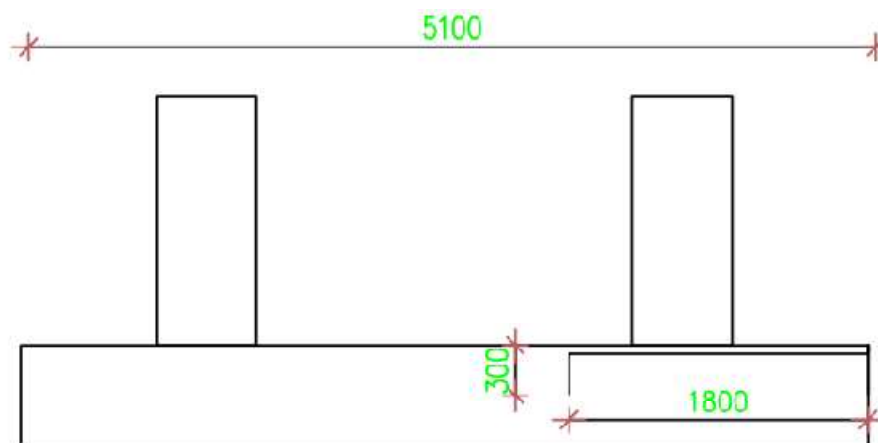
*Taulukko 3: Ulkolämpötilamittaus dataloggerilla (Sanna Lähtölä)*

Muotin pohja oli sulatettu lumesta höyryttämällä ja suojattu kevytpeitteillä, joten pohjat olivat puhtaat ja jäättömät. Sulatuksesta johtuva vesi imeytyi hyvin maan läpi ja saatiin pumpattua pois perustuskuopan pohjaan asennetun pumppauskaivon kautta. Höyry tuotettiin kuorma-autossa olevalla höyrykehittimellä. Kuvassa 9 höyrytetään muotin pohjaa kohdistetusti sulatussuuttimella.



*Kuva 9: Perustuslaatan höyrytystä. (Sanna Lähtölä)*

Mittauksesta tehtiin mittaussuunnitelma ja suunnitelmapiirros (liite 1) termolankojen asennuksesta. Kuvassa 10 on esitetty rakenteen poikkileikkaus ja termolangan sijainti. Jokaiseen anturaan asennettiin termolanka samaan kohtaan, noin 1800 mm muotin reunasta ja langan mittauspää 300 mm syvyyteen. Mittauslankaa ei tarkoituksellisesti asennettu perustusmuotin keskelle, sillä oletuksena on, että massiivinen laatta ei jäähdy keskeltä. Mittauslangan sijainnissa huomioin myös jälkihoitona olevat lämmönlähteet. Mittauslangat ovat tasavertaisesti sijoitettu anturoihin ilman suoranaista lämmönlähteen vaikutusta.

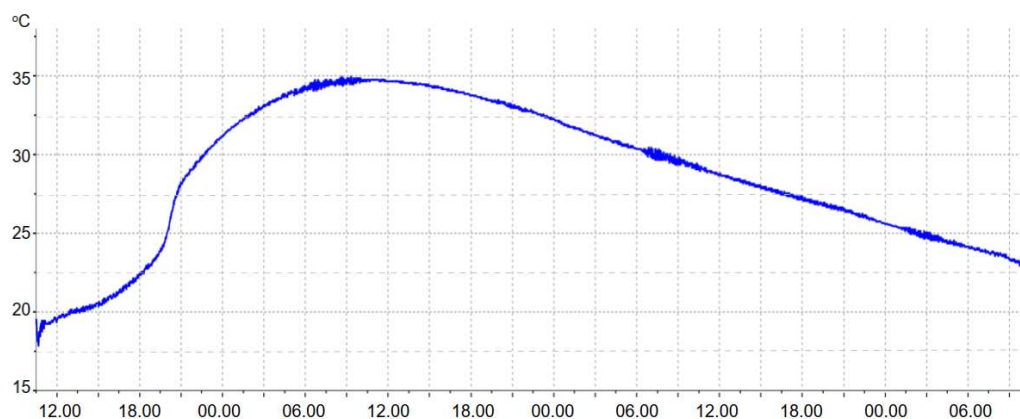


Kuva 10: Mittaussuunnitelma termolangan asennus. (Sanna Lähtölä)

## 8 LÄMPÖTILAMITTAUKSET

### 8.1 Routaeriste ja kevytpeite

Suurten ja paksujen laattojen suojausmenetelmäksi usein riittää suojapeittely routaeristeellä sekä kevytpeitteellä. Lämpötilakaavion perusteella voidaan katsoa, että maksimilämpötila on hieman alle 35 astetta ja se on saavutettu noin 23 h valun alusta. Taulukossa 4 näkyy, että lämmönkehitys ensimmäisen 9 h aikana oli maltillista, mutta nousujohdanteista.

