



Betonivalujen jäähdytysjärjestelmät

Case Kruunusillat

Atte Kopra

OPINNÄYTETYÖ
Tammikuu 2023

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentamisen opintosuunta

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakenne- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentamisen opintosuunta

Atte Kopra
Betoni- ja jäähdytysjärjestelmät
Case Kruunusillat

Opinnäytetyö 37 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2023

Tässä opinnäytetyössä kerrotaan betonivalujen jäähdytysjärjestelmistä, sekä sen käytännön toteutuksesta Kruunusillat-urakalla. Kruunusillat-urakka on suuri infrarakennusurakka Suomessa, jonka tarkoituksena on edistää pääkaupungin joukkoliikenteen sujuvuutta Laajasalon ja Helsingin keskusta-alueen välillä. Urakka koostuu kahdesta sillasta, Kruunuvuorensillasta, Finkensillasta, sekä Korkeasaaren esirakentamista.

Nykypäivänä betonirakentaminen on hyvin yleistä ja rakenteiden volyymit ovat suuria. Volyymien kasvaessa eräissä betonityypeissä kriittiseksi tekijäksi on tullut betonin kovettumisen aikainen lämpötilan nousu, rakenteen sisäiset lämpötilaerot ja niiden hallinta. Näitä pyritään hallitsemaan esimerkiksi vesikiertoisilla jäähdytysjärjestelmillä, joita käytetään paljon Kruunusillat-urakassa.

Opinnäytetyön lopputuloksena muodostuu esittely, miten jäähdytysjärjestelmiä on toteutettu Kruunusillat-projektilla. Aihe on melko uusi Suomessa, eikä siitä ole paljoakaan Suomenkielistä kirjallisuutta tai ohjeistusta.

Vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä on betonin jäähdyttämisessä hyvä toimintatapa. Sillä saadaan alennettua vesi-sementtimassan hydrataation aiheuttamaa lämpötilan nousua, sekä tasata betonin sisäisiä lämpötilaeroja.

Asiasanat: betoni, jäähdytys, lämmönkehitys, betonin jäähdytysjärjestelmä

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Civil engineering
Infrastructure construction

Atte Kopra
Concrete cooling systems
Case Kruunusillat

Bachelor's thesis 37 pages, appendices 2 pages
May 2023

The use of concrete in big structures is widespread due to its durability and affordability. However, when using concrete at high volumes, it is crucial to control the temperature development inside the structure. Concrete cooling systems have been developed to control the heat development and keep concrete temperature during hydration process sufficiently low without losing strength.

The purpose of this study was to examine the concrete cooling systems within the *Kruunusillat* -building project. *Kruunusillat* is a major infrastructure project which aims to improve transportations connection between Laajasalo and Helsinki city centre area. The Project consists of two bridges, Kruunuvuorensilta and Finkensilta. The centerpiece of the project is Kruunuvuorensilta, which is going to be 1,2 kilometers long, connecting areas in Kruunuvuorenranta and Korkeasaari.

The primary approach to this study was to collect data on site, different kind of measurements, interviewing experts, as well as researching international literature on the topic at hand.

This study demonstrates basics of concrete heat development behavior and valuable information about concrete cooling systems, mainly on how they are done within the *Kruunusillat* -project, how they are planned, as well as examining the cooling system power calculation, and analyzing the importance of cooling systems in certain conditions.

As a result, this study can function as an instruction of sorts on how these systems work, and hopefully there will be more literature about the topic in the future in Finland.

Key words: concrete, cooling, heat development, temperature, concrete cooling-systems

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	BETONI JA HYDRATAATIOLÄMPÖ	9
	2.1 Hydrataatioreaktio	9
	2.2 Lujuuden ja lämpötilan kehitys	10
	2.3 Vaikutus lujuus- ja säilyvyysominaisuuksiin	12
	2.4 Lämmönkehityksen mallinnusjärjestelmät	13
3	BETONIRAKENTEIDEN JÄÄHDYTYS	14
	3.1 Jäähdytys	14
	3.2 Toimintaperiaate	15
	3.3 Huomioitavia asioita	17
4	Betonivalujen lämmönhallinta Kruunusilloilla	18
	4.1 Jäähdytysjärjestelmä	18
	4.2 Toteutus	18
	4.3 Valmis järjestelmä	19
5	Lämpötilan kehityksen mallintaminen	21
	5.1 Esimerkkitalanne jäähdytyksen suunnittelusta	21
	5.2 Tilanne 1: Rakenne jäähdytyksellä	22
	5.3 Tilanne 2: Rakenne ilman jäähdytystä	24
	5.4 Mallinnetun rakenteen toteutuneet lämpötilat	25
6	Jäähdytysvaikutuksen mittaus käytännössä	27
	6.1 Finken sillan jäähdytysjärjestelmä	28
	6.2 Jäähdytysvaikutuksen mittaus	31
7	POHDINTA	33
	LÄHTEET	35
	LIITTEET	36
	Liite 1. Finkensillan kansirakenteen mittapiirustus	36
	Liite 2: Celsicom dataloggeri	37

ERITYISSANASTO

Sementtiklinkkeri

Sementtiä valmistaessa sementin polttovaiheessa syntyvä sideaine.

Masuunikuona

Terästeollisuudessa syntyvä sivutuote, joka syntyy rautamalmin ja itse rautaa erotellessa. Kuona sisältää muun muassa kalkkia, silikaattia ja aluminaatteja. Masuunikuonaa käytetään sideaineena betoniteollisuudessa.

Lentotuhka

Kivihiltä polttaessa syntyvä pölynomainen ”pozzolaani”, jota käytetään sideaineena betoniteollisuudessa.

Sekundaarinen ettringiittireaktio

Sekundaarinen ettringiittireaktio tarkoittaa sulfaatti ionien ja kalsium aluminaatti yhdisteiden muodostumista sementtiin korkeiden kovettumislämpötilojen aikana. Ettringiittireaktio heikentää betonirakenteen lopullista lujuutta ja saattaa aiheuttaa halkeilua.

Massiivinen rakenne

Massiivisella betonirakenteella tarkoitetaan tavallisesti teräksin vahvistettua betonirakennetta, jonka sivumitta on vähintään 1 m. Massiivisen rakenteen erityispiirteenä on se, että näitä toteuttaessa useimmiten tarvitsi varautua erityistoimenpitein rakenteen valun aikaiseen lämpötilan hallintaan, jotta rakenteen suunnittelun mukaiset ominaisuudet säilytetään.

Erytyssanojen ja termien perään on lisätty * -symboli, joka tarkoittaa että termi on selitetty tällä sivulla laajemmassa merkityksessään.

1 JOHDANTO

TYL Kruunusillat on kahden suomalaisen infrarakentamisen osaajan Kreate Oy:n ja YIT Suomen muodostama työyhteisö. TYL Kruunusillat urakka koostuu kahdesta sillasta: Finkensillasta ja Kruunuvuorensillasta, sekä Korkeasaaren esirakentamistöistä. Lopputuotteena on Nihdin, Korkeasaaren ja Kruunuvuorenrannan yhdistävä joukko- sekä kevyenliikenteen kulkuväylä. Urakka koostuu suuresta määrästä betonirakentamista, työssä on tarkoitus esitellä Kruunusillat-urakassa toteutettuja betonointitöitä ja siellä esiintyviin betonivalujen jäähdytysjärjestelmiin, niiden toteutustapaan ja suunnitteluun.

Työn toimeksiantajana toimii Suomen Betoniyhdistys ry. Suomen Betoniyhdistys ry on suomalaista betonirakentamista edistävä yhdistys. Yhdistyksessä on noin 500 jäsentä, joka koostuu betonirakentamisen alan asiantuntijoista ja yhteisöjäsenistä alan yrityksistä ja oppilaitoksista.

Kruunuvuorensilta on vinoköysisilta, joka tulee olemaan kokonaisuudessaan noin 1200 metriä pitkä, pisin jänneväli 260 metriä. Näkyvin osa sillasta on keskellä oleva pyloni, joka kohoaa 135 metrin korkeuteen merenpinnasta. Pylonista lähtee 17 paria molemmin puolin vinoköysiä.

Betoni on yksi maailman käytetyimmistä rakennusaineista. Se koostuu vedestä sementistä ja kiviaineksesta. Sen etuina on sen lujuus, kestävyys ja kustannustehokkuus. Oikein käytettynä sen avulla voidaan toteuttaa vahvoja ja pitkäikäisiä rakennelmia. Käyttökohteina ovat muun muassa rakennuksien runkorakenteet, sillat, tunnelit ja tukimuurit. Erilaisilla muottiratkaisuilla voidaan toteuttaa monenlaisia rakenteita.

