



JESSE JOKIHAARA

Tuulivoimalan perustuksen talvibetonointi

RAKENNUS JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-
OHJELMA
2023

TIIVISTELMÄ

Jokihaara, Jesse: Tuulivoimalan perustuksen talvibetonointi
Opinnäytetyö, AMK
Tutkinto-ohjelma: Rakennus ja yhdyskuntatekniikka
Huhtikuu 2023
Sivumäärä: 42

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia tuulivoimalan perustuksen talvibetonointia. Tutkimuksessa selvitettiin, saavutetaanko nykyisillä menetelmillä tavoiteltu laadunvarmistus. Tutkimus on ajankohtainen, koska toimeksiantajayritys suorittaa useita talvibetonointeja vuosittain.

Opinnäytetyö aloitettiin käsittelemällä talvibetonointia ja miten se vaikuttaa betonointiin. Talvibetonoinnista käsiteltiin sen vaikutuksista betonointiin ja mitä tärkeitä lujuudenkehityksellisiä tavoitteita talvibetonoinnissa on. Vaikutuksien jälkeen käsiteltiin, minkälaisia menetelmiä on käytössä, joiden avulla pystytään ehkäisemään talvibetonoinnin vaikutuksia.

Talvibetonointia tutkittiin kahdella eri tutkimuksella. Ensimmäinen tutkimus oli laajat lämpötilamittaukset perustuksessa, joiden avulla selvitettiin, että perustuksen lämpötilat pysyvät sallituissa rajoissa. Lämpötilamittauksien avulla tavoiteltiin mittaustietoja, joissa näkyvät eri toimenpiteiden vaikutukset.

Olosuhdekappaleiden avulla tutkittiin betonin käyttäytymistä kylmissä olosuhteissa. Kappaleiden puristuslujuudet koestettiin ulkoisella toimijalla kahden – ja viiden päivän ikäisinä. Tutkimuksen avulla selvisi hyvin, miten kylmät olosuhteet vaikuttavat betonin lujuudenkehitykseen. Myös olosuhdekappaleiden lämpötilaa mitattiin, jonka avulla pystyttiin laskemaan laskennallinen lujuudenkehitys Sadgroven kaavalla. Kappaleiden puristuslujuudet olivat selvästi alle Sadgroven laskennallisen puristuslujuuksien alle.

Opinnäytetyön lopussa yhteenvedossa käytiin opinnäytetyön tutkimustuloksia käyttäen päätökset, miten nykyiset menetelmät toimivat ja tarvitseeko suunnitella uusia. Olosuhdekappaleiden tuloksista käytiin läpi, että miten lämpötila vaikutti lujuudenkehitykseen.

Yhteenvetona tuulivoimalan perustuksen talvibetonoinnin laadunvarmistuksena todettiin, että nykyiset menetelmät ovat riittäviä opinnäytetyön aikaisilla olosuhteilla. Nykyiset menetelmät takaavat hyvän laadun ja kylmemmissä olosuhteissa mahdolliset lankalämmitykset suositeltavia muotin reunoihin.

Avainsanat: Jäätymislujuus, Talvibetonointi, Betoni, Tuulivoimala

Abstract

Jokihaara, Jesse: Winter Concreting of the Wind Power Foundation

Bachelor's thesis

Degree programme: Degree programme in Construction and Municipal Engineering

April 2023

Number of pages: 42

The aim of the thesis was to study the winter concreting of the foundation of the wind farm. The study examined whether the quality assurance sought by the existing methods was achieved. The investigation is timely because the sponsor company performs several winter concreting annually.

The thesis was started by examining winter concreting and how it affects concreting. Winter concreting was discussed about its effects on concreting and what important strength-building goals are in winter concreting. After these effects, the methods used to prevent the effects of winter concreting were discussed.

Winter concreting was studied in two different studies. The first study was extensive temperature measurements on the basis of which it was established that the temperatures of the foundation would remain within the permitted limits. Temperature measurements were used to achieve measurement data showing the effects of different actions.

Field-cured cubes were used to examine the behavior of concrete under cold conditions. The compressive strength of the cubes was tested by an external operator at the age of two and five days. The study showed well how cold conditions affect the development of concrete strength. The temperature of the field-cured cubes was also measured to calculate the calculated strength development with the Sadgrove formula. The compressive strength of the cubes was well below Sadgrove's calculated compression strength.

At the end of the thesis, decisions were taken using the research results of the thesis, how the current methods work and whether new ones need to be planned. The results of the field-cured cubes were examined that how the temperature affected on the development of strength.

In summary, the quality assurance of the winter concreting of the foundation of the wind farm found that the current methods are sufficient with the conditions at the time of the thesis. Current methods ensure good quality and in colder conditions possible wire heating is recommended on the edges of the mold.

Keywords: Freezing strength, Winter concreting, Concrete, Wind power plant

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 YLEISTÄ TALVIBETONOINNISTA	7
2.1 Lämpötilan vaikutus.....	7
2.2 Jäätymislujuus.....	8
2.2.1 Muotinpurkulujuus.....	8
2.3 Suojaaminen	9
2.4 Betonin valinta	11
2.4.1 Normaalisti kovettuva betoni.....	12
2.4.2 Kuumabetoni	12
2.4.3 Nopeasti kovettuvat betonit	12
2.4.4 Pakkasbetoni	13
2.5 Betonin lämmitysmenetelmät	13
2.5.1 Lankalämmitys.....	13
2.5.2 Sähkölämmitteiset suurmuotit.....	15
2.5.3 Infrapunasaiteilylämmitys	15
2.5.4 Kuumailmalämmitys.....	15
2.5.5 Höyrylämmitys	16
2.6 Betonin lämpökäsittely.....	16
3 TUULIVOIMALAN PERUSTUS.....	17
3.1 Suoritetut tutkimukset.....	18
3.2 Perustuksen lämpötilamittaukset.....	19
3.3 Olosuhdekappaleet	20
4 BETONOINTI	22
4.1 Esilämmittäminen	22
4.2 Betonin laadunvalvonta	23
4.3 Suojaaminen	25
4.4 Tutkimusten suoritus	26
4.5 Olosuhteet	27
5 PERUSTUKSEN LÄMPÖTILAMITTAUKSIEN ANALYSOINTI	28
5.1 Perustuksen lämpötilat	28
5.2 Työvaiheiden vaikutus.....	31
6 OLOSUHDEKAPPALEIDEN TULOKSIEN ANALYSOINTI	34
6.1 Lämpötilat.....	34
6.2 Puristuslujuudet.....	36
6.3 Lujuudenkehitys	37

7 YHTEENVETO.....	41
LÄHTEET.....	42

1 JOHDANTO

Talvibetonointi on kylmissä olosuhteissa tehtävää betonointia. Työmaata talvibetonointi rasittaa enemmän, koska talvibetonointi vaatii lisätoimenpiteitä. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia, miten nykyiset lisätoimenpiteet toimivat ja riittävätkö ne tavoiteltuun laadunvarmistukseen.

Opinnäytetyöntilaaajana toimii Suvic Oy. Yritys on rakennusliike, joka on perustettu vuonna 2017 Oulussa. Suvic Oy on erikoistunut energiarakentamiseen ja erityisesti tuulivoimaan ja projektijohtamiseen. Opinnäytetyössä tutkitaan tuulivoimalan perustuksen talvibetonointia. Työssä käydään läpi talvibetonointia omana aiheenaan ja tiedot kohdennetaan tuulivoimalaperustukseen.

Talvibetonointia tutkittiin kahdella eri tutkimuksella. Ensimmäinen tutkimus oli laajat lämpötilamittaukset perustuksesta, joiden avulla tutkittiin perustuksen lämpötiloja. Tavoitteena tutkimuksella oli tutkia, että perustuksen lämpötilat pysyvät sallituissa rajoissa ja työmenetelmien vaikutuksia perustuksen lämpötiloihin.

Toinen tutkimus oli olosuhdekappaleiden tekeminen, joiden avulla selvitettiin, miten betoni käyttäytyy kylmissä olosuhteissa. Tutkimuksen avulla tavoiteltiin mittaustietoja, joissa näkyy lämpötilan vaikutus betonin lujuudenkehitykseen. Olosuhdekappaleiden lämpötiloja seurattiin tutkimuksen ajan myöhempää tarkastelua varten.

Tutkimustuloksien perusteella voitiin todeta nykyisten talvibetonointimenetelmien toimivuus. Olosuhdekappaleiden tutkimustuloksien perusteella arvioitiin lämpötilan vaikutuksia betonin lujuudenkehitykseen.

2 YLEISTÄ TALVIBETONOINNISTA

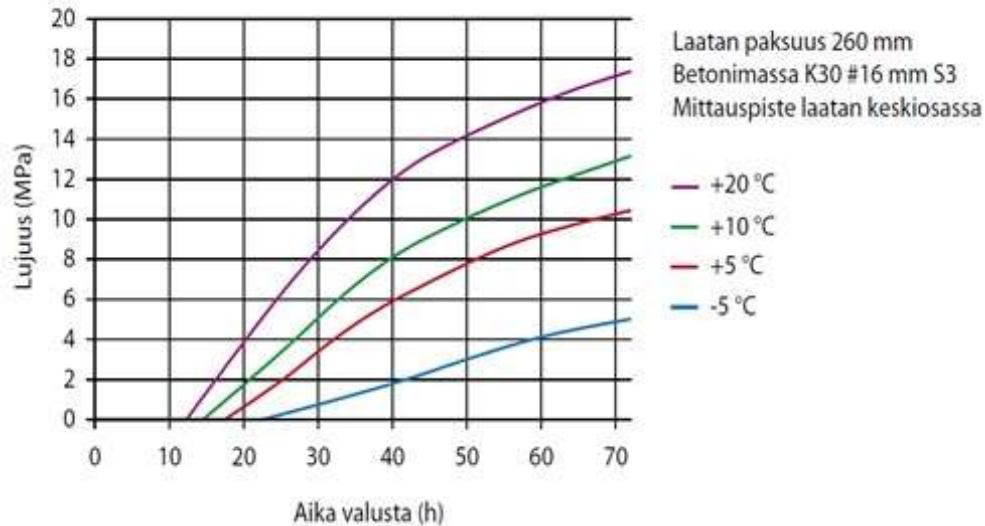
Talvibetonoinnin kausi kestää Suomessa 7–9 kuukautta. Talvibetonointi alkaa, kun lämpötila laskee vuorokauden aikana alle 5 asteen lämpötilan. Varautumisen avulla pystytään hyvin välttämään talvibetonoinnin tuomia haasteita. Varautumisen avulla vähennetään mahdollisia haittoja ja tuodaan varmuutta talvibetonointiin. Sää tiedotuksien seuraamisen avulla pystytään varautumaan tuleviin sääolosuhteisiin. Tarkkailtavia sääolosuhteita ovat esimerkiksi lämpötila, vesi-, räntä- ja lumisade. Tiedotuksien avulla voidaan esimerkiksi ehkäistä lumen pääseminen valettavaan kohteeseen suojaamalla perustus ennen lumisadetta. (Suomen betoniyhdistys, 2019, s.220 – 221.)

2.1 Lämpötilan vaikutus

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi betonin lujuudenkehitykseen. Lujuudenkehityksen kannalta betonille suositeltava lämpötila on + 30–40 astetta. Kun lämpötila laskee alle 5 asteen, niin lujuudenkehitys hidastuu merkittävästi. (Betoni, 2013, s.15.)

Betonin lujuudenkehityksen kannalta myös liian suuret lämpötilat ovat haitallisia. Lämpötila ei saa nousta yli 60 °C, koska silloin vaarana on lujuuskato ja säilyvyyden heikkeneminen. (Suomen betoniyhdistys ry, 2018, s.496.) Lujuuskadon määrä suurenee, mitä suurempi lämpötila on. Lujuuskato voi olla jopa 30 – 70 % suunnittelulujuudesta. (Betonitieto, 2023.)