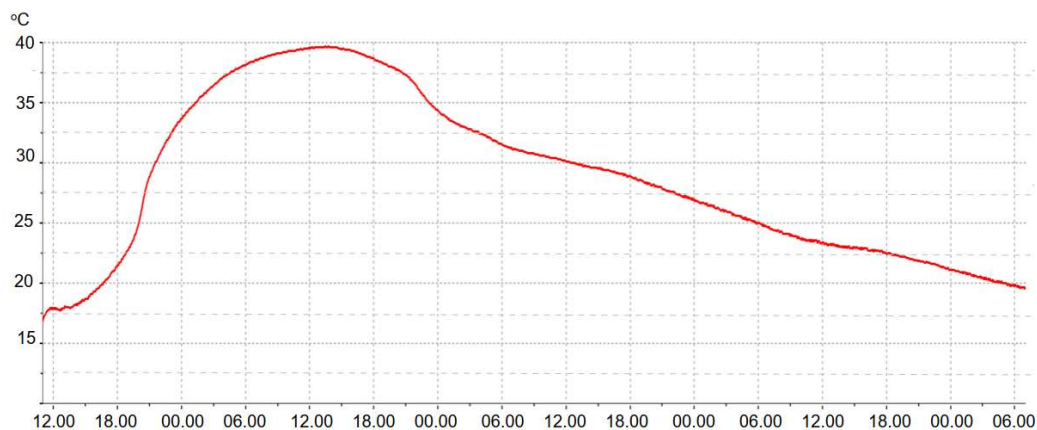


Taulukko 4: Lämmönkehitys routamatolla ja kevytpeitteellä (Sanna Lähtölä)

### 8.2 Lämmitettävät routaeristeet

Ensimmäinen testi epäonnistui termolangan katkeamisen vuoksi, joten uusin kokeet seuraavassa valussa. Valupäivän sää oli aurinkoinen ja hieman, 1–2 astetta, lämpimämpi. Pohjien valmistelu toteutettiin samalla tavalla, höyryttämällä.

Pinta peiteltiin alueilta, johon ei routamattoja sijoitettu, routaeristeellä ja koko pinta peiteltiin kevytpeitteillä. Matot asennettiin mittaussuunnitelman mukaisesti kevytpeitteiden päälle. Tauluko 5 kaavion perusteella lämpötila on ollut korkeimmillaan n. 39 astetta ja se on saavutettu myös noin 23 h kuluttua valun alusta. Kuitenkin lämmönkehitys valun alusta oli huomattavasti nopeampi, kuin muilla menetelmillä.



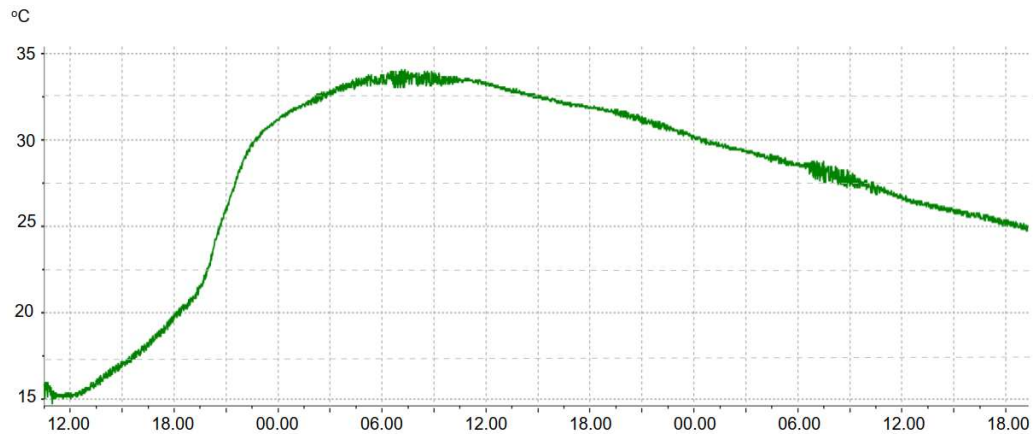
*Taulukko 5: Lämmönkehitys lämmitettävällä routamatolla (Sanna Lähtölä)*

### 8.3 Kovetinkaapeli

Kovetinkaapelit asennettiin kiertämään alapinnan ulkoreunassa noin 30 cm päähän muotista. Valupinta myös peiteltiin routaeristeellä sekä kevytpeitteillä, sillä perustus oli jäävä rakenne, eikä voitu ottaa riskiä betonin lujuudenkehityksen viivästymiselle.

Taulukon 6 kuvaajasta voi havaita lämpötilan tehneen pienen pudotuksen alussa. Mahdollinen syy tälle on pinnan peittelyn viivästys ja jäähtynyt betonipinta. Vaikka betoni oli hieman jäähtynyt alussa, nousi lämpötila korkeimmillaan noin 33–34 °C:een 21 h valun alusta. Kovetinkaapelin käytöllä ei ollut huomattavaa eroa, lämpötila ei noussut yhtä korkealle kuin pelkällä routaeristeellä ja kevytpeitteellä. Tämä havainto puoltaa sitä mahdollisuutta, että pinta on päässyt jäähtymään vaikkakaan täyttä varmuutta asiaan ei saatu tässä tutkimuksessa suoritetuilla mittauksilla.