Työssä esiteltävät rakenteet ovat massiivisia betonirakenteita. Kruunusilloilla betonimassaa menee rakenteisiin yhteensä tuhansia kuutioita. Esimerkiksi Kruunuvuorensillan välitukien vedenalaisiin peruslaattoihin menee koosta riippuen 500-1000 kuutioita betonia, vedenalaisia välitukia on kokonaisuudessaan 12. Pelkästään välitukien peruslaattojen betonointeihin menee noin 8000 kuutiota.

Massiivisten betonirakenteiden toteuttamisessa useimmiten tulee kysymykseen erityistoimenpiteet, joilla saadaan betonin sitoutumisen aikaista lämpötilaa ja rakenteen sisäisiä lämpötilaeroja hallittua. Tavoitetila on pysyä alle 60 celsiusasteen. Massiivissa betonirakenteissa rakenteen koko on niin suuri, että sitoutumisen jälkeinen jäähtyminen tapahtuu epätasaisesti. Rakenne jäähtyy ulkokuorelta nopeammin kuin ytimestään, jolloin syntyy lämpötilaeroja. Lämpötilaerot aiheuttavat rakenteen sisäisiä jännityksiä ja tämän seurauksena betonissa voi esiintyä halkeilua. Halkeilu ei ole toivottua, sillä rakenne ei tällöin välttämättä täytä suunnitelmien mukaisia lujuudellisia ominaisuuksia.

Lämpötilan hallitsemiseksi massiivissa rakenteissa on erilaisia lämmön hallinnallisia toimenpiteitä. Toimenpiteitä voidaan tehdä jo ennen betonin valamista tai sen jälkeen. Ennen valamista tehtäviä toimenpiteitä on esimerkiksi betonin kiviaineksen jäähdyttäminen, betonimassan jäähdyttäminen, betoniauton rummun jäähdyttäminen nestemäisellä typellä tai hitaammin reagoivien sementtien avulla, jotka jakaa sitoutumislämpötilaa pidemmälle aikavälille tasaisemmin. Valun jälkeisinä toimenpiteinä yleisin Suomessa on vesikiertoisen jäähdytysjärjestelmän käyttö betonirakenteen sisällä.

Vesikiertoisten jäähdytysjärjestelmien tarkoitus massiivissa betonirakenteissa on nykypäivän rakentamisessa korostunut. Betonirakentamisessa käytetään lujuusominaisuuksiltaan vahvempia betoneita, jonka sitoutumislämpötila on hyvin korkea. Ilman betonin jäähdyttämistä betonirakenne ei olisi lujuusominaisuuksiltaan suunnitelmien mukainen, eikä rakenteelle voisi taata suunnitelmien mukaista käyttöikä. Vesikiertoisen jäähdytysjärjestelmän käyttö tämän kaltaisissa rakenteissa kuitenkin mahdollistaa sen, että suuria betonirakenteita voidaan valaa ja lämpötila pidetään hallinnassa.



KUVA 1. Suunnitelmakuva tulevasta Kruunuvuorensillasta (WSP, Knight Architects)

2 BETONI JA HYDRATAATIOLÄMPÖ

Betoni koostuu veden, sementin ja kiviaineksen yhdistelmästä. Betonin sisältämän sementin reagoi vedellä veden kanssa, tietyn ajan kuluessa, kun sementti kylästy vedellä ja massa pysyy paikallaan, tapahtuu hydrataatioreaktio. Hydrataatioreaktion aikana syntyy lämpöenergiaa ja betonimassan lämpötila nousee. Lämpötilan liiallisella nousulla on vaikutusta betonimassan loppukoostumukseen ja sen ominaisuuksille.

2.1 Hydrataatioreaktio

Hydrataatioreaktio on additio- eli liittymisreaktio. Hydrataatio tarkoittaa veden yhdistymistä tyydyttymättömään aineeseen (Napari 2007). Betonitekniikassa hydrataatio tarkoittaa veden ja sementin yhdistymistä, sitoutumisreaktiota, jossa veden ja sementin välit ketjuuntuvat ja välille syntyy saumamaisia hiukkasia jotka tarttuvat toisiinsa.

Hydrataatioreaktion alkuun ja sen etenemiseen voidaan vaikuttaa eri sementtiluokkien sementeillä ja massan lähtö lämpötilalla. Eri luokkien sementit ovat hienoudeltaan ja koostumukseltaan erilaisia. Sementtiin voidaan lisätä kipsiä toivotun sitoutumisajan saavuttamiseksi tai korvata osa sementistä masuunikuonalla. Mitä hienojakoisempaa sementti on, sitä nopeammin veden sitoutuminen sementtiin alkaa. Karkeampijakoisempi sementti taas on hitaammin sitoutuva. Kipsillä voidaan säätää massalle sopiva sitoutumisaika.

Sementtimassan lämpötilalla on olennainen merkitys hydrataatioreaktion alkuun. Mitä lämpimämpi massa, sitä nopeammin massa alkaa sitoutua ja reaktio saa alkunsa. Arviolta jokaisella 10 °C:n lämmön nousulla reaktioaika puolittuu ja sitä vastoin taas mitä kylmempi massa on, sitä hitaampi reaktioaika on.

Hydrataatioreaktio nimensä mukaisesti on veden yhdistymistä sementtiin ja se vaatii riittävästi vettä saavuttaakseen toivotun lujuutensa. On olennaista, että vesi-sementti suhde on arvioitu oikein jolloin varmistutaan siitä, että kaikki sementti kyllästyy vedellä, eikä massa jää hydratoitumatonta sementtiä (BY201 2018, s 81.)

2.2 Lujuuden ja lämpötilan kehitys

Veden ja sementin sitoutuessa syntyy lämpöenergiaa. Sitoutumisreaktion lämmöntuotto on riippuvainen betonimassan sementtimäärästä valettavan rakenteen koosta, massan lähtölämpötilasta, sementin koostumuksesta, siitä onko se hieno- tai karkeajakoista ja sementin kemiallisesta koostumuksesta (Kosmatka S.H., Wilson M.L. 2011)

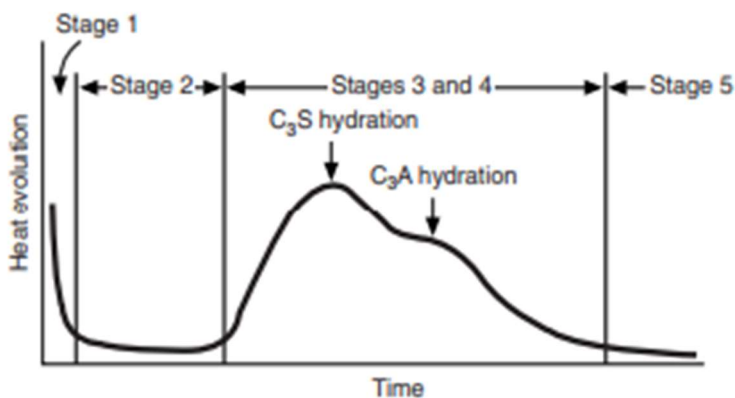
Betonimassan lämmöntuoton päävaikuttajia ovat sementtiklinkkerin* sisältämät trikalsiumsilikaatti ja trikalsiumaluminaatti. Lämmöntuoton rajoittamiseksi massan sementtimäärää tulisi siis vähentää ja tähän ratkaisuna on sementin korvaaminen jollain muulla seosaineella. Sementin korvikkeena on käytetty masuunikuonaa* ja lentotuhkaa*. (Suomen Betoniyhdistys Betonitekniikan oppikirja 2018, s 379.)'

Sementtiä ei kuitenkaan voida kokonaan korvata. Eri betonityypeissä on asetettu tietty maksimimäärä masuunikuonan käytölle. Korvikkeiden sallittu määrä riippuu siitä, mikä on betonityypin vaadittava lopullinen lujuus ja ominaisuudet ulkoisia rasituksia vastaan.

Massan lämmöntuotto ei kuitenkaan ole tasaista vaan se tulee hetkittäisinä lämmönousuina. Alla olevassa kuviossa on esitettyä, kuinka vesi-sementtimassa käyttäytyy.