Kuvaajassa 1 on normaalisti kovettuvan betonin C25/30 lujuudenkehitys eri lämpötiloissa. Mittaukset on suoritettu betonilaatalle, jonka paksuus on 260 mm ja mittauspisteet ovat laatan keskiosassa. Lujuudenkehityksessä eri lämpötiloilla huomaa suuret erot. Parhaiten lujuudenkehitys kasvoi + 20 asteen lämpötilassa eli standardiolosuhteissa. Kun vertailee -5 asteen ja + 20 asteen lämpötilojen lujuudenkehitystä, niin + 20 asteen lämpötilassa jäätymislujuus saavutetaan vuorokaudessa ja – 5 asteessa kolmessa vuorokaudessa. Jäätymislujuutta käsitellään kappaleessa 2.2 tarkemmin. (Rudus, 2017.)



Kuvaaja 1. Lämpötilan vaikutus lujuudenkehitykseen (Rudus, 2017)

2.2 Jäätymislujuus

Talvibetonoinnissa betonin jäätymislajuuden saavuttaminen on ehdotonta. Jäätymislajuudeksi on määritetty kaikille betoneille 5 MPa (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.494). Betonin jäätyminen tarkoittaa sitä, että betonin sisäinen vesi jäätyy ja laajentuessaan vaurioittaa betonia. Pakkasen kestävä betoni kestää kovettuneena jatkuvasti jäätymistä, mutta voi myös vaurioitua ennen jäätymislajuutta.

Betoni, joka on jäätynyt ennen jäätymislajuutta menettää loppulujuudesta noin 20 %. Myös betonin muut ominaisuudet heikkenevät jäätyksen seurauksena. Vaarana jäätyneessä betonissa on valelujuus. Valelujuus tarkoittaa sitä, että betonin sisällä oleva vesi jäätyy ja tuo lujuutta, mutta jään sulaessa pienenee lujuus merkittävästi. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.494–495.)

2.2.1 Muotinpurkulujuus

Muotinpurkulajuuden kannalta lämpötilalla on merkittävä asema, koska yleisohjeena on, että muotit voidaan purkaa silloin, kun lujuudesta on saavutettu

60 %. Betonilaadusta riippuen betoni saavuttaa muotinpurkulujuuden suotuisissa lämpötiloissa viikon sisällä. Muotin purkaminen on suositeltavaa tehdä yli 0 asteen lämpötilassa, koska jäätyneen muotin purkamisessa on riski vaurioittaa betonia. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.496.)

2.3 Suojaaminen

Betonin suojaaminen tehdään pääsääntöisesti erilaisilla suojapeitteillä. Suojapeite yksinään riittää yleensä, kun lämpötila on yli 0 astetta, mutta kun lämpötila laskee alle 0 asteen niin tarvitaan erillinen lämpösuojaus (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.506). Lämmöneristykseen käytetään usein erillistä eristyspeitettä, joka asennetaan suojapeitteen alle. Kuvassa 1 on työmaalla käytettävää pakkasmattoa. Kuvassa olevat pakkasmatot ovat valmiiksi leikattu, jotta saadaan perustus nopeammin eristettyä.



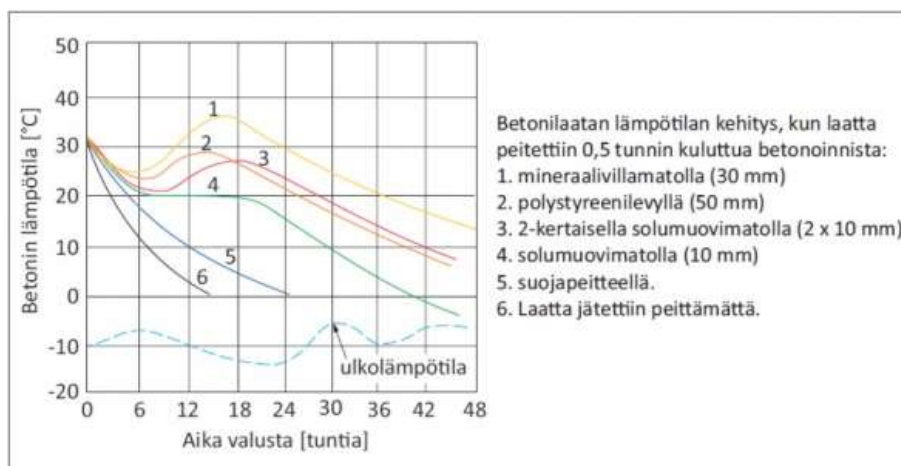
Kuva 1. Eristykseen käytettävät pakkasmatot

Perustuksen suojaamisen avulla saadaan pidettyä betonin lämpötila korkeammalla ja myös tasaisempana. Betonin kosteuden haihtumista myös hallitaan suojaamisen avulla. Suojapeitteiden avulla saadaan valettu perustus suojattua sääolosuhteilta kuten lumi – tai vesisateelta. Kuvassa 2 näkyy opinnäytetyössä tutkitun perustuksen suojaaminen suojapeitteellä.



Kuva 2. Suojattu perustus

Kuvaaja 2 on betonitiedon sivuilta ja siinä on tutkittu eri suojaustapojen toimivuutta kuumabetonia hyödyntäen. Tutkittavana kohteena on ollut betonilaatta ja kuumabetonin lämpötila on ollut 30 astetta. Tuloksista selviää, että pelkkä suojapeite pitää huonosti lämpötilaa. Parhaiten suoriutui mineraalivillamatto ja myös pelkästään yhdellä solumuovimatolla saadaan merkittävä hyöty lämmöneristävyyteen. (Suomen betoniyhdistys, 2019, s.251).

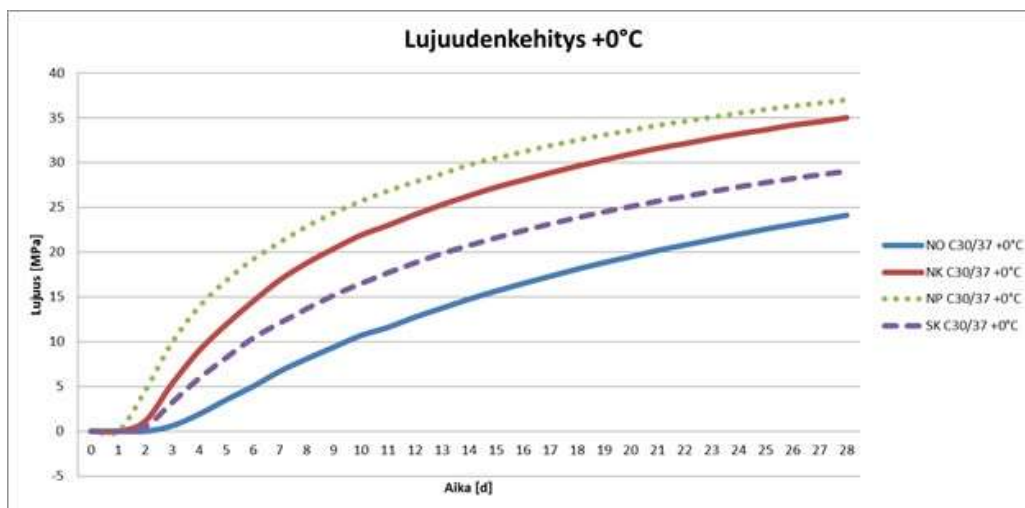


Kuvaaja 2. Betonin suojaustapojen toimivuserot (Suomen betoniyhdistys, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL, 2019)

2.4 Betonin valinta

Talvibetonoinnissa betonin valinnalla on suuria vaikutuksia ominaisuuksiin, kuten lujuudenkehitykseen ja lämmöntuottamiseen. Valintaan vaikuttavat sääolosuhteet, lämmitys ja suojaustavat. Yleisimmin talvibetonoinnissa käytetään kuumabetonia tai nopeasti kovettuvia betoneita (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.500).

Kuvaajassa 3 näkyy eri betonilaatujen lujuudenkehitys 0 asteen lämpötilassa. Mittauksissa on käytetty betonilaatuina NO normaalisti kovettuva, NK nopeasti kovettuva, NP nopeasti päällystettävä (Rudus, 2015) ja SK säänkestävä. Kuvaajasta huomaa, että nopeimman lujuudenkehityksen tuottaa nopeasti päällystettävä betoni ja hitaimman normaalisti kovettuva. Nopeasti päällystettävässä betonissa on enemmän sementtiä kuin normaalisti, jonka takia betoni myös kehittää lujuutta kaikista parhaiten. (Rudus, 2017.)



Kuvaaja 3. Betonilaadun vaikutus lujuudenkehitykseen (Rudus, 2017)

2.4.1 Normaalisti kovettuva betoni

Normaalisti kovettuvalla betonilla ei ole erikoisia ominaisuuksia talvibetonointiin. Talvibetonoinnissa käytetään normaalista kovettuvaa betonia silloin, kun sääolosuhteet sen sallivat. Myös ehtona betonin käytölle on hyvät sääsuojaukset ja mahdolliset lisälämmitykset.

2.4.2 Kuumabetoni

Kuumabetoni on betonitehtaalla valmiiksi lämmitettyä ja sen lämpötila on yleensä +30–40 astetta. Kuumabetonin korkean lämpötilan avulla saadaan lujuudenkehitys alkamaan nopeammin ja saavutetaan parempia varhaislujuuksia. Vain harvinaisissa tilanteissa betoni lämmitetään yli +45 asteeseen. Korkealla lämpötilalla saavutetaan korkeat betonin varhaislujuudet, mutta betonin lujuuskato suurenee. (Betoniyhdistys, 2018, s.500 – 501.)

Työmaiden lämmitystarve vähenee suuresti, koska betonissa on suuri lämpökuorma valmiiksi. Useimmissa betonoinneissa riittää, että kuumabetonin päälle asennetaan lämmöneristys mahdollisimman nopeasti. Kun käytetään kuumabetonia, korostuu eristämisen ja suojaamisen tarve, jotta saadaan betonin lämpötila pysymään.

Haittana kuumabetonissa on se, että betonin työstettävyyys huononee. Myös betonin valettavuusaika lyhenee, mitä suurempi sen lämpötila on. Kuumabetoniin syntyy myös lujuuskatoa lämpötilan takia ja, mitä suurempi lämpötila massalla on, sen suurempi lujuuskato. (Betoniyhdistys, 2018, s.500 – 501.)

2.4.3 Nopeasti kovettuvat betonit

Nopeasti kovettuvat betonit saavuttavat nimellislujuutensa seitsemän vuorokauden iässä lämpötilan ollessa + 20 astetta. Kyseiset betonit tuottavat lämpöä enemmän kuin normaalista kovettuvat betonit ja tämän takia saavuttavat

nimellislujuutensa nopeammin. Lämpöä betoni tuottaa paljon enemmän, koska siinä on merkittävästi enemmän sementtiä verrattuna normaalisti kovettuvaan betoniin. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.500.)

2.4.4 Pakkasbetoni

Pakkasbetonia ei käytetä juurikaan suuremmissa valuissa vaan lähinnä elementtien saumavaluissa. Lujuudenkehitys on hidasta ja sen käyttöalue on – 15 asteeseen asti. Pakkasbetonin ominaisuuksiin kuuluu se, että se voi jäättyä ennen jäätymislujutta vaurioitumatta. Pakkasbetonia ja pakkasen kestävää betonia ei saa sekoittaa keskenään, koska ne ovat kaksi eri betonityyppiä. (Rudus, n.d.)

Pakkasbetoniin on lisätty veden jäätymispistettä alentavaa lisäainetta, jonka takia betoni lujuudenkehitys jatkuu – 15 asteeseen asti. Nopeasti reagoivaa eli rapid sementtiä on paljon ja vesimäärä on alhainen, jonka takia notkistavia aineita käytetään hyödyksi työstettävyyden parantamiseksi (Rudus, n.d.)