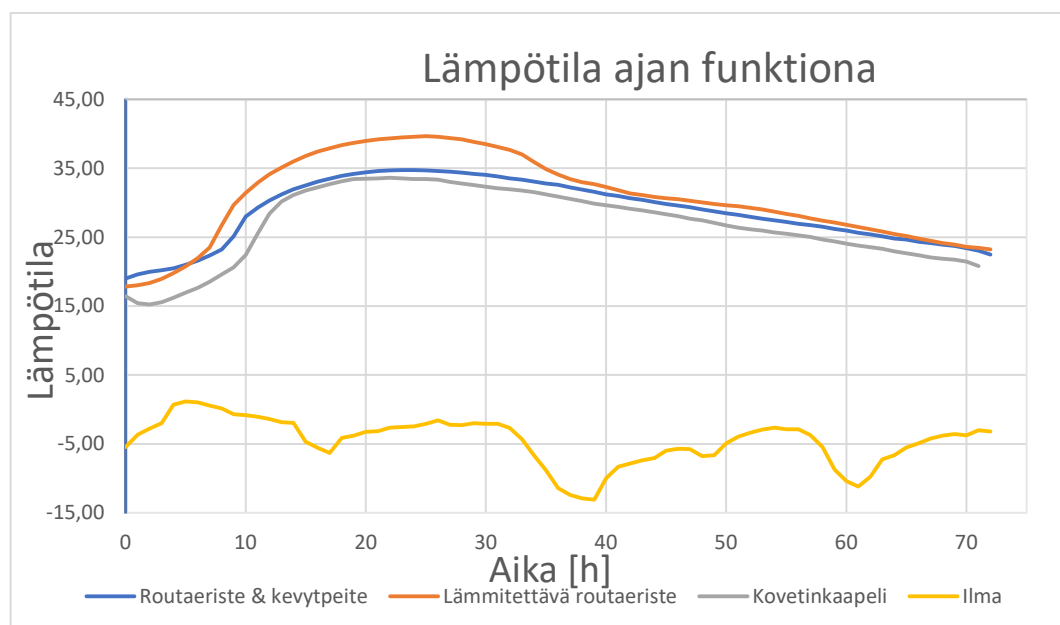




Taulukko 6: Lämmönkehitys kovetinkaapelilla (Sanna Lähtölä)

#### 8.4 Lämpötilamittausten vertailu

Tutkimissani perustuksissa päästiin tasaisiin lopputuloksiin muotipurkuhetken tarkastelussa. Lämpötilojen kehittyminen oli melko tasaista, kuitenkin selvästi nopein ja korkein lämmönkehitys on tapahtunut lämmitettävän routamatton avulla. Taulukossa 7 on esitetty kaavio lämpötila ajan funktiona kaikissa lämpötilamittauksissa. Taulukossa on laskettu jokaiselle tunnille keskiarvolämpötila.



Taulukko 7: Mitatut lämpötilat ajan funktiona (Sanna Lähtölä)

## 9 SAAVUTETTU MUOTINPURKULUJUUS

Lujuuslaskenta aloitettiin laskemalla lämpötilojen keskiarvo tunneittain KA °C/h. Sarakkeessa ”Sadgrove” laskettiin Sadgroven kaavalla, jossa aika  $t$   $1/24=0,0417$ . Betonin ikään lisättiin vielä edellisen tunnin kumulatiivinen ikä. Taulukossa 8 on ensimmäisen neljän tunnin laskennalliset tulokset betonin kumulatiiviseksi iäksi.

Esimerkiksi betonin ikä, eristeellä ja peitteellä, 4 tuntia valun aloituksesta:

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

$$t_{20} = \left( \frac{20,5 \text{ } ^\circ\text{C} + 16 \text{ } ^\circ\text{C}}{36 \text{ } ^\circ\text{C}} \right)^2 * 0,0417 + 0,16$$

$$t_{20} = 0,21$$

Eli 4 tuntia valun aloituksesta, betonin kumulatiivinen ikä on 0,21 vrk = 5,03 h.