Betonin lämpötilakäyttäytyminen vaiheineen:

- Vaihe 1: Vesi ja sementti hydratoituvat, trikalsiumalumiinaatti ja trikalsiumsilikaatti kyllästyy vedellä ja lämpö nousee.
- Vaihe 2: Lämpötila tasaantuu hetkellisesti.
- Vaihe 3: Muutamien tuntien päästä trikalsiumsilikaatti alkaa reagoimaan veden kanssa ja massa alkaa kovettumaan.
- Vaihe 4: Massa alkaa hiljalleen jäähtymään ja keräämään lujuutta hydrataatiotuotteiden sitoutuessa.



KUVIO 1. Kuvaus betonin lämmönkehityksestä. (Kosmatka S.H., Wilson M.L. 2011)

2.3 Vaikutus lujuus- ja säilyvyysominaisuuksiin

Betonin säilyvyysominaisuuksilla tarkoitetaan sen kykyä säilyttää ominaisuuksensa ulkoisia rasituksia vastaan ennaltamääritetyllä tavalla ja ennaltamääritetyn ajan. (BY Betonitieto n.d., Betonin säilyvyys)

Hydrataatioreaktion aikaisella lämpötilan nousulla on olennainen vaikutus betonin säilyvyysominaisuuksiin, mikäli se nousee hallitsemattoman korkealle. Korkeaksi lämpötilaksi voidaan kutsua yli 60 °C:n kovettumisen aikaista lämpötilaa. Tavoite on pysyä betonivaluissa siis 60 °C:n lämpötilassa Tästä korkeammassa lämpötiloissa ilmentyy betonirakenteen loppulujuuden alenemaa, eli niin sanottua lujuuskatoa. Lujuuskadon on arvioitu suurenevan noin 10 % jokaisen 10 °C:n nousun 60 °C:sta ylöspäin. Lämpötilan noustessa yli 70 °C:n lujuuskadon riskin todennäköisyys kasvaa huomattavasti suuremmaksi sekundaarisen ettringiittireaktion* takia. (BY65 2021, 76 - 78.)

Suuremmissa betonirakenteissa hydrataation aikainen lämpötilan nousu aiheuttaa ylimääräisiä jännityksiä betonin sisäisesti ja saattaa synnyttää betonin lopulliseen pintaan halkeamia. (BY Betonitieto n.d., Massiiviset rakenteet.) Nämä vauriot altistavat betonirakenteen ylimääräiselle rasitukselle ja pienentävät sen alkuperäistä suunnittelukäyttöikää. Halkeamat altistavat teräsbetonirakenteet muun muassa korroosiolle ja karbonatisoitumiselle.

Alla kootussa taulukossa on koottuna InfraRYL:n ilmoittavat toimenpiteet, mitä tulee tehdä betonin valun aikaisen lämpötilan noustessa.

TAULUKKO 1: Tehtävät toimenpiteet, mikäli betonin kovettumisen aikainen lämpötila nousee korkealle kovettumisvaiheessaan. (InfraRYL 42020.3.5.3)

Lämpötila (°C)	Tehtävä toimenpide
60 tai alle	Ei lujuuden alenemaa, ei vaadittavia toimenpiteitä
70 tai suurempi	Ilman tarkempia selvityksiä lujuuden arvioitu alenema 10 %. Lämpötilan vaikutus pitkäaikaiskestävyyteen tulee tutkia rakennenäytteestä.
80 tai suurempi	Ilman tarkempia selvityksiä lujuuden arvioitu alenema 20 %. Betonin puristuslujuuden kelpoisuus tulee todentaa ottamalla poranäytteet korkeimpien lämpötilojen kohdalta.

2.4 Lämmönkehityksen mallinnusjärjestelmät

Eri betonityyppien lämmönkehitys käyttäytymistä lujittuessaan voidaan rakenteissa arvioida mallintamalla tilanteita mittaus- ja laskentaohjelmilla. Tämänlaisia ohjelmia on esimerkiksi Ruduksen tarjoama BetoPlus, Finnsementin Betometri ja Ruskon Betonin Betologi. Mallinnusjärjestelmillä voidaan tutkia betonin käyttäytymistä eri sementtityyppien kanssa, eri kokoisissa rakenteissa, eri muottiratkaisuissa ja eri olosuhdelämpötiloissa. Jokainen ohjelma vaihtelee ominaisuuksiiltaan.

3 BETONIRAKENTEIDEN JÄÄHDYTYS

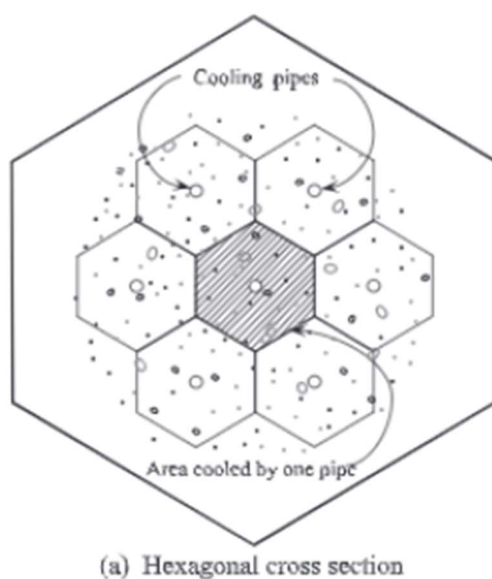
3.1 Jäähdytys

Betonivaluja valettaessa sementin hydrataatioreaktio nostaa betonimassan lämpötilaa. Massiivisissa betonirakenteissa* lämmön nousun jälkeinen jäähtyminen tapahtuu epätasaisesti. Rakenne jäähtyy nopeasti ulkosivuiltaan, mutta ytimestä huomattavasti hitaammin. Tällöin syntyy lämpötilaeroja, jotka aiheuttavat rakenteen sisäisiä jännityksiä ja tämän seurauksena betoni saattaa halkeilla. Sisäiset lämpötilaerot eivät saisi ylittää 20 °C. Betonin jäähdytysjärjestelmillä pyritään tasamaan näitä lämpötilaeroja, jolloin saadaan lujuusominaisuuksiltaan, tasalaa-tuinen suunnitellun mukainen betonirakenne. Valun jälkeisistä jäähdytystoimenpiteistä yleisin on vesikiertoisen jäähdytysputkiston käyttäminen. Tällä saadaan valun sisä- ja ulkopuolen lämpötilaeroja tasattua ja ehkäistään halkeilua.

Betonin jäähdyttämisessä on myös vesikiertoisten järjestelmien lisäksi käytetty ilmakiertoisia järjestelmiä. Ilmakiertoisissa jäähdytysjärjestelmissä huonoksi puoleksi on todettu se, että jäähdytyslinjastot betonin sisällä ei voi olla 10 metriä pidempiä, jotta voidaan säilyttää linjaston jäähdytysvaikutus. Vesikiertoisen järjestelmän etuna on siis se, että veden ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin ilmalla, jolloin sillä on paremmat ominaisuudet siirtävät rakenteesta lämpöenergiaa pois pidemmissäkin linjastoissa, kuin ilmalla (Fairbairn, E. & Azenha, M. 2019.)