2.5 Betonin lämmitysmenetelmät

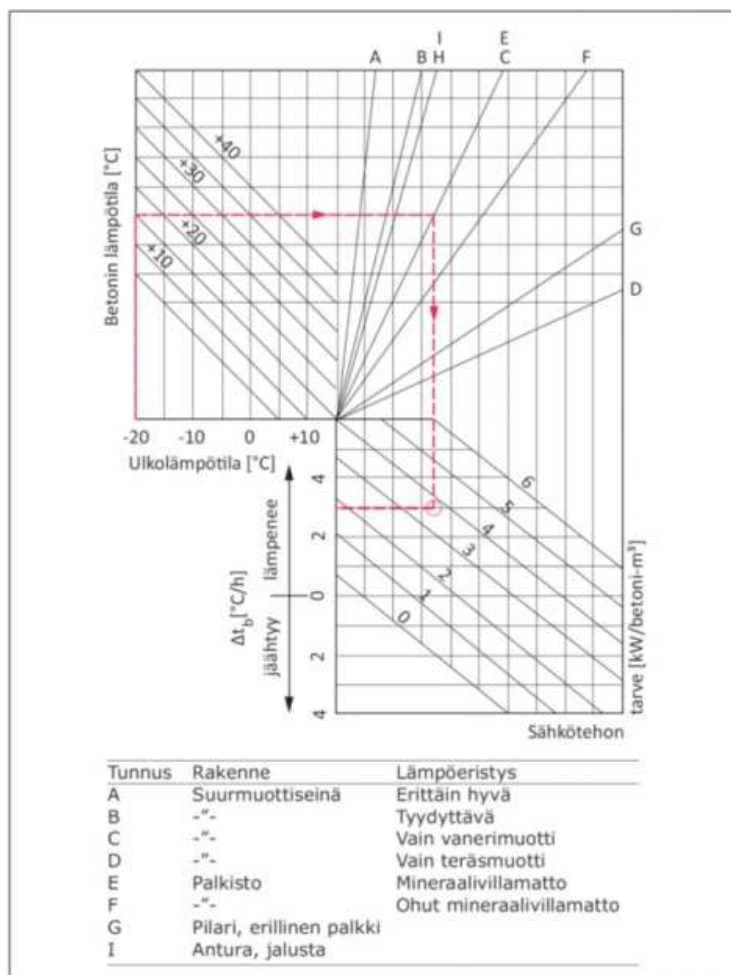
Betonin lämmitysmenetelmän valinta riippuu betonoitavasta kohteesta. Eri lämmitysmenetelmien avulla pystytään lämmittämään tarkasti haluttua kohtaa tai kokonaisvaltaisesti kohdetta. Esimerkiksi lankalämmityksen avulla pystytään tarkasti kohdentamaan lämpö haluttuun kohteeseen ja infrapunasäteilyn avulla koko betonoitavaan kohteeseen.

2.5.1 Lankalämmitys

Käytetään lisälämmityksenä betonissa kylmissä olosuhteissa. Langat asennetaan valettavaan kohteeseen ennen betonia. Lämmitystä saadaan suoraan haluttuihin paikkoihin. Voidaan myös hyödyntää betonin kuivattamiseen betonoinnin jälkeen.

Lämmityslanka on 2 mm paksuista teräslankaa, joka on päällystetty muovilla. Suurin sallittu lämmitysteho saa kyseisellä langalla olla 120 W/m, mutta suunnittelussa lasketaan 100 W/m. Etäisyys lämmityslangoilla on 100–250 mm ja lämmityslangoille ohjataan sähköä yleensä muuntajan kautta, jonka avulla voidaan säätää tehon määrää. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s. 507-510.)

Lankalämmityksen lämmityksentarpeesta on tehty ohjetaulukko kuvassa 3, josta voi selvittää kuinka paljon lämmityskaapelia tarvitsee, jotta saavuttaa halutun lopputuloksen. Taulukon käyttämiseen tarvitsee käytettävän betonin lämpötilan, rakenteen tyyppin, lämpöeristyksen ja halutun lämpötilan muutoksen. Vastaukseksi taulukosta saa kuinka paljon tehoa kW tarvitaan betonikuutiota kohden. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.509)



Kuva 3. Lankalämmityksen sähkötalon määrittäminen (Suomen betoniyhdistys, 2018)

2.5.2 Sähkölämmitteiset suurmuotit

Sähkölämmitteisissä muoteissa on sisäpinnan ja lämmöneristeen väliin asennettu lämpövastuksia, joiden avulla saadaan lämpöenergiaa valettavaan pintaan. Lämpövastuksia voidaan myös käyttää ennen betonointia muotin sulatukseen. Sähkölämmitteisiä suurmuotteja voidaan käyttää monia kertoja ja niitä käytetään seinä- ja pöytämuotteina. On myös mahdollista käyttää lisälämmityksenä lankalämmitystä, jotta saadaan varmistettua tarpeeksi korkea lämpötila. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s. 510 – 511.)

2.5.3 Infrapunasäteilylämmitys

Infrapunalämmityksessä käytetään säteilyenergiaa, jonka avulla siirretään lämmitysenergia lämmitettävään kohteeseen. Lämmittimiä käytetään muun muassa massiivisten rakenteiden lämmittämiseen. Lämmittimien tehoa laskevat ilmavirtaukset, joten tila on saatava mahdollisimman tiiviiksi. Ennen lämmittimien käyttöä, on varmistettava säteilyenergian eteneminen ja hyvä lämmöneristäminen, myös suojaaminen on suositeltavaa. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.511-513.)

2.5.4 Kuumailmalämmitys

Kuumailmalämmityksen avulla lämmitetään muottia, betonia ja estetään betonin oman lämmön siirtymistä pois rakenteesta. Lämmittimiä käyttäessä tila täytyy tiivistää hyvin, jotta lämmitysenergia saadaan hyödynnettyä betonin lämmittämiseen. Jos kuumailmapuhallin tuottaa palamiskaasuja, täytyy varmistaa tuuletus tilaan. Lämmitystapaa käytetään vaakarakenteiden lämmitykseen yleisesti. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.513-514.)

2.5.5 Hörylämmitys

Hörylämmitystä käytetään pääsääntöisesti vain lumen ja jään sulatukseen. Lämmitettäviä kohteita höyryn avulla on esimerkiksi jäätyneet raudoitukset, muotit ja elementit. Hörylämmityksen sulatusteho perustuu siihen, että suuren lämpökuorman omaava vesihöyry, suunnataan suuttimen avulla tarkasti sulatettavaan kohteeseen. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.514.)

2.6 Betonin lämpökäsittely

Lämpökäsittely tarkoittaa betonin lämpötilan tavoitteellista nostamista korkeaksi. Betoni katsotaan lämpökäsitellyksi, kun betonin lämpötila yli 40 astetta, kovettumisvaiheessa lämpötila yli 50 astetta ja myös lämpötilan nousu kovettumisvaiheessa yli 25 astetta. Korkean lämpötilan avulla tavoitellaan nopeampaa lujuudenkehitystä ja etenkin varhaislujuuksia. Lämpökäsittelyllä tavoitellaan muottikierron nopeuttamista, koska betoni saavuttaa nopeammin muotinpurkulujuuden. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.504 – 505.)

Lämpökäsittelyn merkittävimpanä haittavaikutuksena on loppulujuuden aleneminen. Lujuuskato suurenee lämpötilan mukaan eli mitä korkeampi lämpötila, sitä suurempi lujuuskato. Odotettavaa lujuuskatoa tulee 50–70 asteisessa lämpökäsittelyssä on 15–20 %. Myös betonin pakkasenkestävyys alenee lämpökäsittelyn vaikutuksena. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.504 – 505.)

Haittavaikutuksia voidaan vähentää betonin lämpötilan muutoksia hallitsemalla. Lämpötila ei saa nousta eikä laskea liian nopeasti ja lämmönvaihtelut eivät saa olla epätasaisia. Lämpötilan maksimaalinen nousukorkeus tunnissa riippuu rakenteen tyypistä, koska ohuissa rakenteissa se voi olla 30 astetta ja massiivirakenteissa 10 astetta. Betoni saa jäähtyä maksimissaan 20 astetta tunnissa, koska muuten halkeilemisen riski nousee. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.504 – 505.)

3 TUULIVOIMALAN PERUSTUS

Perustus rakennettiin Nordex N163/5.x tuulivoimalalle, jonka turbiinikorkeus on 148 metriä (Nordex, 2023.) Voimalan tehoksi on ilmoitettu yli 5MW ja siipien halkaisija on 163 metriä. Voimala toimii 3–26 m/s tuulennopeuksilla. Kuvassa 4, näkyy tuulivoimala, jolle perustus on suunniteltu (Renewable energy magazine, 2019.)

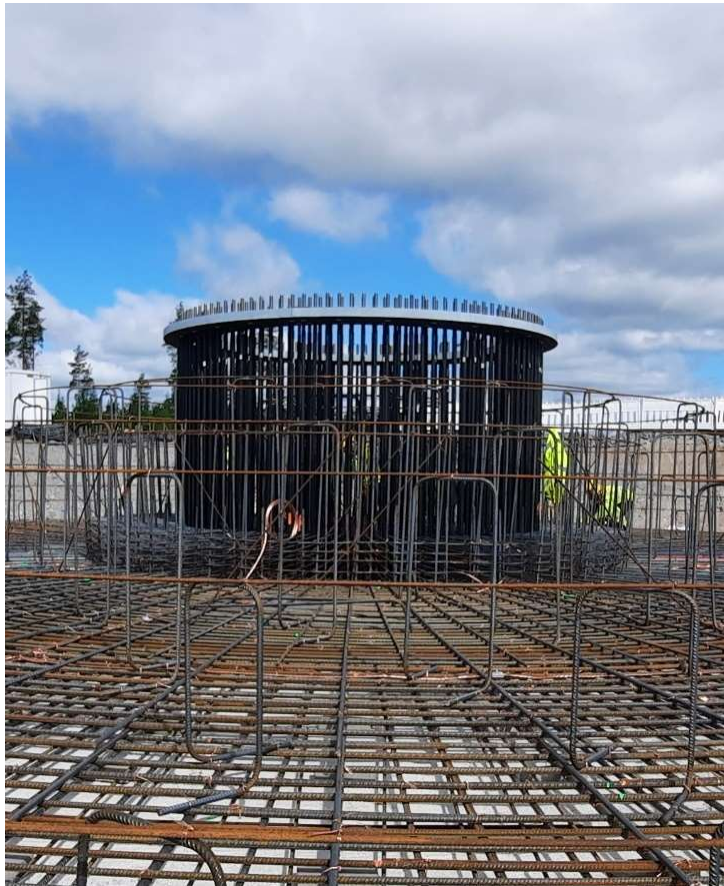


Kuva 4. Nordex N163/5.X (Renewable energy magazine, 2019)

Opinnäytetyössä tutkittavan tuulivoimalan perustus on paaluperusteinen. Perustuksen halkaisija on 23 metriä ja korkeus hieman yli 3 metriä. Perustukseen käytetään yhteensä noin 750m³ betonia ja betonilaadut ovat C35/45 ja C50 /60. Lujusluokaltaan suurempaa käytetään ankkurikehän ala – ja yläkehälle.

Perustus on paaluperusteinen maaperän heikon kantavuuden takia. Paaluina käytettiin teräsbetonipaaluja, joiden koko oli 300 mm x 300 mm. Paaluja on yhteensä noin 100 kappaletta ja niiden keskipituus on noin 10 metriä.

Perustuksen keskellä on ankkurikehä, mihin tuulivoimalan torni kiinnitetään. Kuvassa 5 on opinnäytetyössä käsiteltävän perustuksen ankkurikehä asennettuna. Opinnäytetyössä tutkitun perustuksen raudoitus painaa noin 110 tuhatta kiloa.



Kuva 5. Ankkurikehä perustuksessa

3.1 Suoritetut tutkimukset

Opinnäytetyössä suoritettavien tutkimuksien avulla tutkittiin perustuksen lämpötiloja ja betonin käyttäytymistä kylmissä olosuhteissa. Tutkimukset suoritettiin työmaalla perustuksen valun yhteydessä. Betonoinnin yhteydessä tehtiin tarkka betonointipöytäkirja, missä näkyy käytetty betoni, minne betoni on valettu, betonautojen tulo- ja purkuajat. Työmaalla oli erikseen ulkolämpötilamittaukseen tarkoitettu dataloggeri, josta sain tarvittavat ulkolämpötilatiedot.

Lämmönmittauslaitteina käytettiin dataloggereita, jotka mittaavat lämpötilan halutun aikavälein. Kuvassa 6 on lämpötilatutkimuksissa käytetty dataloggeri. Dataloggeri suorittaa lämmönmittauskaapelin avulla, joka on tarkoitettu mittarille. Mittareiden kalibrointi oli suoritettu 2022 vuonna ja mittatarkkuus dataloggerissa on $\pm 0,7$ °C. (Onsetcomp, 2022.)