Aika valun aloituksesta [h]	Eriste + peite			Lämmitysmatot			Kovetinkaapeli		
	KA °C / h	Sadgrove	Betonin ikä lämpötilaan verrattuna [d]	KA °C / h	Sadgrove	Betonin ikä lämpötilaan verrattuna [d]	KA °C / h	Sadgrove	Betonin ikä lämpötilaan verrattuna [d]
0	19,01	0,04	0,04	17,85	0,04	0,04	16,43	0,03	0,03
1	19,56	0,04	0,08	17,99	0,04	0,07	15,45	0,03	0,07
2	19,94	0,04	0,12	18,34	0,04	0,11	15,22	0,03	0,10
3	20,17	0,04	0,16	18,95	0,04	0,15	15,54	0,03	0,13
4	20,50	0,04	<b>0,21</b>	19,77	0,04	0,19	16,20	0,03	0,16

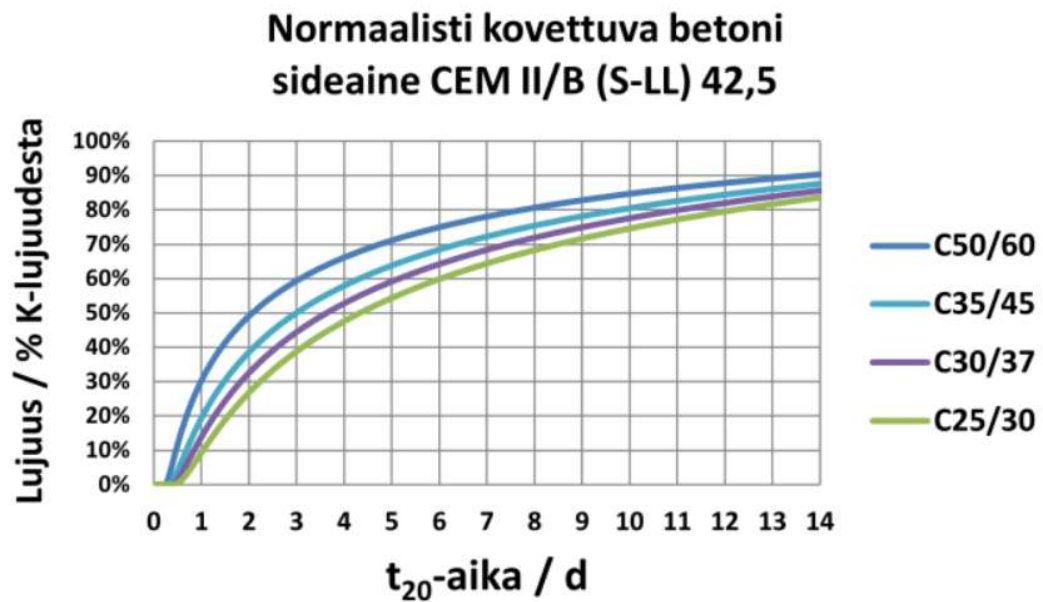
Taulukko 8: Ote Excel-laskelmasta (Sanna Lähtölä)

### 9.1 Muotinpurkulujuuden laskenta

Laskenta aloitetaan määrittelemällä muotinpurkulujuus prosentteina. Betonin lujuus on C30/37 ja määritetään 5 MPa:n lujuus kuutiolujuudesta prosentteina.

$$\frac{5 \text{ MPa}}{37 \text{ MPa}} * 100\% = 13,5\%$$

Taulukosta 9 katsotaan C30/37 linjaa. Kaaviosta huomataan, että vaadittu 13.5 % täyttyy noin 1 vrk:ssa kumulatiivisella iällä.



Taulukko 9: Betonin lujuudenkehitys +20°C lämpötilassa kypsyysikäfunktiona. (Betonitieto.fi)

Taulukossa 10 on laskettu Sadgroven menetelmällä tutkittavan betonoinnin kumulatiivisia lämpötiloja. Laskelmista katsotaan, milloin kumulatiivinen ikä ylittää arvon 1,0.

Aika valun aloituksesta [h]	Eriste + peite			Lämmitysmatot			Kovetinkaapeli		
	KA °C / h	Sad- grove	Betonin ikä läm- pötilaan verrat- tuna [d]	KA °C / h	Sad- grove	Betonin ikä läm- pötilaan verrat- tuna [d]	KA °C / h	Sad- grove	Betonin ikä läm- pötilaan verrat- tuna [d]
0	19,01	0,04	0,04	17,85	0,04	0,04	16,43	0,03	0,03
1	19,56	0,04	0,08	17,99	0,04	0,07	15,45	0,03	0,07
2	19,94	0,04	0,12	18,34	0,04	0,11	15,22	0,03	0,10
3	20,17	0,04	0,16	18,95	0,04	0,15	15,54	0,03	0,13
4	20,50	0,04	0,21	19,77	0,04	0,19	16,20	0,03	0,16
5	20,97	0,04	0,25	20,77	0,04	0,24	16,93	0,03	0,20
6	21,59	0,05	0,30	21,96	0,05	0,28	17,64	0,04	0,23
7	22,34	0,05	0,34	23,52	0,05	0,33	18,53	0,04	0,27
8	23,23	0,05	0,39	26,72	0,06	0,39	19,58	0,04	0,31
9	25,11	0,05	0,45	29,65	0,07	0,46	20,61	0,04	0,36
10	28,00	0,06	0,51	31,45	0,07	0,53	22,42	0,05	0,40
11	29,28	0,07	0,58	32,93	0,08	0,61	25,61	0,06	0,46
12	30,29	0,07	0,64	34,10	0,08	0,69	28,41	0,06	0,52
13	31,17	0,07	0,72	35,10	0,08	0,77	30,18	0,07	0,59
14	31,91	0,07	0,79	35,97	0,09	0,86	31,07	0,07	0,66
15	32,50	0,08	0,87	36,74	0,09	0,95	31,73	0,07	0,74
16	33,07	0,08	0,94	37,40	0,09	1,04	32,22	0,07	0,81
17	33,51	0,08	1,02	37,91	0,09	1,13	32,66	0,08	0,89
18	33,89	0,08	1,10	38,35	0,10	1,23	33,08	0,08	0,96
19	34,19	0,08	1,18	38,67	0,10	1,33	33,40	0,08	1,04
20	34,40	0,08	1,26	38,93	0,10	1,42	33,49	0,08	1,12
21	34,57	0,08	1,35	39,15	0,10	1,52	33,55	0,08	1,20
22	34,67	0,08	1,43	39,32	0,10	1,62	33,61	0,08	1,28
23	34,71	0,08	1,51	39,46	0,10	1,72	33,54	0,08	1,36
24	34,74	0,08	1,60	39,57	0,10	1,82	33,45	0,08	1,44