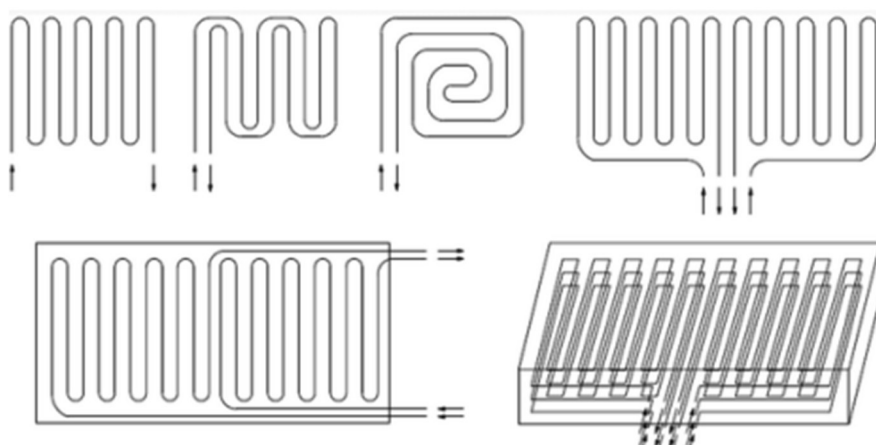
3.2 Toimintaperiaate

Vesikiertoisen jäähdytysputkiston toiminta perustuu siihen, että valettavan betonirakenteen sisään asennetaan kiertämään putkisto. Valamisen jälkeen putkistoon laitetaan kiertämään kylmää vettä, jonka on tarkoitus tasata sisäisiä lämpötilaeroja betonin lujittumisen aiheuttaman lämpötilan nousun jälkeisen jäähtymisen aikana. Kiertävän veden lämpötila vaihtelee 5 °C:n ja 15 °C:n välillä. Järjestelmä koostuu pumpusta, putkistosta ja vesilähteestä, josta vettä saadaan kiertämään järjestelmässä. Putken materiaali on yleisimmin polyeteeniä. Halkaisija vaihtelee 20–50 mm välillä. Putkisto kiertää rakenteen läpi tasaisella jaotuksella kauttaaltaan. Putkiston asetteluun on erilaisia menetelmiä riippuen rakenteen muodosta. Erään tutkimuksen mukaan parhaan jäähdytystehon halutulle alueelle saa asettelemalla jäähdytysputket kuusikulmiomuodostelmaan. Pääasiallisesti rakentamisessa kuitenkin käytetään suorakulmion muotoon laitettua putkistoa (Zhu 2014.) Putkien asetelman muoto kuitenkin pääosin riippuu valettavan rakenteen muodosta. Järjestelmän tehoa voidaan säätää myös putkiston tyyppin, seinämävahvuuden, materiaalin, halkaisijan ja putkistossa virtaavan veden virtausnopeudella. Virtausta voidaan säätää joko putkiston päähän asetettavalla jakotukilla tai vesilähteestä pumppaavan pumpun tuotolla.



KUVIO 1: Tehokas jäähdytysputkiston asetelma. Putken tehokas jäähdytysalue kuvattuna kuusikulmion muodossa (Zhu 2014)

Jäähdytysputkistoa asennettaessa tulee harkita, asennetaanko rakenteen sisään useampia putkistoja kiertämään. Putkilinjaston ollessa pidempi voi putkiston jäähdytysteho laskea, mikäli kiertävän veden lämpötila nousee liian korkeaksi. Riippuen rakenteen muodosta on erilaisia toteutustapoja, miten putkisto asetellaan kiertämään sisällä. Pää tarkoitus on, että putkisto kiertää tasaisesti rakenteen läpi. Liiallisella jäähdytyksellä putken läheisyyteen voi tulla suuria lämpötilaeroja, jonka seurauksena betonirakenteeseen voi tulla ylimääräisiä jännityksiä, joka voi altistaa rakenteen halkeilulle.



KUVA 1: Jäähdytysputkiston kierron erilaisia toteutusesimerkkejä (Fairbairn, E. & Azenha, M. 2019)

Jotta valettavan rakenteen lämpötilaa ja jäähdytyksen toimivuutta voidaan seurata, asennetaan valun sisään anturit eli dataloggerit* joilla seurataan betonimassan lämmönkehitystä. Jäähdyttävän meno- ja tuloveden lämpötilaeroja myös mitataan, jotta voidaan seurata jäähdytyksen toimivuutta.

3.3 Huomioitavia asioita

Vaikka vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä on tehokas tapa jäähdyttää betonimassan hydrataation aikaista lämpötilan nousua, on kuitenkin muutamia asioita mihin tulee kiinnittää huomiota:

- Jäähdytysputkiston lähellä voi aiheutua kovia lämpötilaeron aiheuttamia jännityksiä, mikäli veden ja betonimassan lämpötilaero on suuri.
- Jäähdytysteho ei tule olla liian tehokas, liian nopealla lämpötilan laskemisella voi aiheuttaa sisäisiä jännityksiä ja tämän seurauksena halkeilua (Zhu 2014)

4 Betonivalujen lämmönhallinta Kruunusilloilla

Kruunusillat -urakka on tällä hetkellä Suomen suurin sillanrakennus hanke. Sen kantavien rakenteiden mitoitusikä on 200 vuotta. Hankkeella käytettävissä betoneissa käytetään pääasiallisesti CEM II ja CEM III -tyypin sementtejä, joissa masuunikuonan maksimimäärä on rajattu ja niiden sitoutumislämpötila massiivissa rakenteissa voi nousta ilman jäädytystä liian korkealle. Kuten aikaisemmin työssä todettu, betonimassan kovettumisen aikaista lämpötilan nousua saadaan hillittyä massan sementtimäärällä. Sementtimäärää voidaan korvata masuunikuonalla. Masuunikuonan määrän ollessa rajattu, on betonin kovettumislämpötilan nousu rajumpi massiivissa betonivaluissa. Tällöin betonivalun jälkeinen jäädytys on välttämätön asia, jotta saadaan rakenteille suunnitellun mukaiset ominaisuudet reagoida rasituksia vastaan ennalta määrätyn ajan.

4.1 Jäädytysjärjestelmä

Kruunusilloilla käytetään betonivaluissa vesikiertoista jäädytysjärjestelmää. Rakennettava silta on veden äärellä, jolloin jäädytysputkistossa voidaan hyödyntää merivettä. Käytettävän putkiston halkaisija vaihtelee riippuen valettavan rakenteen paksuudesta. Putken halkaisijalla voidaan säätää haluttavaa jäädytystehoa. Liiallisella jäädytysteholla voi myös saada aikaan vahinkoa ja suurentaa liiallisten lämpötilaerojen riskiä.

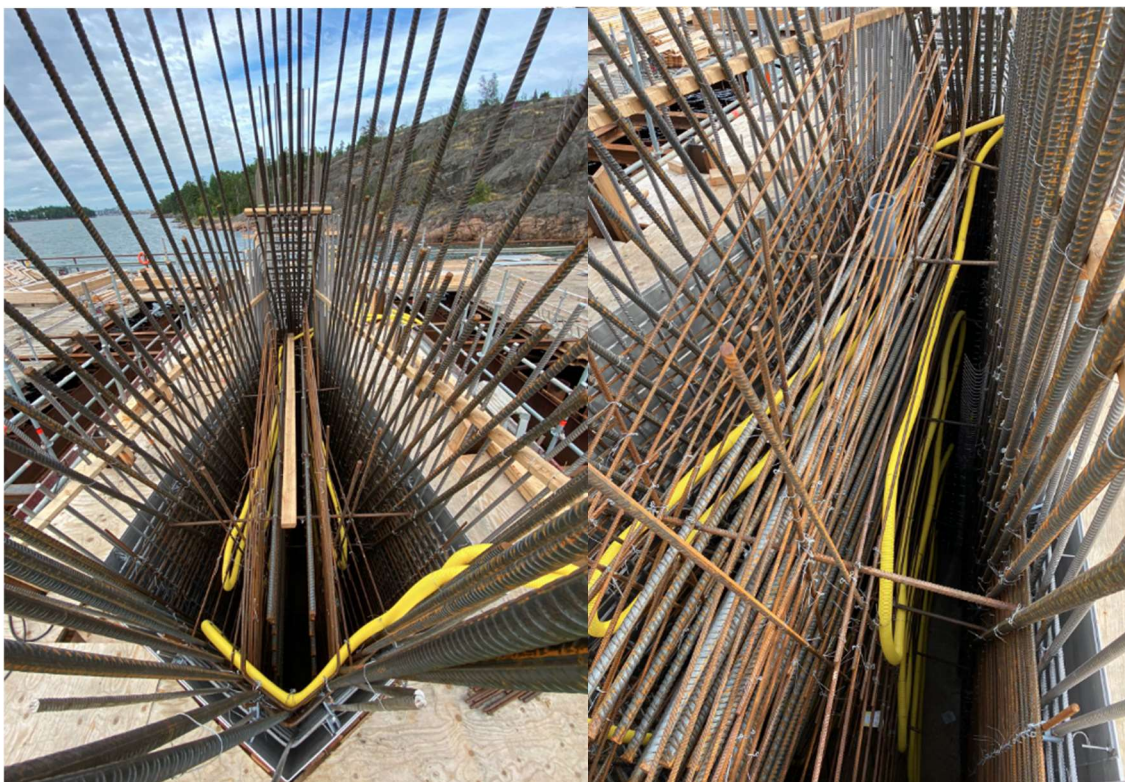
4.2 Toteutus

Peruseriaatteeltaan jäädytys on toteutettu niin, että valettavaan rakenteeseen laitetaan kiertämään joustavaa putkea ympäri rakennetta. Putkiston halkaisija vaihtelee noin 20 - 50 mm välillä valettavasta kohteesta riippuen. Rakenteen sisällä olevan putkiston materiaali on polyeteeniä ja uppopumpusta lähtevä letku on paloletkua. Paloletku yhdistetään letkukiristimin tiiviisti rakenteen sisällä kiertävään muoviputkistoon. Uppopumppu on veden alla ja sillä pumpataan putkistoon vettä, joka jäädyttää rakennetta. Putkiston toinen pää on suunnattu takaisin mereen, jolloin rakenteen läpi kulkenut vesi saadaan purettua takaisin vesistöön.