Kuva 6. Lämpötilamittauksissa käytetty dataloggeri

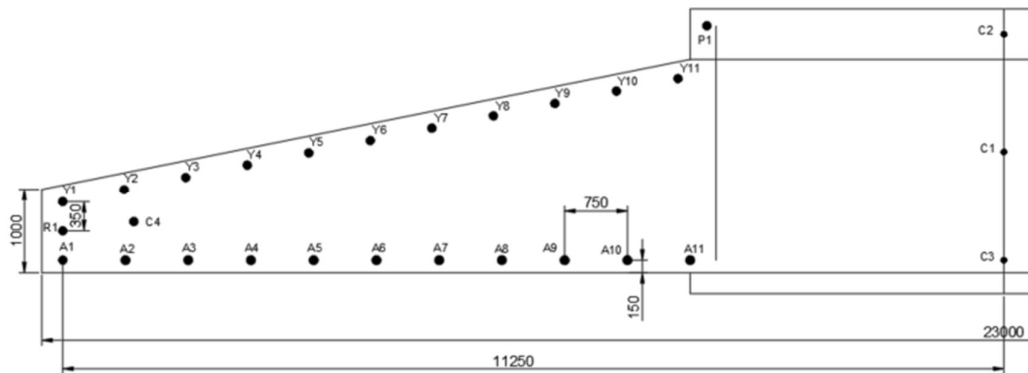
3.2 Perustuksen lämpötilamittaukset

Toimeksiantajayrityksen työmailla mitataan lämpöä jokaisesta perustuksesta neljästä mittauspisteestä. Mittauksien avulla saadaan seurattua betonin lämpötilaa lujuudenkehityksen aikana, jotta voidaan varmistua hyvästä lujuudenkehityksestä.

Tavoitteena lämpötilan mittauksilla opinnäytetyössä on saada tietoa, miten perustuksen lämpötilat muuttuvat eri työvaiheiden aikana. Esimerkiksi, miten betonin pinnan lämpötila muuttuu, kun se suojataan betonoinnin jälkeen. Mittauksien on tarkoitus toimia myös laadunvarmistuksena. Mittauksien avulla varmistetaan lujuudenkehityksen kannalta riittävien lämpötilojen saavuttaminen.

Opinnäytetyön lämpötilatutkimuksissa käytin lisäksi 24 mittauspistettä, jotka sijaitsivat perustuksen rajapinnoissa. Mittauspisteiden paikka määräytyi

rajapintoihin, koska siellä lämpötilanvaihtelut ovat suurimmillaan. Kuvassa 7 näkyvät mittauspisteiden paikat, joita tutkimuksessa käytin.



Kuva 7. Perustuksen lämmönmittauspisteet

3.3 Olosuhdekappaleet

”Olosuhdekoekappaleilla tarkoitetaan työmaalla valettavia, betonin lujuudenkehityksen arviointia varten valmistettuja koekappaleita, joita säilytetään työmaalla yleensä valetun rakenteen vieressä” (Suomen betoniyhdistys, 2021, s.87). Olosuhdekappaleita ei saa sekoittaa työmaakoekappaleisiin, koska työmaakoekappaleet ovat lujuudenkehityksen kannalta hyvissä olosuhteissa ja niiden avulla voidaan arvioida käytetyn betonin lujuutta. Olosuhdekoekappaleiden käyttäminen lujuudenkehityksen arvioimiseen on kielletty, koska kappaleiden olosuhteet ja lämpötilat eroavat valetusta rakenteesta paljon. (Suomen betoniyhdistys, 2021, s.87-88.)

Tavoitteena olosuhdekappaleilla on saada tietoa, miten betoni käyttäytyy kylmissä olosuhteissa. Olosuhdekappaleina tutkimuksessa on koekuutiot, jotka puristamalla saadaan betoninkuutiolujuus. Jokaisen kuution lämpötilaa mitataan erikseen ja lämpötila mittausten avulla pystytään laskemaan laskennallinen lujuudenkehitys kappaleille. Pystyin tekemään johtopäätöksiä betonin lujuudenkehityksen yhteydestä lämpötiloihin.

Koekuutiot tehdään perustukseen käytettävästä betonista lujuusluokaltaan C35/45. Koekuutioita tehdään 6 kappaletta, joista 3 kappaletta puristetaan 2 päivän ikäisenä ja 3 kappaletta 5 päivän ikäisenä. Kuutioita säilytetään perustuksen valmiin pinnan päällä suojausten alla. Kuvassa 8 on tehdyt olosuhdekappaleet ennen perustuksen päälle viemistä.



Kuva 8. Tutkimukseen tehdyt olosuhdekappaleet

4 BETONOINTI

Perustuksen betonointi tapahtui 21.11.2022. Betoni valmistettiin työmaan läheisyydessä olevilla kahdella siirrettävällä betoniasemalla. Kuljetuskalustoa valua varten oli varattu 8 kuorma-autoa, joiden kuormatilavuuden keskiarvo oli 13,5 m³. Työmaalla oli kaksi betonipumppuautoa, joista toinen oli samalla varapumppu.

4.1 Esilämmittäminen

Perustuksen esilämmittäminen suoritettiin kuvassa 9 olevalla Talhu heat 250, joka on teholtaan 195 kW (Talhu, 2023). Lämmitin on suuritehoinen, mutta kyseisen perustuksen lämmitykseen sopiva, koska suojaus ei ole eristävä. Myös suojapeite vuotaa paljon ilmaa, joten suuritehoisella lämmittimellä saatiin varmasti sulatettua perustus.



Kuva 9. Talhu heat 250

Perustus suojattiin suojapeitteillä ja suojapeitteen päälle asennettiin painoksi lankkuja pitämään peite paikoillaan. Kuvassa 10 näkyy lämmittimen puhallusputki, joka on asennettu peitteiden alle. Lämmittäminen aloitettiin kaksi päivää ennen betonointia. Suojapeite ja lämmitin poistettiin noin 1–2 h ennen betonointia. Kuvassa 10 on opinnäytetyön perustus, joka on valmiina lämmittämiseen.

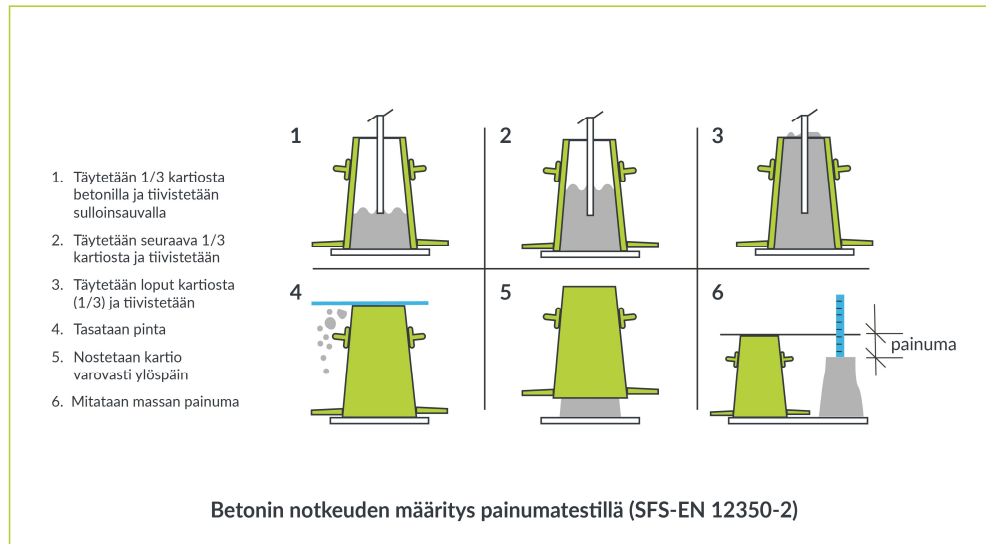


Kuva 10. Perustuksen esilämmitys

4.2 Betonin laadunvalvonta

Työmaalla oli siirrettävä laadunvalvonta kokonaisuus, johon kuului laboratorio-kontti, katos, vesipiste ja generaattori. Laadunvalvonnan ja koelieriöiden tekemisen suoritti työmaalla aliorakoitsija. Jokaisesta betonikuormasta, joka saapui työmaalle, mitattiin painuma ja lämpötila. Lämpötilan merkitys kylmissä olosuhteissa korostui, jotta perustuksessa pysyy tarvittava lämpö betonoinnin aikana.

Painumakokeiden avulla mitataan betonin notkeutta. Betonin notkeus on betonoinnin kannalta tärkeä ominaisuus, koska notkeus vaikuttaa betonoinnin työstämiseen merkittävästi. Painumakokeet suoritettiin kuvassa 11 olevan ohjeen mukaisesti (Betonitieto, 2023.)



Kuva 11. Betonin notkeuden määrittäminen (Betonitieto, 2023)

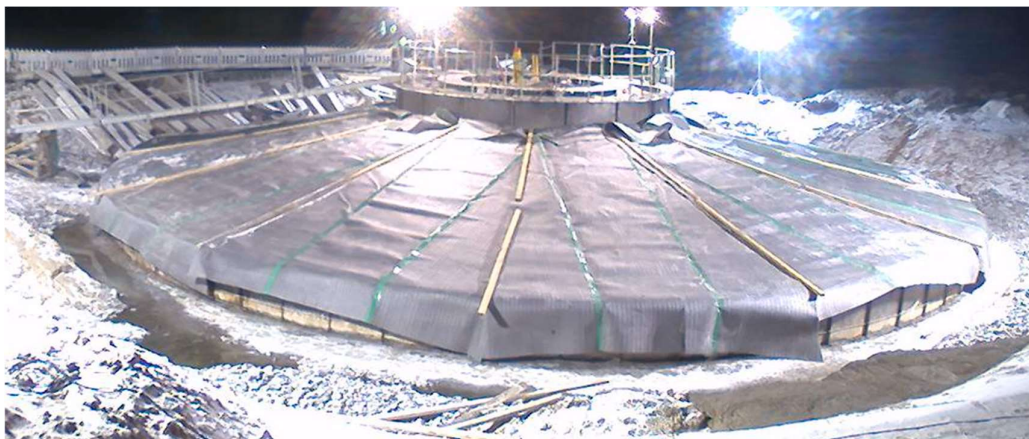
Betonista tehtiin koelieriöitä, jotka säilytettiin laboratoriotilassa. Koelieriöiden avulla mitataan käytetyn betonin lujuudenkehitystä. Koelieriöitä puristettiin 14 päivän, 28 päivän ja 91 päivän aikajaksoilla. Lujuudenkehityksen varmistaminen on tärkeä toimenpide betonoinnissa, koska sen avulla varmistetaan, että käytetty betoni saavuttaa suunnitellut lujuudet. Kuvassa 12 on työmaalla ollut laadunvalvontapiste.



Kuva 12. Betonin laadunvalvontapiste

4.3 Suojaaminen

Betonipinnan hiertämisen jälkeen pinnalle levitettiin jälkihoitoaine, jonka avulla estetään betonin liiallista veden haihtumista (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.343). Jälkihoitoaineen jälkeen betonin pinta peitettiin pakkasmatolla. Pakkasmaton paksuus oli 10 mm ja pakkasmaton päälle asetettiin puulankkuja, jotta eristeet pysyvät paikallaan yön yli. Aamulla perustuksen päälle asennettiin suojapeitteet, jotta saatiin perustus suojattua sääolosuhteilta. Kuvassa 13 on opinnäytetyön perustus pakkasmatolla suojattuna.



Kuva 13. Pakkasmatolla peitetty perustus

4.4 Tutkimusten suoritus

Lämpötilan mittauspisteet asensin raudoitukseen kiinni teipillä muutama päivä ennen betonointia. Kaapelit asennettiin mahdollisimman hyvin suojaan raudoituksen alle, jotta välttyttäisiin mittapisteiden hajoamiselta. Dataloggerit olivat perustuksen keskellä suojakoteloissaan.