Taulukko 10: Kypsyyslaskentaa Sadgroven kaavalla (Sanna Lähtölä)

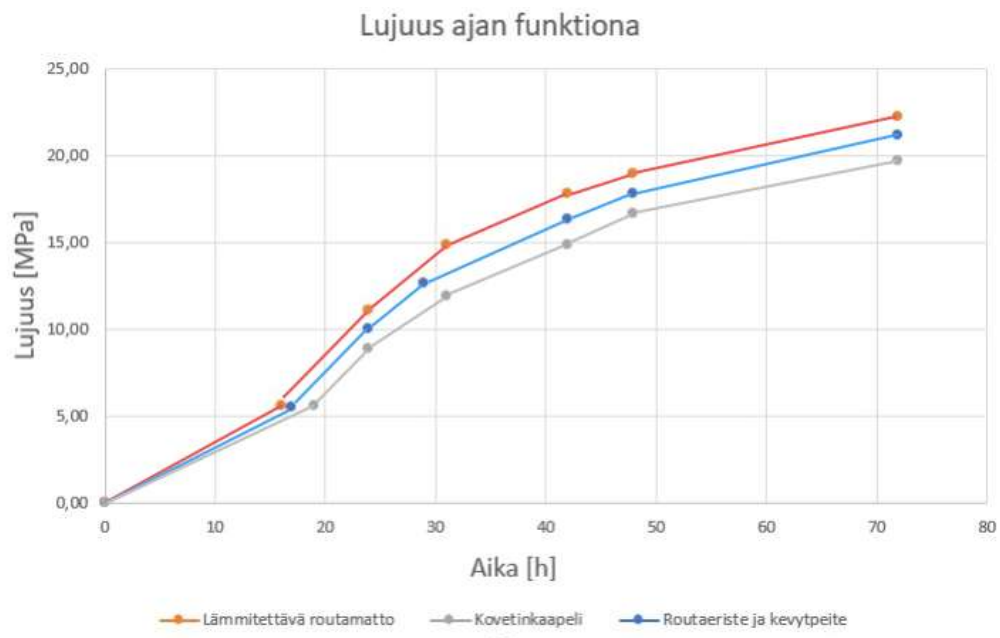
Taulukon 10 laskelmien perusteella kumulatiivinen ikä sekä muotipurkulujuus täyttyy eristeellä ja kevytpeitteellä 17 tuntia valun aloituksesta, lämmitettävällä routaeristeellä 16 tuntia ja kovetinkaapelilla 19 tuntia.

## 9.2 Lujuuden kehitys

Taulukossa 11 on esitetty kaavio lujuudenkehityksestä ensimmäisen 72 tunnin aikana lämpötilamittauksien sekä Sadgroven laskennan perusteella. Tarkasteltavat pisteet valittiin betonin kumulatiivisesta iästä, alkaen muotinpurkulujuuden täyttymisestä. Tarkasteltavat pisteet valittiin mahdollisimman tasalukemista, jotta taulukkoa 9 on helppo lukea. 72 tunnin kohdalla jokaisella perustuksella kumulatiivinen ikä on ollut noin 5 vrk:tta, joka tällöin on noin 60 % nimellislujuudesta. Lujuutena se olisi noin 22,2 MPa. Kuvassa 11 on esitetty laskennan tulokset 72 h:n kohdalla. Voidaan havaita kumulatiivisen iän [d] eroavaisuudet.