Ennen valamista järjestelmän toiminta testataan ja pumpun nostoteho riittää pumppaamaan vettä linjastoon. Järjestelmän tiiveys on myös aina testattava ennen valamista, jolloin varmistutaan, että se on vesitiivis eikä kierrätettävä vesi päädy valettavan betonirakenteen sisään.

4.3 Valmis järjestelmä

Valmiissa jäähdytysjärjestelmässä osina ovat itse putkisto, letku ja uppopumppu. Putkistolla voi olla yksi tai useampi sisäänmeno riippuen rakenteen dimensioista. Mikäli putkistossa on useampi sisäänmeno, uppopumpun letkuun voidaan laittaa T-haara tai jakotukki, josta virtaus jakautuu kahteen tai useampaan putkistoon. Ennen jäähdytyksen toteutusta on tärkeää arvioida jäähdytysjärjestelmän kapasiteetti, jolloin päästään toiveiden mukaisiin lämpötiloihin lujuuden kehittyessä. Tavoite on, että rakenteen kuumimmassa kohdassa lämpötila pysyy alle 60 C°:n, sekä rakenteen sisäisiä lämpötilaeroja saadaan tasattua.



KUVA 2. ja KUVA 3. Jäähdytysputkisto välituen alaosan betonoinnissa. Putkisto kiertää kauttaaltaan valettavan rakenteen läpi. (Atte Kopra 2022)



KUVA 4. T-haara, jonka alapää on yhdistetty letkulla uoppopumppuun ja ylempät haarat putkistoon, joka kiertää rakenteen läpi (Atte Kopra 2022)

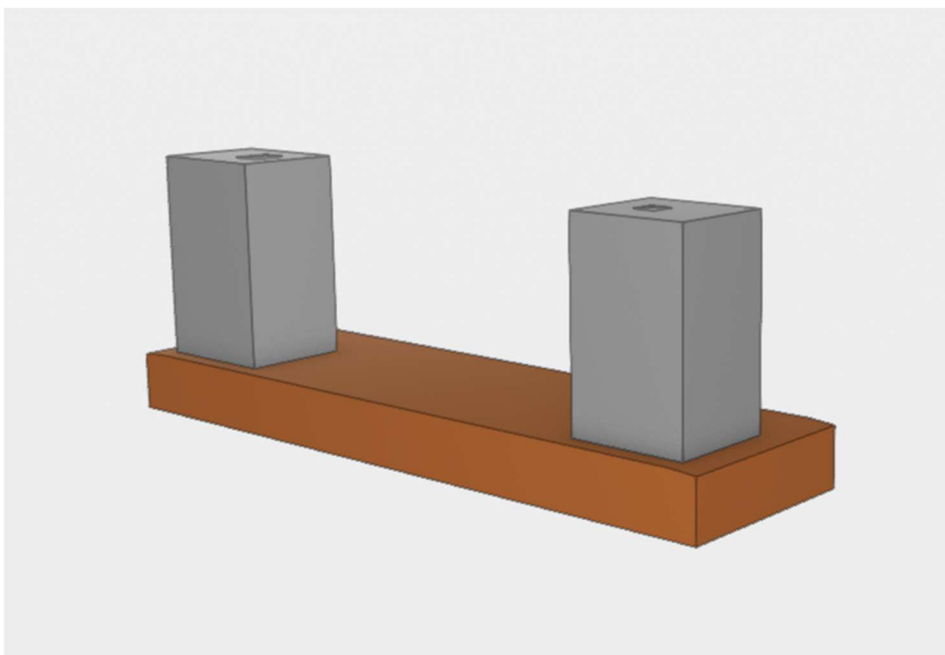
5 Lämpötilan kehityksen mallintaminen

Jäähdytysjärjestelmän toteutuksessa olennaista on arvioida rakenteen tulevaa lämpötilan kehitystä, jotta jäähdytysjärjestelmän kapasiteetti ja putkiston sijoittelu voidaan toteuttaa viisaasti. Tavoitetilä jäähdytysjärjestelmän toteutuksessa on se, että rakenteen sisäiset lämpötilat eivät ylitä metrin matkalla 20 °C ja maksimilämpötila ei nouse yli 60 °C. Kruunusillat -projektilla Ruskon Betoni Etelä on tehnyt erinäisiä laskelmia ja suunnitelmia, joiden avulla ollaan päästy suorituskyyysiin ratkaisuihin jäähdytyksen osalta. Mallinnuksessa on käytetty Betologi -ohjelmaa.

5.1 Esimerkkitalanne jäähdytyksen suunnittelusta

Työhön valikoitui yksi esimerkki jäähdytysvaikutuksen mallintamisesta. Mallinnuksessa voidaan 2D-ulottuvuudessa sijoittaa jäähdytysputkisto valettavaan rakenteeseen ja simuloida tilanne, jossa hydrataatioreaktio nostaa betonityypille ominaisesti rakenteen lämpöä määrätyllä aikavälillä ja rakenteeseen voidaan sijoittaa jäähdytysputkisto. Simuloidussa tilanteessa voidaan vertailla rakenteen tulevaa lämpötilan nousua jäähdytysputkistolla tai ilman.

Esimerkkinä Kruunusilltojen T14 pilasterin jäähdytyksen mallintaminen, sekä sen vertailu tositilanteeseen:



KUVA 5. Valettava rakenne. T14 pilasterit mallista, (Trimble Connect)