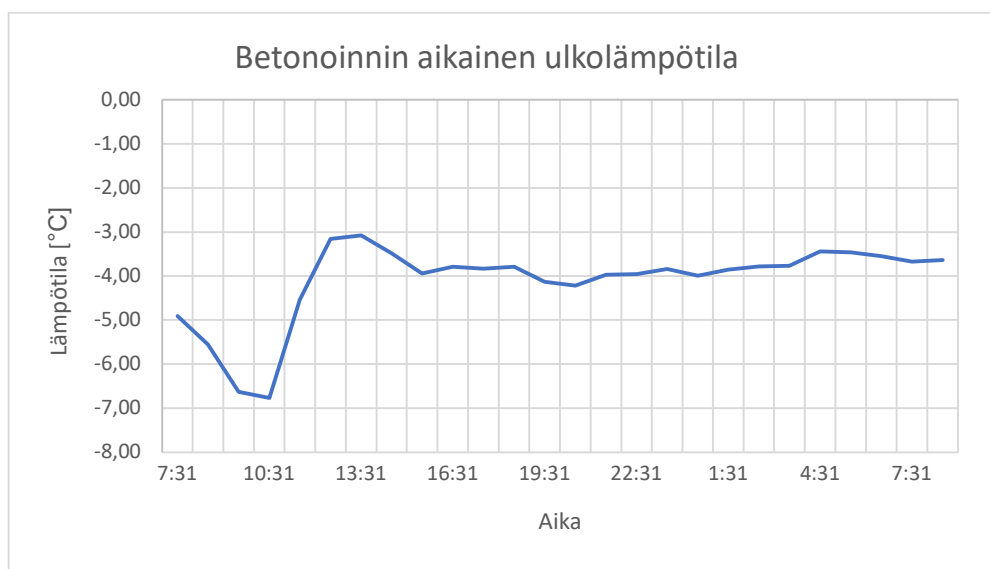
Olosuhdekappaleet valmistin viimeisestä C35/45 betonikuormasta. Kappaleet olivat noin tunnin säilytyksessä laboriokontissa, koska valmista pintaa perustuksessa ei ollut vielä valmiina. Kappaleet siirrettiin perustuksen päälle noin kello 20:45 ja olivat ilman suojausta pari tuntia. Kuvassa 14 näkyy olosuhdekappaleiden säilytys ennen suojausta. Kappaleiden päälle asensin väliaikaisen pakkasmaton kuvan jälkeen ja parin tunnin jälkeen koko perustus peitettiin pakkasmatolla.



Kuva 14. Olosuhdekappaleet ennen suojausta

4.5 Olosuhteet

Kuvaajassa 4 on betonoinnin aikainen ulkolämpötila. Betonoinnin alkaessa lämpötila oli noin -5 astetta ja aamulla hetkellisesti melkein -7 asteessa. Lämpötila tasoittui puolen päivän aikaan loppuajaksi -4 asteeseen. Päivän aikana oli myös satunnaisia lumikuuroja. Kylmän lämpötilan takia täytyi kiinnittää huomiota käytetyn betonin lämpötilaan. Opinnäytetyön tutkimusten kannalta olosuhteet olivat hyvät, koska lämmönvaihtelut olivat suurempia.



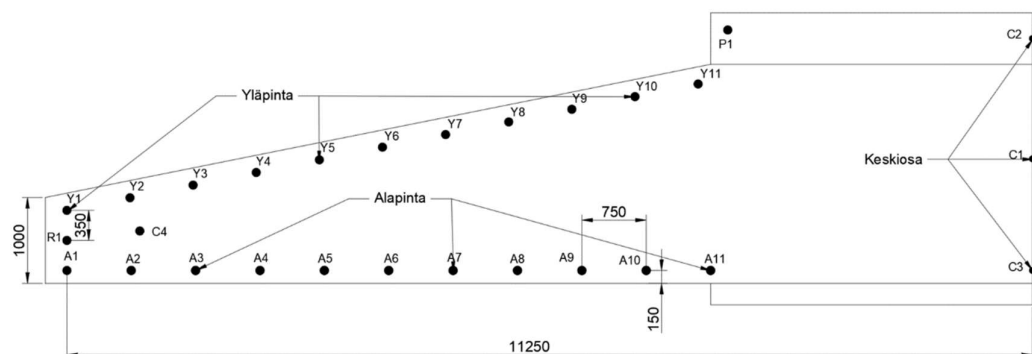
Kuvaaja 4. Ulkolämpötila betonoinnin aikana

5 PERUSTUKSEN LÄMPÖTILAMITTAUKSIEN ANALYSOINTI

Lämpötilan mittaukset alkoivat kaksi päivää ennen betonointia ja jatkuivat noin 3.5 viikkoa. Perustuksen lämpötiloista saatiin kerättyä paljon tutkimustietoa ja tutkimusten aikana kaksi mittauspistettä vaurioitui. Kaikki muut paitsi kyseiset kaksi mittapistettä keräsivät luotettavaa lämpötilan mittaustietoa. Dataloggerit mittasivat 15 minuutin aikavälein lämpötilan.

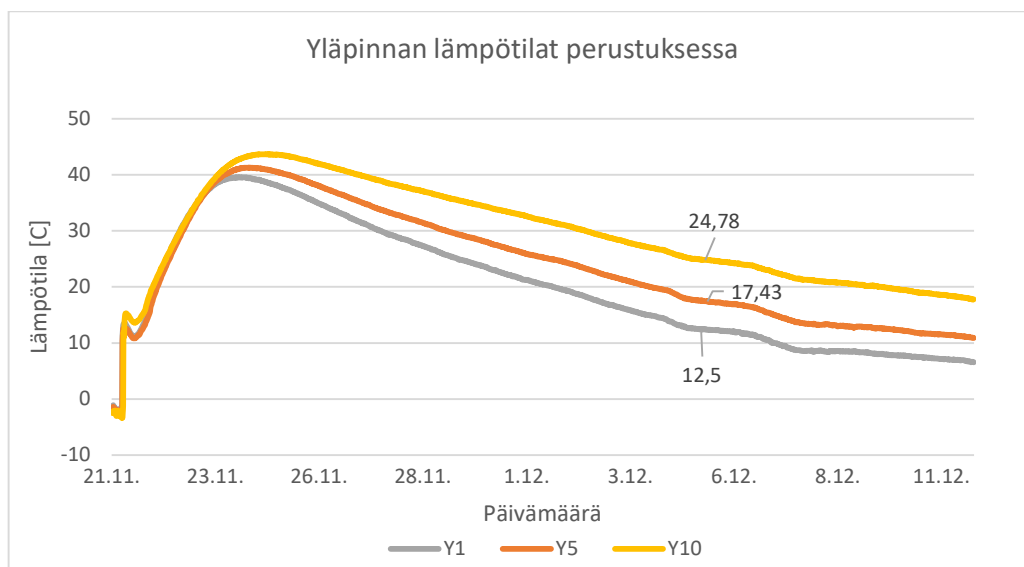
5.1 Perustuksen lämpötilat

Perustuksen lämpötiloja tarkastellessa ei löytynyt ongelmia ja lämpötilat nousivat ja laskivat tasaisesti. Liian alhaisia lämpötiloja ei löytynyt rakenteesta. Kokonaisuudessaan voidaan todeta, että lujuudenkehitys perustuksessa on lämpötilojen puolesta varmaa. Kuvassa 15 on tarkasteltavien mittapisteiden sijainti perustuksessa.



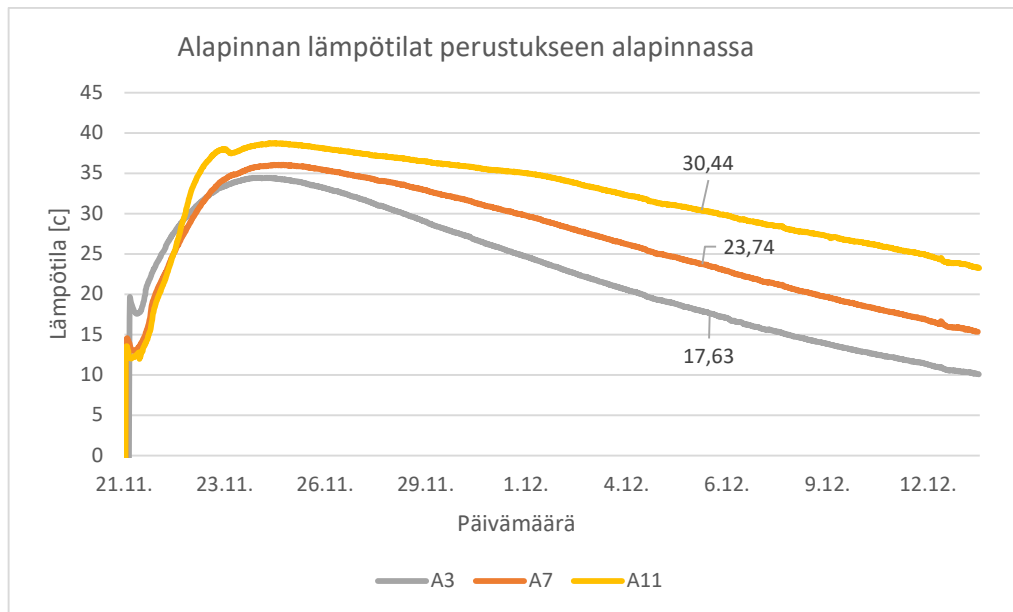
Kuva 15. Kuvaajien mittauspisteet

Kuvaajassa 5 on yläpinnan lämpötilat perustuksesta. Lämpötila nousi yläpinnassa noin 40 asteeseen, josta alkoi laskemaan tasaisesti noin kahden asteen vuorokausivauhdilla. Kahden viikon jälkeen yläpinnan lämpötila oli vielä keskimäärin 18 astetta. Yläpinnan lämpötilat paranivat, mitä lähempänä perustuksen keskipistettä mittauspiste oli.



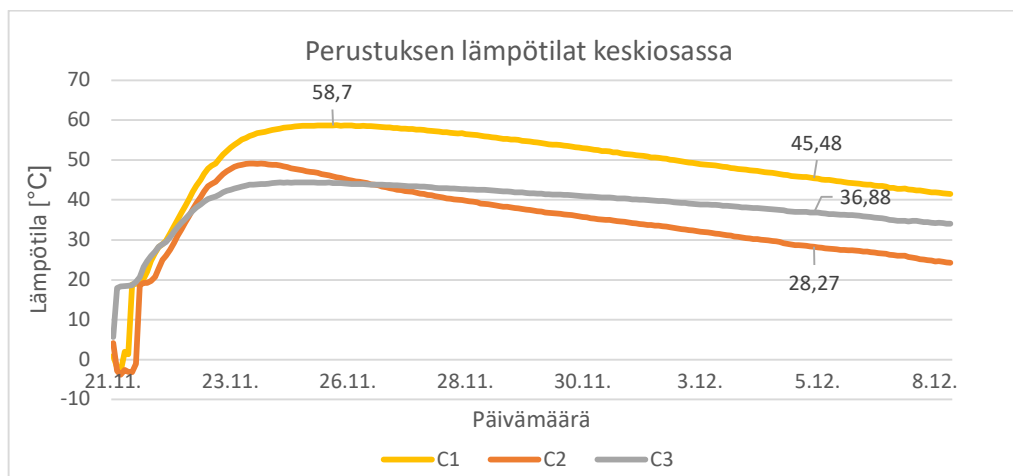
Kuvajaa 5. Yläpinnan lämpötilat perustuksessa

Kuvaajassa 6 on alapinnan lämpötilat perustuksessa. Alapinnassa lämpötila nousi noin 35–40 asteeseen. Mittauspisteiden lämpötilat nousivat tasaisesti edellä mainittuihin lämpötiloihin. Lämpötilat alkoivat laskemaan noin 1.5 asteella vuorokaudessa. Alapinnan mittauspisteiden väliset erot olivat pienet, noin 1–2 astetta 750 mm matkalla, joten ne ovat selvästi alle sallitun rajan. Alapinnan lämpötila oli kahden viikon jälkeen keskimäärin 23 astetta.