Aika valun aloituksesta [h]	Eriste + peite			Lämmitysmatot			Kovetinkaapeli		
	KA °C / h	Sandgrove	Betonin ikä lämpötilaan verrattuna [d]	KA °C / h	Sandgrove	Betonin ikä lämpötilaan verrattuna [d]	KA °C / h	Sandgrove	Betonin ikä lämpötilaan verrattuna [d]
72	22,48	0,05	4,74	23,24	0,05	5,21	20,36	0,04	4,35

Kuva 11: Ote kypsyyslaskennan tuloksista (Sanna Lähtölä)



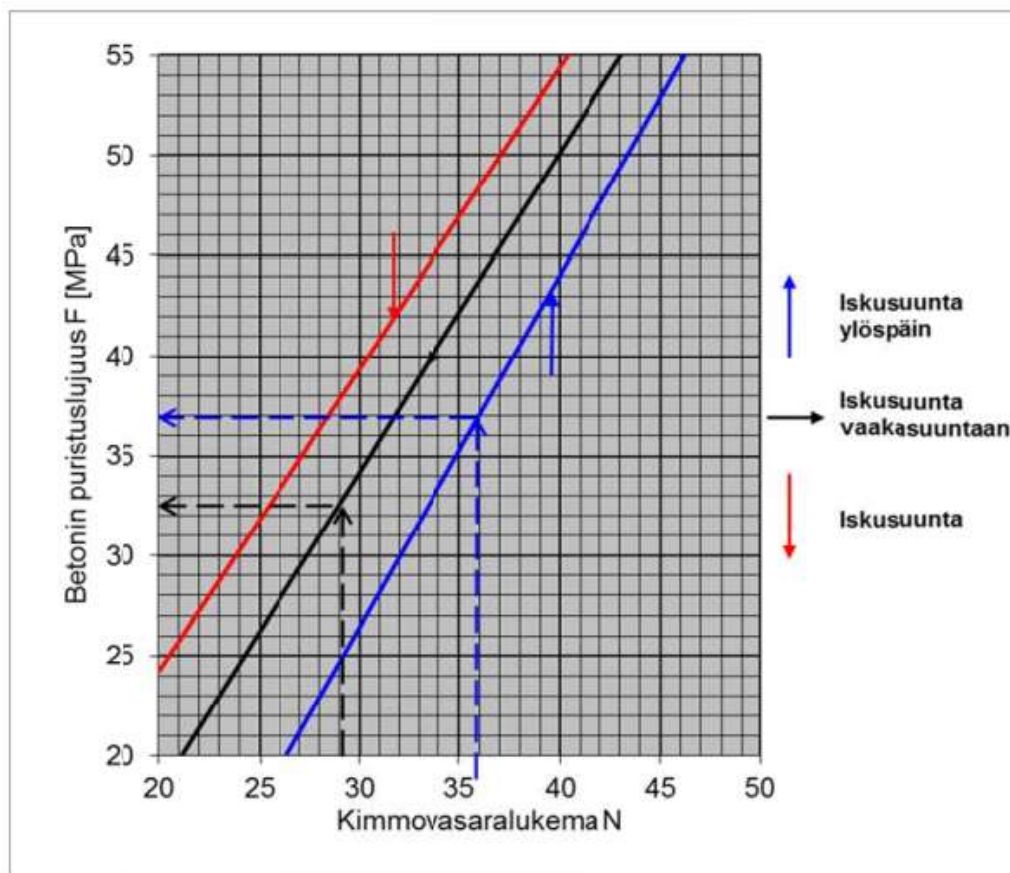
Taulukko 11: Lujuuden kehitys ensimmäisen 72 h aikana (Sanna Lähtölä)

## 10 LUJUUSKOESTUS KIMMOVASARALLA

Betoni laatasta tehtiin lujuustutkimus 21 päivää valun jälkeen kimmovasara-koestuksella.

### 10.1 Mittaustulokset ja niiden analysointi

Mittaus suoritettiin pystymittauksena kärki alaspäin. Kimmovasaralukemat muutetaan puristuslujuudeksi taulukon 12 mukaisesti, ja saadaan vastaava lujuusarvo MPa. Lujuusarvoista lasketaan keskiarvo sekä keskihajonnan sekä keskiarvon suhde. Testauskohtia oli 9 kappaletta, joten kerroin "6" on taulukkoarvo Liikenneviraston ohjeesta. Laskenta on esitetty taulukossa 13.



Taulukko 12: Puristuslujuuden ja kimmovasaralukeman välinen riippuvuus (Liikennevirasto)