5.2 Tilanne 1: Rakenne jäähdytyksellä

Korkeus: 4,0 m

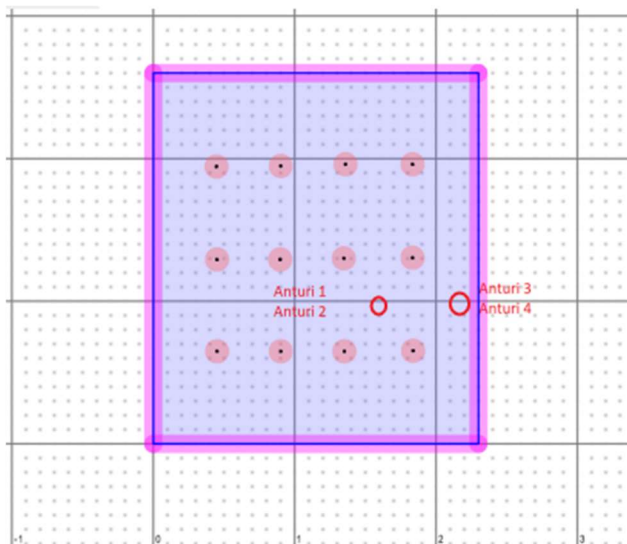
Leveys: 2,3 m x 2,6 m

Betonimassa: C35/45 P50 #16 S3 CEM II B

Olosuhdelämpötila ulkona: 10 °C

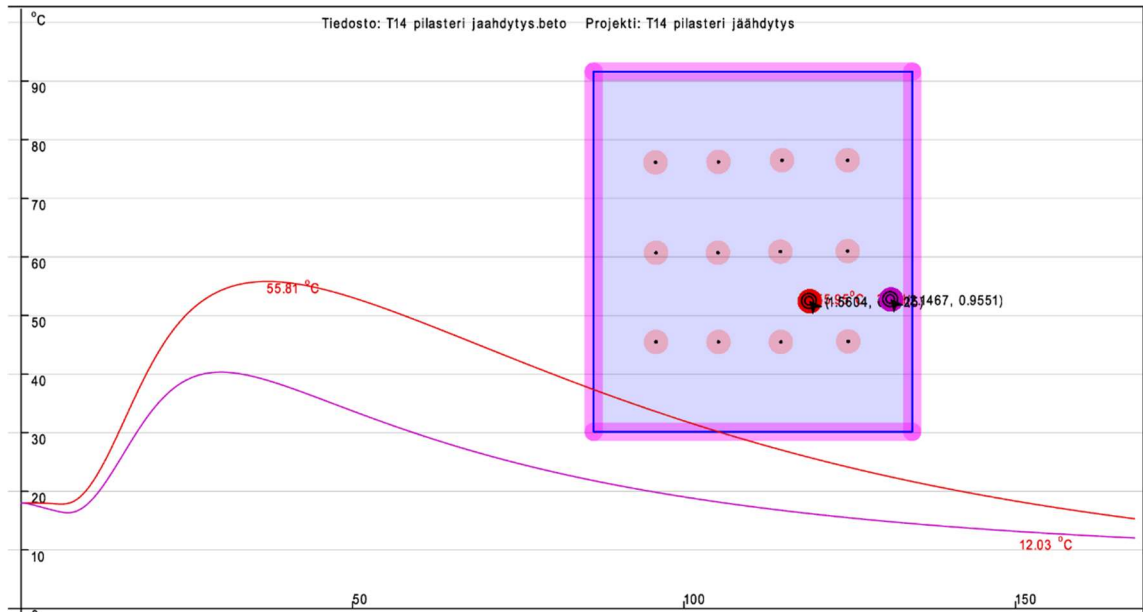
Jäähdytysveden lämpötila: 4 °C

Jäähdytyksen kesto: 7 vrk

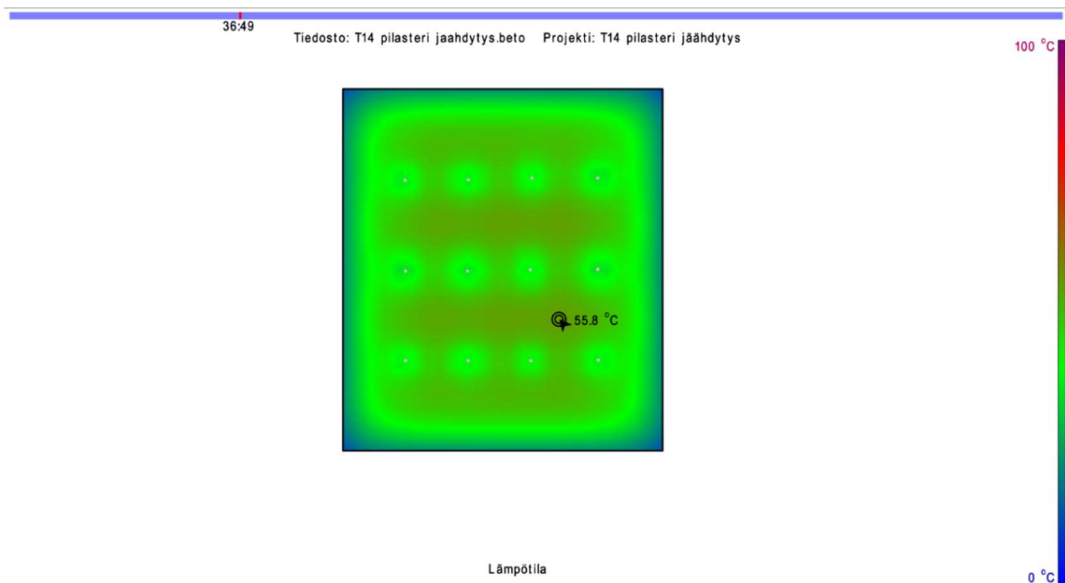


KUVA 6. Rakennekuvaus ylhäältä, mitta-antureiden sijainnit ja jäähdytysputkiston sijoittelu merkittynä, (Betologi-järjestelmä)

Ohjelmalla saatiin lähtötietojen olosuhteilla betonirakenteen maksimilämpötilaksi 7 vrk aikana 55,8 °C. Alla kuvat, jossa on kuvattuna rakenteen lämpötilat kuukimmillaan.



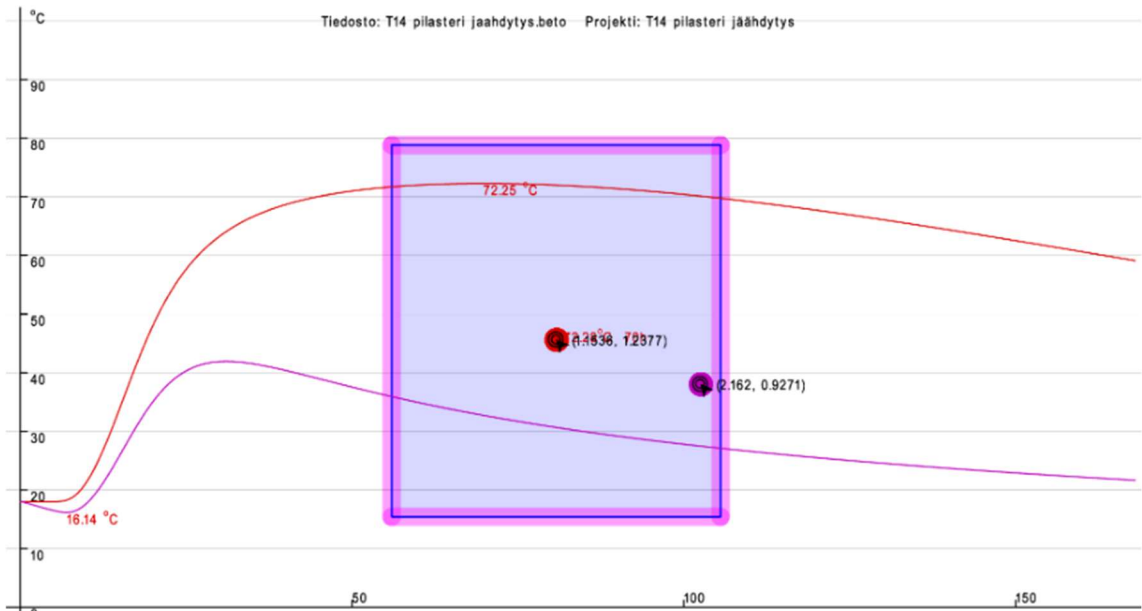
KUVA 7. Betonivalun lämmönkehitys jäähtytyksellä aika-lämpötila -kuvaajana, (Betologi-järjestelmä)



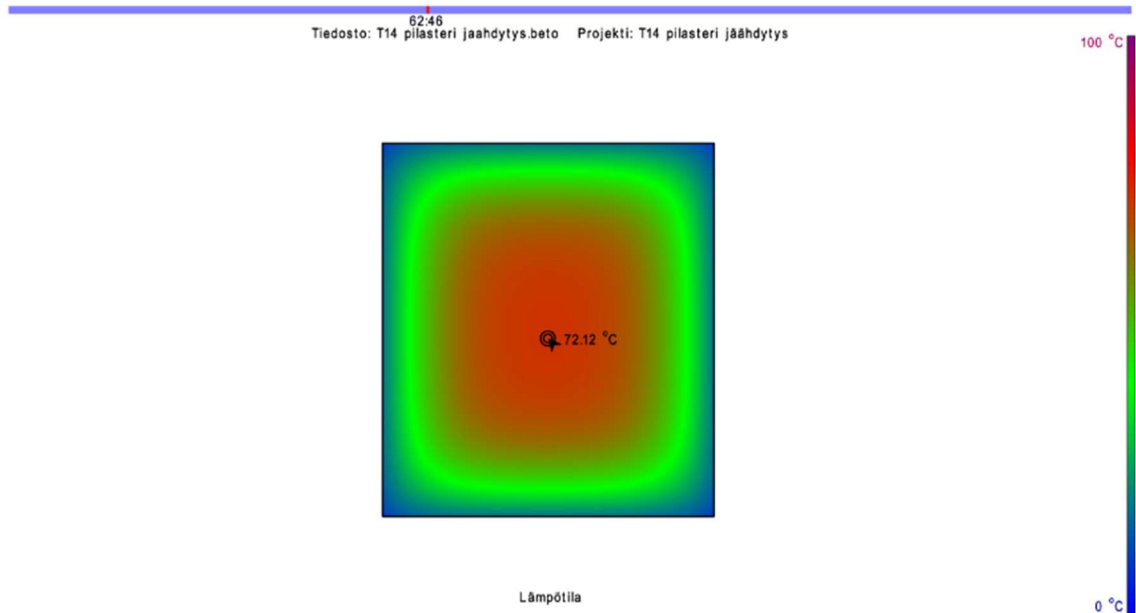
KUVA 8. Rakenteen sisäinen lämpötila kuvattuna värikartalla, sekä kuumin piste, (Betologi-järjestelmä)

5.3 Tilanne 2: Rakenne ilman jäähdytystä

Vertailuksi on mallinnettu samasta rakenteesta simulaatio samoissa olosuhteissa ilman jäähdytystä. Betonirakenteen lämpötila nousee huomattavasti korkeammalle, jolloin jäähdytyksen käyttäminen rakenteessa on perusteltua.