Kuvaaja 6. Alapinnan lämpötilat perustuksessa

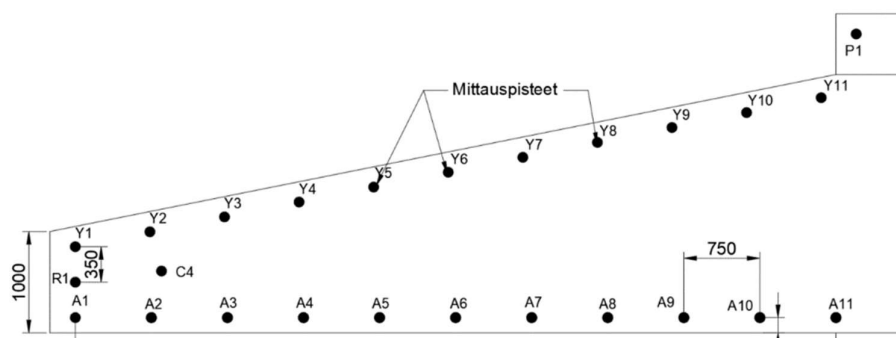
Kuvaajassa 7 on perustuksen keskiosan lämpötiloista. Perustuksen keskiosan lämpötila nousi korkeimmillaan 58,7 asteeseen, joka on vielä alle maksimilämpötilan 60 astetta. Betonin lämpötilaerot keskeltä ylä- ja alapintaan olivat korkeintaan noin 17 astetta. Mittauspisteiden välinen etäisyys ero on hieman yli metrin. Lämpötilaerot ovat siis alle maksimilämpötilaeron 20 astetta 1 metrin matkalla. Kokonaisuudessaan perustuksen keskiosan lämpötilat luovat hyvät olosuhteet lujudenkehityksen kannalta. Kahden viikon jälkeen lämpötilat olivat keskimäärin 37 astetta. (Suomen betoniyhdistys, 2021, s.76.)



Kuvaaja 7. Keskiosan lämpötilat perustuksessa

5.2 Työvaiheiden vaikutus

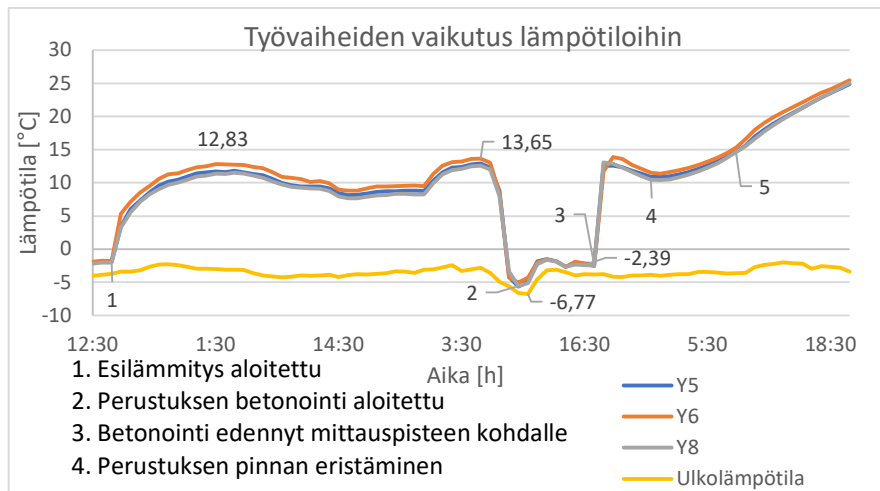
Kuvassa 15 on lämpötilamittauspisteiden sijainti perustuksessa ja kuvaajassa 8 on työvaiheiden vaikutukset lämpötiloihin. Kylmän ulkolämpötilan ansiosta, eri työvaiheiden vaikutukset näkyvät hyvin lämpötiloissa. Perustuksen esilämmittäminen alkoi kuvaajan kohdassa 1. Lämmittämisen aikana lämpötila nousi ulkolämpötilaan verrattuna noin 15 astetta. Perustusta lämmitettiin kaksi vuorokautta, jolla varmistettiin lumen ja jään täysi sulaminen pois perustuksesta. Myös rauditus on lämmennyt, joka parantaa lämpötiloja, koska betonin lämpöenergia ei kulu raudituksen lämmittämiseen.



Kuva 15. Työvaiheiden vaikutuksien lämmönmittauspisteet

Ennen betonointia suojauksen ja lämmityksen poistaminen näkyy jyrkkänä lämpötilan laskuna. Kuvaajassa 8 kohdassa 2 aloitettiin betonointi ja lämmön nousu mittapisteissä aiheutuu betonin lämmön siirtymisestä. Kohdassa 3 betonointi on edennyt mittauspisteiden kohdalle ja lämpötila nousee valettavan betonin lämpöiseksi.

Kohdassa 4 aloitettiin betonin pinnan suojaaminen. Pinnalle levitettiin 10 mm paksu pakkasmatto, jolla estetään betonin lämpötilan laskemista. Pakkasmaton asentamisen jälkeen betonin lämmönlaskeminen loppuu ja lämpötila alkaa nousemaan selvästi. Kohdassa 5 asennetaan vielä perustuksen päälle raskaspeite suojaamaan perustusta. Lämpötila nousee vielä hieman paremmin, mutta raskas peitteen pääasiallinen idea on suojata perustusta sääolosuhteilta.



Kuvaaja 8. Työvaiheiden vaikutus lämpötiloihin

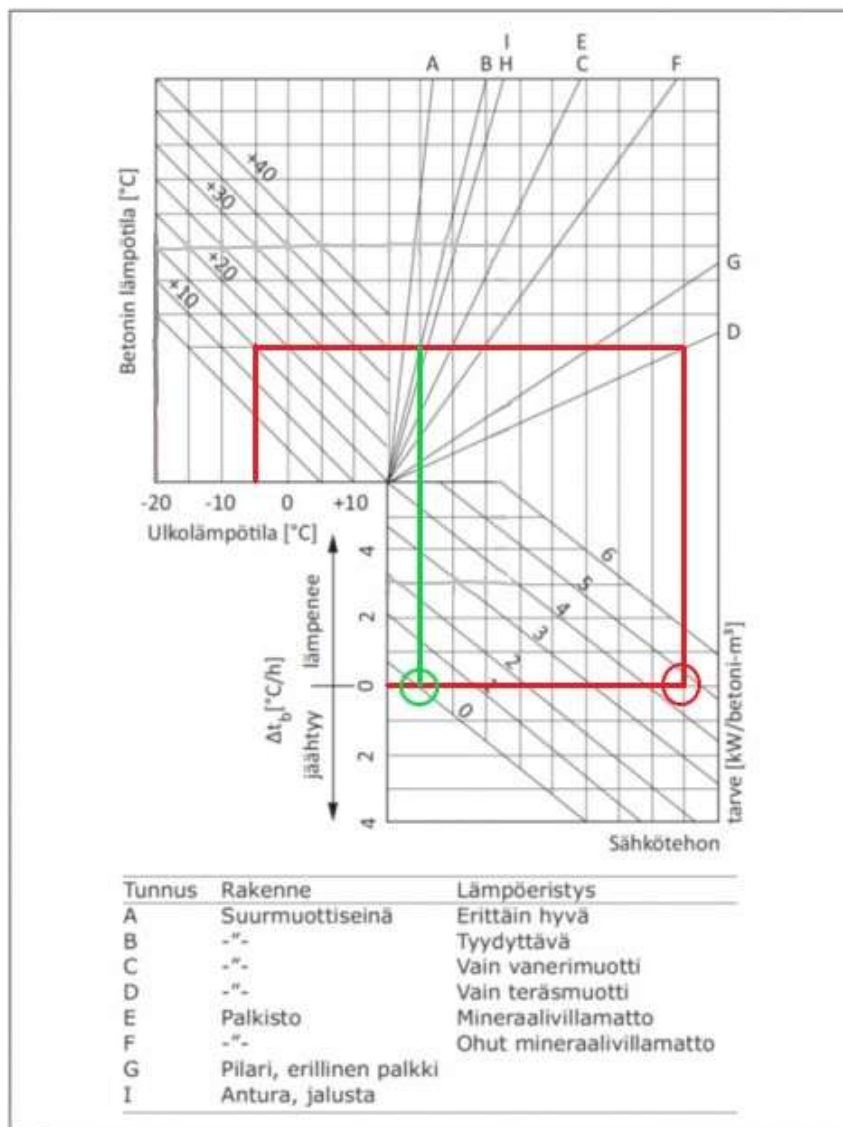
Betonin pinnan lämmöneristyksen huolellisemmalla asentamisella saavutettaisiin korkeammat lämpötilat reuna-alueilla. Kuvassa 16 on nuolilla osoitettuna ongelmakohtia lämmöneristyksessä, jotka parantamalla saavutettaisiin vähemmän lämpöhäviötä. Lämmöneristys olisi suositeltavaa asentaa vähintään maahan asti ja kiinnittää esimerkiksi narulla perustuksen ympäri muotin alareunaan.



Kuva 16. Peitetyn perustuksen lämmöneristyksen parannuskohteet

Kuvassa 17 on mitoitettu lämmityksen tehontarve betonikuutiolle tyydyttävällä lämmöneristyksellä ja vain teräsmuotilla (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.509). Mitoitus nomogrammissa ei ole perustusta vastaavaa laskentatapaa, vaan tarkoituksena on havainnollistaa lämmöneristyksen merkitystä.

Mitoituksessa lähtökohtina on ollut betonin lämpötila + 15 astetta, ulkolämpötila – 5 astetta, suurmuottiseinä ja tavoitteena betonin lämpötilalle, ettei jäähydy tai lämpene. Punainen viiva kuvaa vain teräsmuotin tehontarpeen laskemista, jonka vastaukseksi tuli hieman noin 3.5 kW betonikuutiota kohden. Vihreä viiva kuvaa tyydyttävän lämmöneristyksen tehontarpeen laskemista, jonka vastaukseksi tuli 0 kW betonikuutiota kohden. Suurmuotissa eristyksellä on todella suuri ero lämmitystehon tarpeeseen, mutta tuulivoimalan perustuksessa ei saavutettaisi näin suuria hyötyjä.



Kuva 17. Lämmöneristyksen vaikutus lämmitystehon tarpeeseen (Suomen betoniyhdistys, 2018)

6 OLOSUHDEKAPPALEIDEN TULOKSIEN ANALYSOINTI

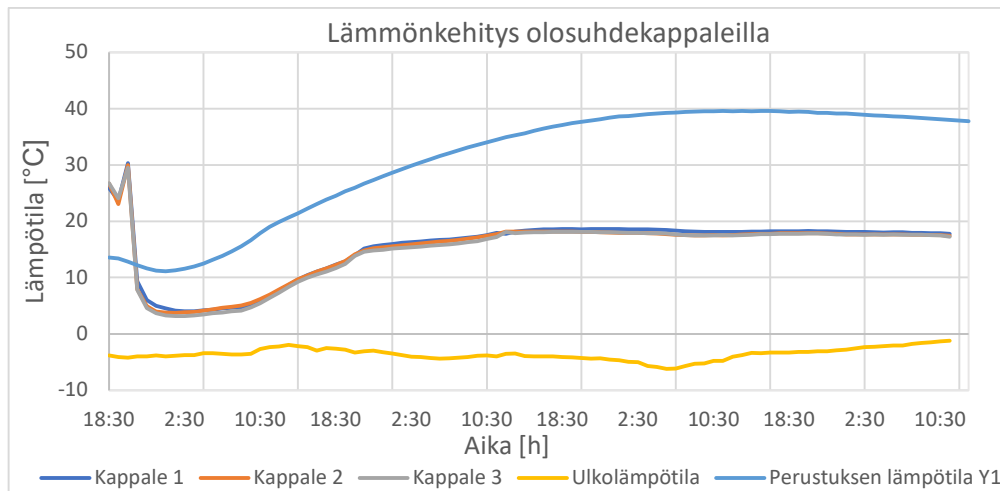
Kappaleet tehtiin noin kello 18:30 viimeisestä C35/45 kuormasta, koska sitä käytetään perustuksen laattaan. Massan lämpötila työmaalle saapuneena oli 22 astetta. Kappaleet tehtiin työmaan betonilaboratoriokontissa asianmukaisilla laitteilla.