Betoni laatu	C30/37								
Valupäivä	24.2.2023								
Testipäivämäärä	17.3.2023								
Testaaja	Sanna Lähtölä								
Laatan numero	Eriste + pressu			Lämmitettävä routamatto			Kovetinkaapeli		
Testaussuunta	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
Kimmovasaralukemat	26	24	34	35	38	32	30	26	29
	32	20	26	28	31	31	31	33	28
	31	29	32	25	25	35	29	29	29
	29	26	34	34	33	35	26	31	34
	36	29	33	29	26	32	30	29	29
	36	30	28	29	37	29	31	31	29
	29	31	34	34	34	34	31	31	30
	28	34	29	38	30	31	29	30	30
	31	30	29	32	35	31	29	29	32
Keskiarvo	31	29	31	32	32	32	29	30	30
Vastaava lujuusarvo [Mpa]	41,0	38,0	41,0	42,0	42,0	42,0	38,0	39,0	39,0
Lujuusarvojen keskiarvo [ $f_{cm}$ ]				40,2					
Lujuusarvojen keskihajonta $s$				1,6					
Keskihajonnan ja keskiarvon suhde [ $s/f_{cm}$ ]				0,0402					
Testauskohtien lukumäärä [ $n$ ]				9					
Testauskohtien lukumäärästä riippuva kerroin [ $f_k$ ]				6					
Testauskohtien pienin lujuustulos $f_{cmin}$				38,0					
Vertailulujuus $K_k=f_{cm} - f_k$				34,2			Valitaan pienempi, jolloin vertailulujuus on 34,2 MPa		
$K_k=f_{cmin} + 4$				42,0					

Taulukko 13: Kimmovasaralla koestettujen lujuustulokset (Sanna Lähtölä)

## 10.2 Mittaustulosten arviointi

Lämpötilamittauksissa lämpötiloja mitattiin kaikkiaan 95 h ja viimeisen 24 h aikana laatan lämpötilan muutos oli keskiarvallisesti  $-0.32^{\circ}\text{C}$  tunnissa. Mikäli lämpötilamuutos on ollut tasainen, tällöin laatan lämpötila olisi ollut 140 h jälkeen lähellä  $0^{\circ}\text{C}$ , jolloin voidaan olettaa kehityksen pysähtyneen. Betonin lujuudenkehitys hidastuu kylmissä olosuhteissa ja keskeytyy, kun lämpötila puutoa lähelle 0 ja käynnistyy uudelleen rakenteen lämmitessä (Finnsementti, 2023). Tällä oletuksella laskennallisesti kypsyysikä on 6.5 vrk.

Lopputuloksena 21 päivää valusta saatiin vertailulujuudeksi 34,2 MPa. Joka on 92,4 % nimellislujuudesta. Mikäli vertaa kumulatiivista kypsyysikää taulukkoarvoihin (taulukko 9), pitäisi lujuuden olla noin 65 %. Taulukkoarvot ovat kuitenkin teoreettisia ja yleispäteviä, joissa on huomioitu varmuuskertoimet.

Liitteessä 3 puolestaan on Rudus Oy:n laskennallinen lujuudenkehitys käytetyille massalle, jossa näkyy, että 6,5 vuorokauden ikäinen massa on

lujuudeltaan noin 35 MPa. Ruduksen laskennallinen lujuudenkehitys siis tukee kimmovasaralla mitattua tulosta.

Mikäli betoni olisi kovettunut ihanneolosuhteessa, +20 °C:een lämpötilassa, 21 vuorokauden ikäisen massan lujuus olisi 45 MPa. Mittaustulos on sellainen, kuin oletettiin, sillä tiedostettiin rakenteen jäähtyminen ja kehittymisen hidastuminen talvella betonoitaessa.



## 11 POHDINTA, JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSTARPEET

Opinnäytetyön tutkimuksen perusteella suuret perustuslaatat pystyvät tuottamaan tarvitsemansa lämmön melko helposti, kuitenkin edellyttäen, että valmistelutyöt on tehty hyvin, pakkaslukema on maltillinen eikä jätetä pintaa peittelemättä. On tärkeää, että valuun varataan tarpeeksi työntekijöitä, jotta työ sujuu järjestelmällisesti aina valajasta peittelijöihin. Peittely tehdään nopeasti valmiin pinnan päälle, eikä anneta pinnan jäähtyä.

Routamaton käyttöönotto ja ei asennus oli hieman haastavaa, sillä perustuksen koko ja pilarien sijainti vaikeutti työtä. Tätä lämmitystyylä voi käyttää näkyville pinnoille, sillä maton paino aiheutti pientä painumaa betonipintaan. En kuitenkaan poissulkisi tätä jälkihoitotyyliä hieman pienemmissä perustuslaatoissa.

Yleisin jälkihoitotapa on eristepeittely, joka vielä peitellään kevytpeitteellä, oli tuloksissa sijalla kaksi. Eristeen levitys oli melko helppoa, kun sen katkaisi sopiviin mittoihin ja pyöräytti rullassa valun päälle.

Kovetinkaapelilla saatiin odotettua hitaampi tulos, mutta se olisi voinut olla hieman parempi, mikäli pinta ei olisi päässyt jäähtymään. Jos huomioidaan kaapelin asentamiseen kulunut aika sekä kustannus, saavutettu hyöty oli minimaalinen. Tässä mittauksessa on kuitenkin huomioitava se, että miten lämpötila olisi silloin käyttäytynyt, mikäli peittely ei olisi viivästynyt. Kaapelin käytön hyöty maanvaraisten paksujen laattojen betonoinnissa tulisi varmistaa uusintamittauksella.