KUVA 9. Betonivalun lämmönkehitys ilman jäähdytystä aika-lämpötila -kuvaajana, (Betologi-järjestelmä)



KUVA 10. Rakenteen sisäinen lämpötila kuvattuna värikartalla, (Betologi-järjestelmä)

5.4 Mallinnetun rakenteen toteutuneet lämpötilat

Pilasteriin asetettiin mallinnuksen mukaisesti jäähdytysputkisto. Jäähdytysputkistona käytettiin 20 mm putkea. Valuolosuhteiden keskiarvo ulkolämpötila oli 10 °C.

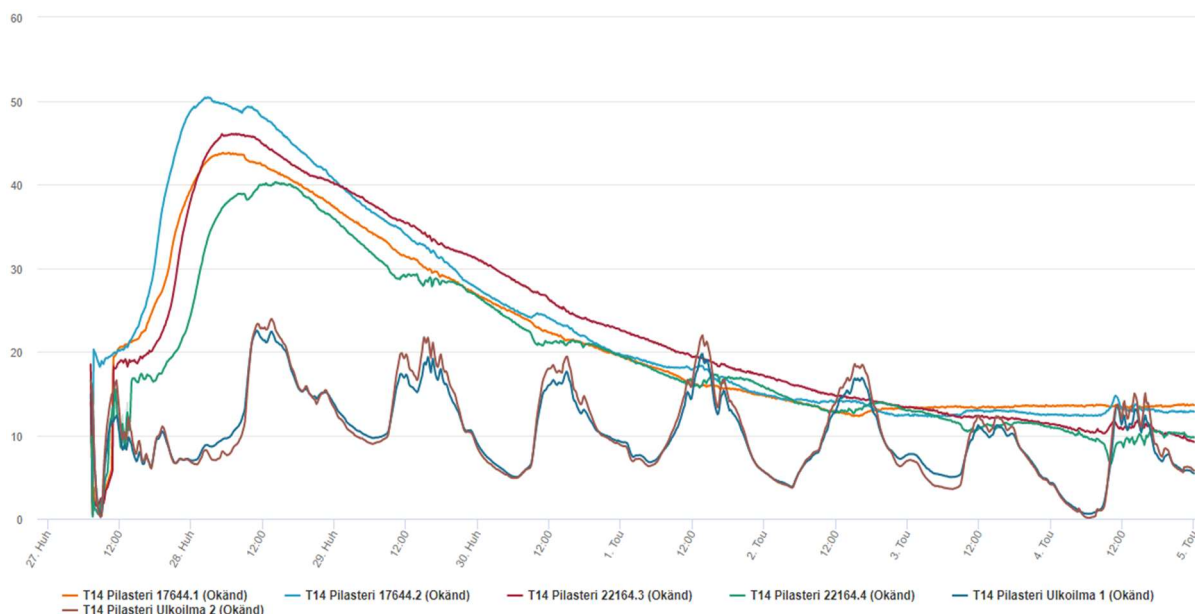


KUVA 11. Yleiskuva pilasterin sisään ja ulos menevästä putkistosta (Atte Kopra 2022)



KUVA 12. Pilasterin sisällä kiertävä jäähdytysputkisto (Atte Kopra 2022)

Valamisen jälkeen pilasterin hydrataation aikainen lämpötila nousi maksimissaan 50 °C. Tarkkailuaikana 7 vrk.



KUVA 13. Pilasterin lämpötilan kehitys viikon tarkasteluvälillä, Maksimiarvo lämpötilassa 50,4 °C (Celsiview)

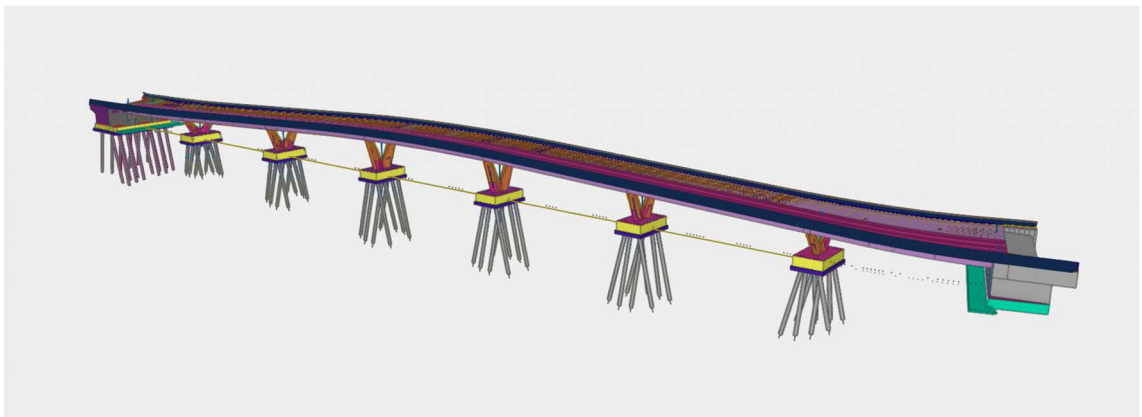
Pilasterin valamisen yhteydessä voidaan todeta, että jäähtymisen mallintaminen oikeilla yksityiskohdilla ja totuuden mukaisilla olosuhteilla antaa hyvää osviittaa siihen minkälaisilla jäähtystoimenpiteillä tulee varautua valettavissa rakenteissa. Mallinnus näytti samoilla yksityiskohdilla rakenteen lämpötilan nousevan 55 °C, toteutunut lämpötila oli noin 50 °C.

Jäähtytilannetta mallintaessa on lukuisia eri tekijöitä mitä tulee ottaa huomioon. Näitä ovat esimerkiksi muotin eristävyys, keskimääräinen ulkolämpötila, kiertävän veden lämpötila ja jäähtytysputken lämmön luovutus ominaisuudet. Näistä tekijöistä muodostuu suuri kokonaisuus, jossa voi olla jokaisessa hieman eroa todellisuuden toteutukseen. Tämän kautta voi olla hyvinkin vaikeaa saada täysin todellisuutta vastaavat valuolosuhteet mallinnettua. Myös tässä kappaleessa se ilmenee niin, että toteutuneella ja mallinnetulla maksimilämpötilalla on hieman eroa, mutta ei paljoa. Mallinnus antaa hyvää suuntaa antavaa tietoa vaadittavasta jäähtytyskapasiteetista.

6 Jäähdytysvaikutuksen mittaus käytännössä

Tässä kappaleessa mitataan käytännössä erään työmaalla toteutetun betonivalun jäähdytysjärjestelmän jäähdytystehoa ajan hetkellä (x). Kokeen kohteeksi valikoitui Finkensillan kannen valu.

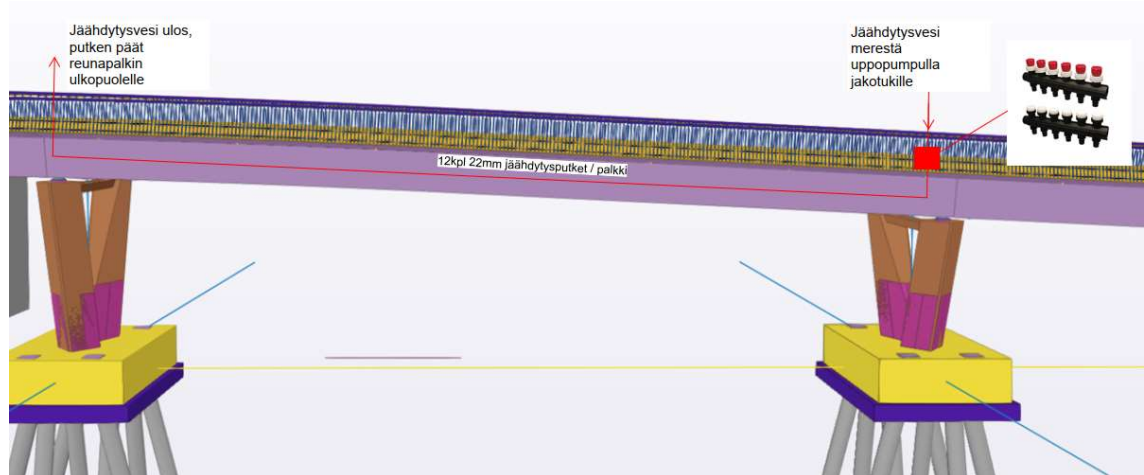
Finkensilta on Kruunusillat -urakkaan kuuluva silta, joka on kokonaisuudessaan noin 300 m pitkä, jännitetty kaksipalkkinen laattapalkkisilta.. Siltaa kannattelee kuusi välitukea ja molemmissa päissä olevat maatuet. Kansi valetaan yhtäjaksoisesti. Erityisesti huomiota vaativa on sillan kannatinpalkit, joihin on asennettu jäähdytysjärjestelmä. Kannatinpalkkien leveys on 3 metriä ja korkeus 2 metriä.