6.1 Lämpötilat

Kappaleita säilytettiin laboratoriokontissa noin tunnin tekemisen jälkeen. Säilytyksen aikana betonin lämpötila nousi 30 asteeseen hetkellisesti. Kahden päivän ikäiset olosuhdekappaleet olivat perustuksen päällä lähempänä keskipistettä kuin 5 päivän ikäiset. Alimman lämpötilan 1 asteen ero luultavasti johtuu kappaleiden sijainnin aiheuttamista eroista.

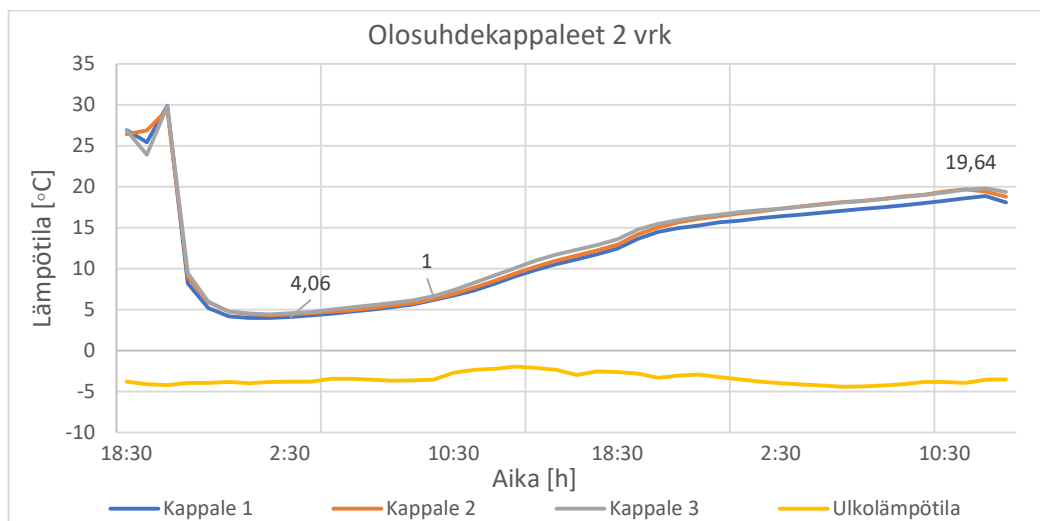
Kappaleet viilentyivät noin 4 asteeseen, koska kuutiot asennettiin betonin pinnalle ennen pakkasmattoa. Pakkasmatto asennettiin noin 2 tuntia kuutioiden jälkeen, joka näkyy merkittävänä lämpötila laskuna. Ulkolämpötila oli kuutioiden tutkimusten aikana keskiarvoltaan noin – 4 astetta.

Kuvaajassa 9 on perustuksen ja olosuhdekappaleiden lämmönkehitys. Olosuhdekappaleiden lämpötilat ovat viiden päivän ikäisten kappaleiden mittaus tulokset. Perustuksen lämpötilan mittauspisteenä on käytetty perustuksen yläpinnan lähimpänä reunaa olevaa mittauspistettä. Perustuksen lämpötila nousee noin 40 asteeseen ja olosuhdekappaleiden lämpötilat jäävät hieman alle 20 asteeseen. Perustuksen lämmönkehitys on myös huomattavasti tasaisempaa kuin olosuhdekappaleiden.



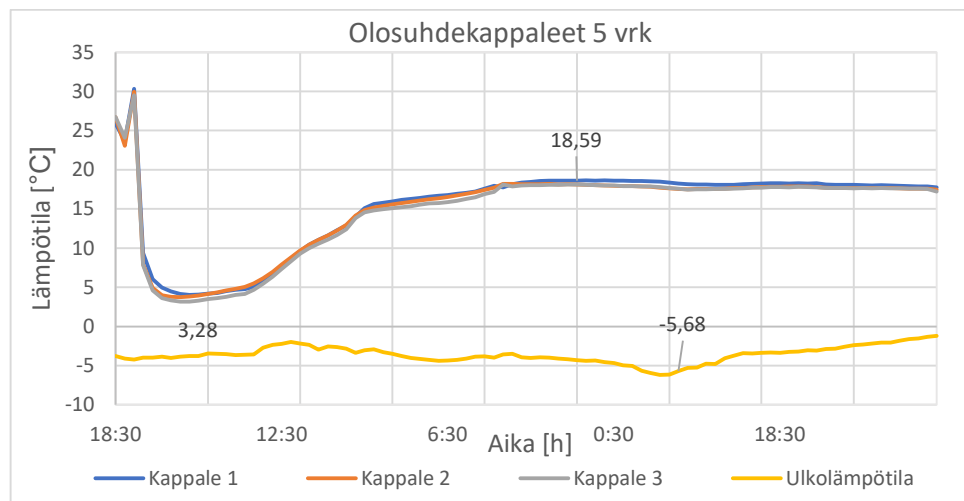
Kuvaaja 9. Olosuhdekappaleiden lämmönkehitys

Kahden päivän ikäisten kappaleiden lämpötilat näkyvät kuvaajassa 10. Kappaleiden lämpötilat kävivät alimmillaan noin 4 asteessa, joka hidasti merkittävästi lujuudenkehitystä. Lujuudenkehitys on ollut merkittävän hidasta lämpötilan ollessa 4 asteessa. Lämpötila nousi 4 asteesta hitaasti ja kohdassa 1 perustuksen päälle asennettiin suojapeite, jonka avulla lämpötila alkoi nousemaan nopeammin kappaleissa. Lämpötilan nousun avulla lujuudenkehitys kiihtyi uudelleen.



Kuvaajassa 10. Kahden päivän ikäisten olosuhdekappaleiden lämpötilat

Kuvaajassa 11 näkyvät viiden päivän ikäisten kappaleiden lämpötilat. Kappaleiden alin lämpötila oli 3 astetta, joka on 1 asteen pienempi kuin kahden päivän ikäisillä. Lämpötilaero 5 päivän ja 2 päivän ikäisissä kuutioissa oli noin yhden asteen ennen suojapeitettä luultavasti sijaintinsa takia, koska kappaleet olivat lähempänä ulkoreunaa. Myös 5 päivän ikäisten kuutioiden kuvaajassa 11 näkyy kohdassa 1 suojapeitteen asentamisen ajankohta, jonka vaikutuksesta lämpötila nousi 18 asteeseen. Lämpötila pysyi puristukseen asti tasaisesti 18 asteessa.



Kuvaaja 11. Viiden päivän ikäisten olosuhdekappaleiden lämpötilat

6.2 Puristuslujuudet

Taulukossa 1 näkyy olosuhdekappaleiden puristuslujuudet. Kappaleista tutkittiin niiden lujuus ja tiheys. Kuten edellä mainittu, niin ulkoinen toimija suoritti tutkimukset heidän betoniasemallaan.

Taulukko 1. Olosuhdekappaleiden puristuslujuudet

Kuormakirja	Tunnus	Valmistuspäivä	Lujuusluokka	Kappaleen ikä d	Puristimen voima KN	Lujuus ⁽¹⁾ Mpa	Tiheys Kg/m ³	Testauspäivä/ Kellonaika
2134	2134/Koe 1	21.11.2022	C35/45	2	100,3	4,45	2451	23.11.22/14:12
2134	2134/Koe 2	21.11.2022	C35/45	2	100,3	4,46	2429	23.11.22/14:15
2134	2134/Koe 3	21.11.2022	C35/45	2	106,1	4,71	2444	23.11.22/14:19
2134	2134/Koe 1	21.11.2022	C35/45	5	315,8	14,03	2427	25.11.22/13:36
2134	2134/Koe 2	21.11.2022	C35/45	5	312,1	13,87	2464	25.11.22/13:39
2134	2134/Koe 3	21.11.2022	C35/45	5	331,7	14,74	2428	25.11.22/13:43

1. 150 mm kuutiotulos

Kahden päivän ikäisten koekappaleiden tulokset ovat ylimmät kolme tulosta. Puristuslujuudet ovat keskimäärin 4.5 MPa ja betoni ei ole saavuttanut jääty-
mislujuutta. Koekappaleet 1 ja 2 lujuudet ovat melkein samanlaiset ja koekap-
pale 3 hieman suurempi. Koekappaleiden huono puristuslujuus johtuu siitä,
että lämpötila laski kappaleilla äkillisesti 4 asteeseen ja lujuudenkehitys pysäh-
tyi tai oli vähäistä.

Viiden päivän ikäisten koekappaleiden puristuslujuudet ovat selvästi parem-
mat kuin kahden päivän ikäiset. Puristuslujuudet ovat noin 14 MPa ja ovat noin
10 MPa suurempia kuin 2 päivän ikäiset. Lujuudenkehitys on alkanut uudel-
leen, kun kappaleiden lämpötila nousi ja pysyi lujuudenkehityksen kannalta
suotuisissa lämpötiloissa.

Taulukossa 2 on työmaalla suoritettujen ennakkokokeiden puristustuloksia.
Kahden päivän ikäisten kuutiopuristuslujuus on kappaleilla ollut 14,4 MPa ja
13,3 MPa. Tulokset ovat noin 9–10 MPa suurempia kuin olosuhdekappaleiden.
Ennakkokokeiden kappaleet ovat saavuttaneet kahdessa päivässä saman
verran puristuslujuutta kuin olosuhdekappaleet 5 päivän ikäisenä. Lujuuden-
kehitys on ollut ennakkokokeiden kappaleilla huomattavasti nopeampaa. En-
nakkokokeita ei ole tehty viiden päivän ikäisistä kappaleista, mutta seitsemän
päivän ikäisten kappaleiden kuutiopuristuslujuus on ollut noin 40 MPa.

Taulukko 2. Työmaalla suoritettujen ennakkokokeiden puristustulokset

Kuorma- kirja	Tunnus	Valmistus- päivä	Lujuus- luokka	Kappaleen ikä d	Puristimen voima KN	Lujuus ⁽²⁾ Mpa	Lujuus ⁽³⁾ Mpa	Tiheys Kg/m ³	Testauspäivä
607561	607561/ A2	6.4.2022	C35/45	2	203	11,4	14,4	2342	8.4.2022
607561	607561/A7	6.4.2022	C35/45	7	558	31,6	39,5	2351	13.4.2022
607562	607562/ AN2	6.4.2022	C35/45	2	187	10,6	13,3	2333	8.4.2022
607562	607562/AN7	6.4.2022	C35/45	7	561	31,7	39,8	2331	13.4.2022

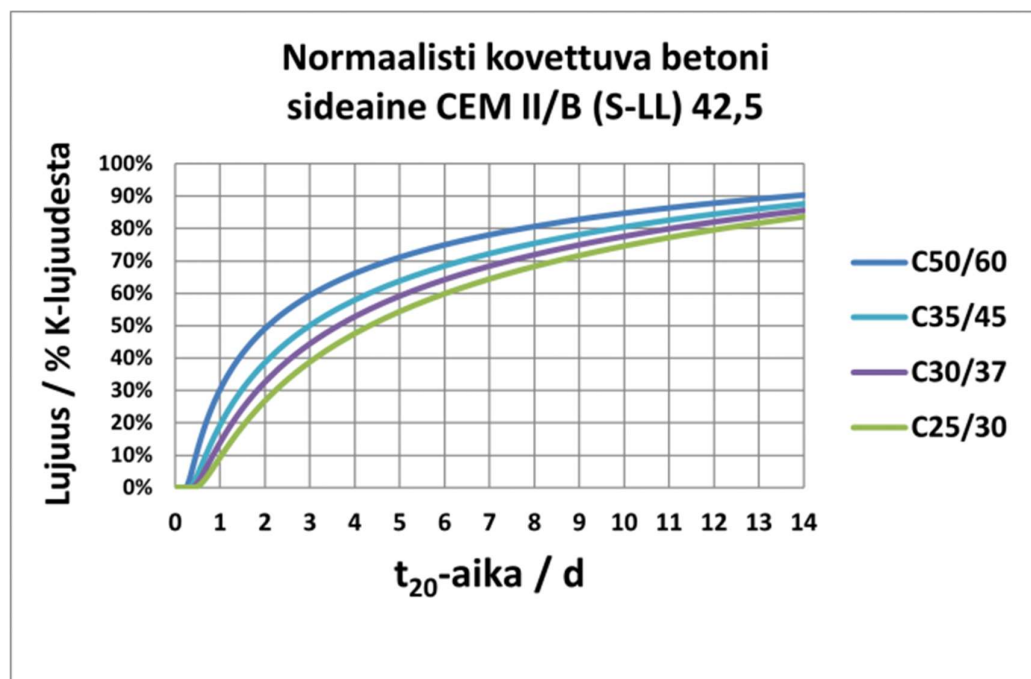
6.3 Lujuudenkehitys

Kappaleiden laskennallinen lujuudenkehitys on laskettu käyttäen sadgroven
kaavaa (1) (Betoniyhdistys, 2018, s.92 - 93). Sadgroven kaavan avulla pysty-
tään laskemaan betonin kypsyyslisä, jonka avulla voidaan arvioida lujuuden-
kehitystä. Kaavassa käytetään T eli betonin keskimääräistä lämpötilaa t eli

betonin kovettumisaika ja tulokseksi saadaan t_{20} eli kypsyyssikä. Kypsyyssikään hyödyntämiseen tarvitaan kuvaajan 12 mukaista taulukkoa, jotka ovat tietyille betonilaaduille tehty. Kypsyyssikään avulla saadaan kuvaajasta 12 betonin kuu- tiolajuuden arvo prosentteina. Opinnäytetyössä käytin yrityksen omien tutki- muksien perusteella tehtyä kuvaajan 12 kaltaista kuvaajaa. Yrityksen kuvaajan avulla sain tarkemmat tulokset, koska kuvaaja on tehty työmaalla käytettä- västä betonista. (Suomen betoniyhdistys, 2018, s.93.)

$$t_{20} = \sum_i^n \left(\frac{T + 16^{\circ}\text{C}}{36^{\circ}\text{C}} \right)^2 \times t \quad (1)$$

, jossa T on betonin lämpötila aikana t, t betonin kovettumisaika ja t_{20} on kyp- syyssikä.