Opinnäytetyössä tutkimuksen päätarkoitus oli tutkia sitä ajanhetkeä, jolloin muotipurkulujuus täyttyy. Muotipurkulujuutta ei testattu kimmovasaramittauksella, mutta lämpötilojen seurannalla saatiin laskettua jälkihoitotoimenpiteiden vaikutusten eroavaisuuksia. Kimmovasara-testaus kuitenkin tuki lämpötilamittauksien ja sadgroven kaavan perusteella laskettuja lujuustuloksia ja

antaa konkreettisen tuloksen siitä, kuinka lujuudenkehitys hidastuu rakenteen viiletessä ja näin ollen hidastuu myös loppulujuuden saavutus. Kimmovasara-testaukseen nojaten, on huomioitava myös muottien purun jälkeinen jälkihoito, jotta betoni on kehittänyt tarpeeksi lujuutta kuormituksen kestämiseksi.

## LÄHTEET

- Betonitieto. (4 2023). *Betonitieto.fi*. Haettu 6. 4 2023 osoitteesta <https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/talvibetonointi/betonin-kriittiset-lujuudet-talvella.html>
- Betonitieto.fi. (28. 3 2023). *Betonitieto*. Noudettu osoitteesta <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/kovettuneen-betonin-ominaisuudet/betonin-lujuudenkehitys.html>
- Finnsementti. (2023). Noudettu osoitteesta Finnsementti.fi: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus/>
- Finnsementti. (2023). *finnsementti.fi*. Noudettu osoitteesta [www.finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus](http://www.finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus)
- Finnsementti. (2023). *Finnsementti.fi*. Noudettu osoitteesta <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus/>
- Ilmatieteenlaitos. (6. 3 2023). *Ilmatieteenlaitos.fi*. Noudettu osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/talvitilastot>
- Mannonen, P. (2004). *Talvibetonoinnin aika käsillä*. Betonitieto Oy.
- Pistesarjat. (2023). *PST-BET-betoninkovetuskaapelin asennusohje*. Noudettu osoitteesta [file:///C:/Users/terit/Downloads/betonin\\_kovetuskaapeli\\_bet%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/terit/Downloads/betonin_kovetuskaapeli_bet%20(1).pdf)
- Ramirent. (27. 3 2023). Noudettu osoitteesta <https://www.ramirent.fi/vuokraa/lammitys-kuivaus-ja-polyntorjunta/roudansulatuskalusto/223521/roudansulatusmatto>
- RATU 1215-S. (2006). Noudettu osoitteesta Rakennustieto. Työmaan laadunvarmistus, tarkastukset ja mittaukset: [www.kortistot-rakennustieto-fi.lillukka.samk.fi/resource/juha/content/18389#page=1](http://www.kortistot-rakennustieto-fi.lillukka.samk.fi/resource/juha/content/18389#page=1)
- Rodus. (2023). *Talvibetonointisuunnitelma*. Rodus Oy.
- Sahlsted, S.;Koskenvesa, A.;Lindberg, R.;Kivimäki, C.;Palolahti, T.;& Lahtinen, M. (2014). *Talvibetonointi*. Betoniteollisuus ry.
- Sahlsted, S.;Koskenvesa, A.;Lindberg, R.;Kivimäki, C.;Palolahti, T.;& Lahtinen, M. (2014). *Talvibetonointi*. Betoniteollisuus ry.
- Sahlsted, S.;Koskenvesa, A.;Lindberg, R.;Kivimäki, C.;Palolahti, T.;& Lahtinen, M. (2014). *Talvibetonointi*. Betoniteollisuus ry.
- Suomen betoniyhdistys. (2018). *Betonitekniikan oppikirja*. Haettu 2023

Suomen Betoniyhdistys ry. (2018). *Betonitekniikan oppikirja*. Haettu 2023

Suomen Betoniyhdistys ry. (2018). *Betonitekniikan oppikirja*.

Suomen Betoniyhdistys ry. (2021). Teoksessa *Betoninormit by 65*. Suomen Betoniyhdistys ry.

Suomen betoniyhdistys ry. (2021). *Betoninormit by 65*. Haettu 2023

Suomen Betoniyhdistys ry. (2023). *Betonitieto.fi*. Haettu 2023 osoitteesta [www.betonitieto.fi](http://www.betonitieto.fi)

Testo. (7. 3 2023). *testo\_174\_175\_176\_eng\_bro*. Noudettu osoitteesta [https://www.elfadistrec.fi/Web/Downloads/\\_b/ro/testo\\_174\\_175\\_176\\_eng\\_bro.pdf](https://www.elfadistrec.fi/Web/Downloads/_b/ro/testo_174_175_176_eng_bro.pdf)

## LIITELUETTELO

Liite 1: Mittaussuunnitelma (Sisältää opinnäytetyön tilaajayrityksen luottamuksellista tietoa)

Liite 2: Betonointisuunnitelma ja -pöytäkirja (Sisältää opinnäytetyön tilaajayrityksen luottamuksellista tietoa)

Liite 3: Laskennallinen lujuudenkehitys (Rudus Oy)