Kuvaaja 12. Laskennallisen lujuudenkehitykseen käytettävä kuvaaja (Suomen betoniyhdistys, 2018)

Todettuina lämpötiloina käytin laskennassa apuna taulukosta 1 koekappaleen 1 lämpötila-arvoja, joka puristettiin 5 päivän ikäisenä. Puristuslujuuksina käytin koekappaleiden 1 todettuja puristuslujuuksia. Taulukossa 3 on sadgroven

lujuudenlaskennan arvot 2 vuorokauden laskennallisiin lujuuksiin. Taulukossa 3 kypsyyslisän t_{20} laskemisessa käytin sadgroven kaavaa (1) ja siinä T on keskimääräinen lämpötila ja tuloksen kerroin Δt [d] eli kovettumisajalla. Kovettumisaikana suorittamissani tutkimuksissa on 2 tunnin ajanjakso. Lujuuden sain kertomalla prosenttiarvon 45 MPa, koska käytetyn betonin kuutiolujuus oli 45 MPa. Taulukon 3 lujuuden arvo on saatu hyödyntämällä kuvaajan 12 arvoja.

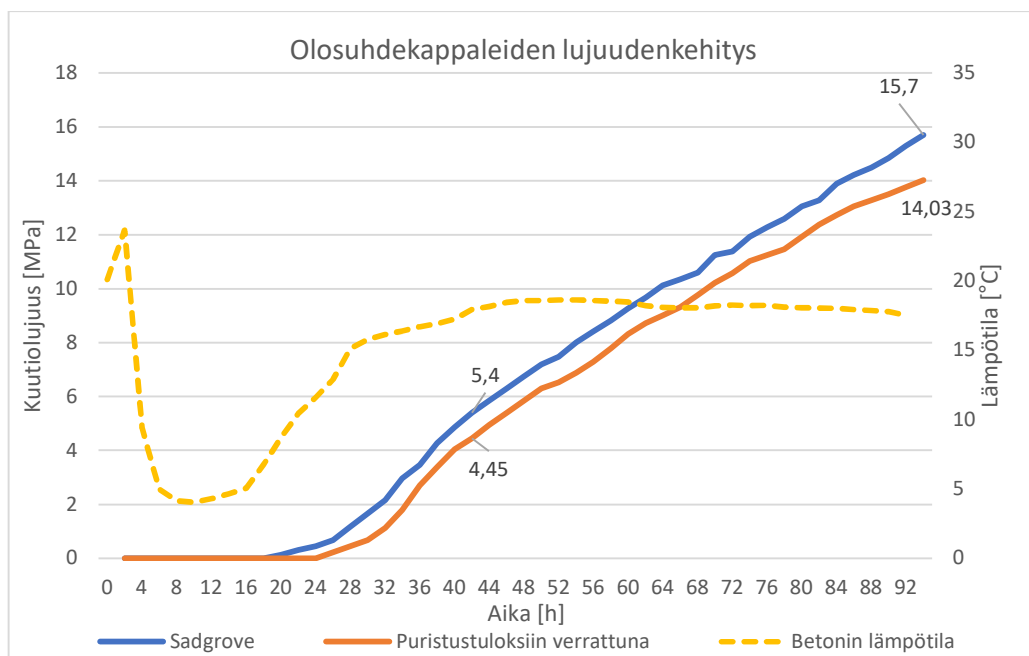
Taulukko 3. Sadgrove lujuuden laskentataulukko esimerkki 2 vrk

Aika [h]	Betonin lämpötila [°C]	Δt [h]	Δt [d]	Keskimääräinen lämpötila [°C]	Kypsyyslisä t_{20} [d]	Kypsyys Σt_{20} [d]	Lujuus / % K-lujuudesta	Lujuus [Mpa]
0	20,11							
2	23,67	2	0,083	21,89	0,092	0,09	0 %	0
4	9,4	2	0,083	16,54	0,068	0,16	0 %	0
6	4,98	2	0,083	7,19	0,035	0,19	0 %	0
8	4,14	2	0,083	4,56	0,000	0,19	0 %	0
10	4,04	2	0,083	4,09	0,000	0,19	0 %	0
12	4,3	2	0,083	4,17	0,026	0,22	0 %	0
14	4,65	2	0,083	4,48	0,027	0,25	0 %	0
16	5,06	2	0,083	4,86	0,028	0,28	1 %	0,23
18	6,76	2	0,083	5,91	0,031	0,31	1 %	0,45
20	8,67	2	0,083	7,72	0,036	0,34	2 %	0,9
22	10,43	2	0,083	9,55	0,042	0,39	3 %	1,35
24	11,6	2	0,083	11,02	0,047	0,43	4 %	1,8
26	12,9	2	0,083	12,25	0,051	0,48	5 %	2,25
28	15,13	2	0,083	14,02	0,058	0,54	6 %	2,7
30	15,8	2	0,083	15,47	0,064	0,60	8 %	3,6
32	16,14	2	0,083	15,97	0,066	0,67	10 %	4,5
34	16,4	2	0,083	16,27	0,067	0,74	12 %	5,4
36	16,7	2	0,083	16,55	0,068	0,81	14 %	6,3
38	16,93	2	0,083	16,82	0,069	0,87	17 %	7,65
40	17,24	2	0,083	17,09	0,070	0,95	20 %	9
42	17,94	2	0,083	17,59	0,073	1,02	22 %	9,9

Kuvaajassa 13 on olosuhdekappaleiden lujuudenkehitykset kuvattuna. Sininen viiva on laskennallinen lujuudenkehitys ja oranssi viiva on arvioitu todettuja puristuslujuuksia hyväksi käyttäen. Kuvaajassa oleva keltainen katkoviiva kuvaa kappaleiden lämpötilaa tutkimuksen aikana.

Laskennallinen tulos on hieman suurempi kuin todellinen tulos. Kahden päivän ikäisten kappaleiden puristuslujuus on noin 1 MPa suurempi, joka on pieni ero. Lujuudenkehitys on vain hieman hitaampi todellisesti kuin laskennallinen lujuudenkehitys. Kappaleiden olisi pitänyt saada vielä 1.7 MPa lisää loppulujuutta laskennallisesti.

Suurin ero laskennallisen ja todettujen välillä on luultavasti se, että laskennallinen ei ota huomioon kappaleen viilentymistä alussa. Laskennallisesti lujuudenkehitys nousee heti lämpötilan muutoksen mukaan. Kyseinen tutkimus osoittaa, että betonin lujuudenkehitys ei kiihdy yhtä nopeasti lämmön nousun mukana jäähtymisen jälkeen.



Kuvaaja 13. Olosuhdekappaleiden lujuudenkehitys

7 YHTEENVETO

Eri työvaiheiden vaikutus perustuksen lämpötiloihin on merkittävä talvibetonoinnin aikana. Kerättyjen tuloksien perusteella voidaan todeta, että nykyiset menetelmät ovat riittäviä opinnäytetyön tutkimuksien kaltaisissa olosuhteissa. Lämpötilojen nousu ja lasku tapahtuu perustuksessa tasaisesti ja myös lämpötilaerot ovat sallituissa rajoissa. Lämpötilat ei myöskään nouse liian korkeaksi, joten betonin lämpökäsittelyn aikainen lujuuskato on hallittua.

Perustuksen lämmöneristyksen huolellisemman asentamisen avulla saataisiin reuna-alueiden lämpötiloja korotettua. Huolellisemmalla lämmöneristyksellä reuna-alueiden lämmöneristys olisi merkittävästi parempi. Kokonaisuudessaan lämpötilat laskivat tasaisesti ulkoreunan suuntaan, mutta pysyivät vielä sallituissa rajoissa lujuudenkehityksen kannalta.

Olosuhdekappaleiden avulla tutkittiin betonin lujuudenkehitystä kylmissä olosuhteissa. Lämpötilan merkitys lujuudenkehitykseen saatiin hyvin selville saatujen tutkimustuloksien avulla. Lujuudenkehitys hidastuu merkittävästi lämpötilan vaikutuksesta ja lujuudenkehitys kiihtyy, kun betonin lämpötila nousee. Tutkimuksen avulla selvisi betonin lämpötilan ylläpitämisen merkitys.

Opinnäytetyössä käsiteltävä tuulivoimalan perustuksen betonoinnin laadunvarmistus on onnistunut. Tutkimustuloksien perusteella voidaan todeta, että betonin lujuudenkehitys on varmaa.

LÄHTEET

Betoni. (2013). Talvibetonointi. Suomen Rakennusmedia.

Betonitieto. (2023). Betonin lujuudenkehitys talvella.

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

Betonitieto. (2023). Betonin notkeus.

<https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta/tuoreen-betonimassan-ominaisuudet/notkeus.html>

Betonitieto. (2023). Massiivisten rakenteiden suunnittelussa huomioitavia asioita.

<https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/rakenteiden-toteutus suunnittelu-ja-mitoitus/massiivisten-rakenteiden-suunnittelussa-huomioitavia-asioita.html>

Nordex. (2023). THE N163/5. X.

<https://www.nordex-online.com/en/product/n163-5-x/>

Onsetcomp. (2022). HOBO 4-Channel Thermocouple Data Logger.

<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux120-014m>

Renewable energy magazine. (2019). Nordex Launches N163/5.X Turbine.

<https://www.renewableenergymagazine.com/wind/nordex-launches-n163-5-x-turbine-20190816>

Rudus. (2015). Nopeammin päällystettävä (NP) lattiabetoni käyttöohje.

<https://www.rudus.fi/ohjeet/betonin-ohjeet/np-lattiabetoni-kayttoohje>

Rudus. (2017). Betonin ominaisuudet talvella.

<https://www.rudus.fi/ohjeet/talvibetonointi-koulutus-2017#>

Rudus. (n.d). Pakkasbetoni.

<https://www.rudus.fi/hinnasto-ja-esitteet/esitteet/betoniesitteet>

Suomen betoniyhdistys. (2018). Betonitekniikan oppikirja BY201. BY-koulutus.

Suomen betoniyhdistys. (2021). Betoninormit 2021 BY 65. BY-koulutus.

Suomen betoniyhdistys, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. (2019).

BY71 / RIL 149 - 2019 Betonirakenteiden työmaatoteutus. Suomen betoniyhdistys, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.

Talhu. (2023). TALHU HEAT 250. Haettu 11. 2 2023 osoitteesta

<https://talhu.fi/tuotteet/lampo-energia-ja-olosuhdehallinta/talhu-heat-250/>