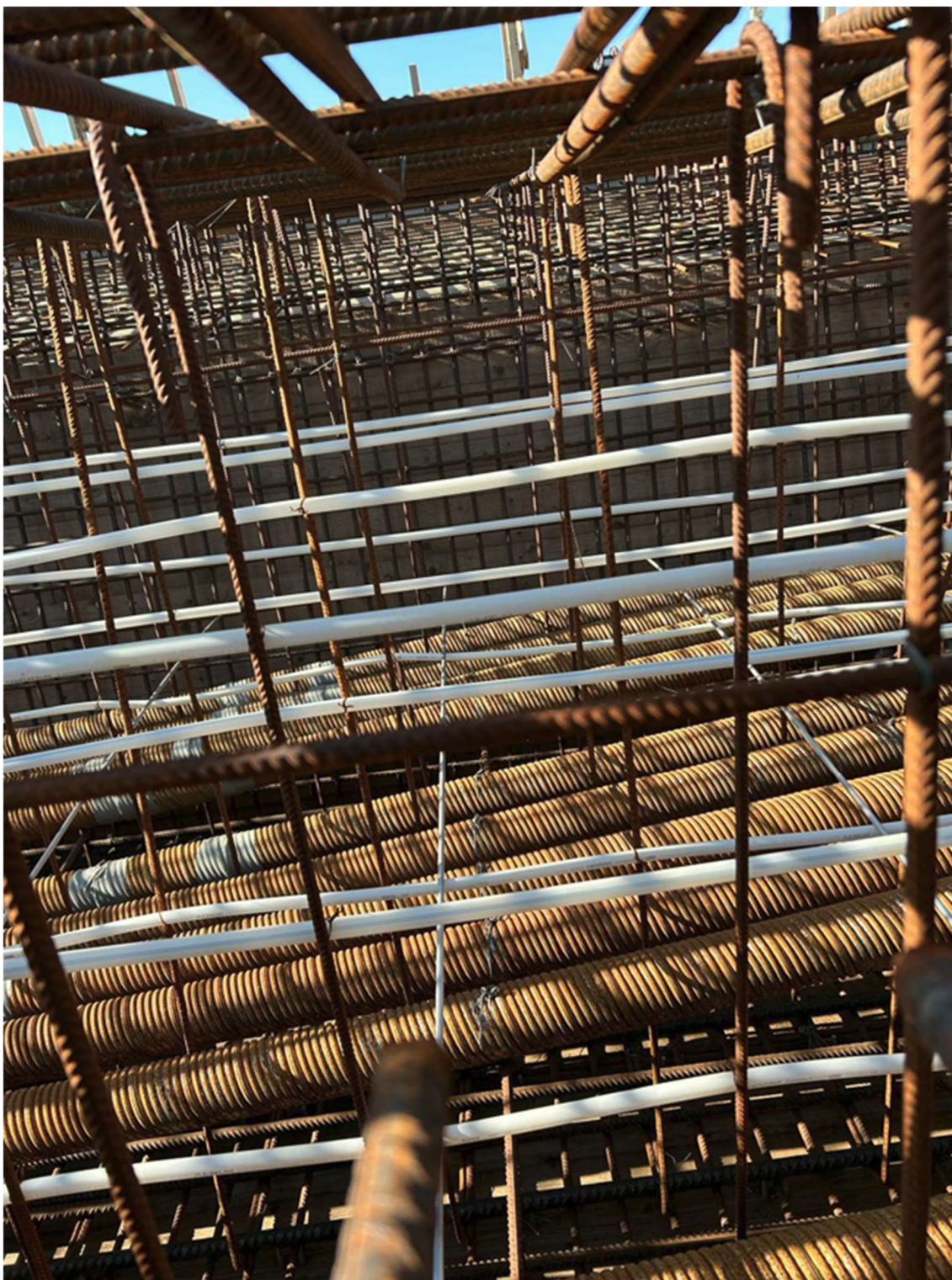
KUVA 14. Finkensilta kokonaisuudessaan tietomallissa, Trimble Connect

6.1 Finkensillan jäähdytysjärjestelmä

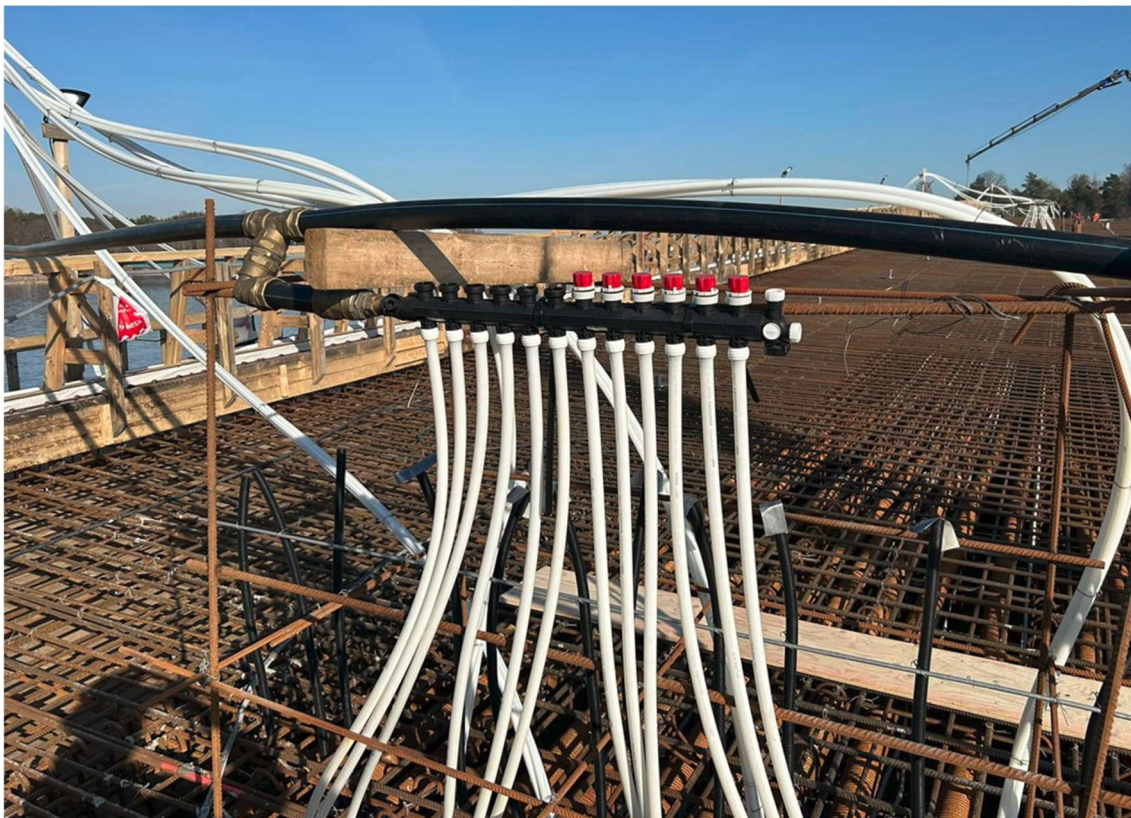
Kannen jäähdytysjärjestelmä koostuu seitsemästä 40 m pitkästä jäähdytyslinjastosta, jokainen linjasto koostuu kahdestatoista putkesta. Linjasto on jaoteltu 40 m osiin siksi, jotta voidaan varmistua siitä, että veden lämpötila ei nouse matkallaan liian korkeaksi ja veden jäähdytysvaikutus pysyy yllä. Linjastossa käytetään 20x2,0 mm PEX-putkea. Jokaisen linjaston päässä on jakotukki, joka jakaa linjaston putkisarjaan, näkyy kuvassa 17. Jokaiseen linjaston lähtöön on asetettu sama virtaus jakotukista. Mereen on laitettu porakaivopumppu, joka pumppaa vettä jokaiseen putkeen 15 l/min. Putkiston asettelu esitetty kuvassa 16.



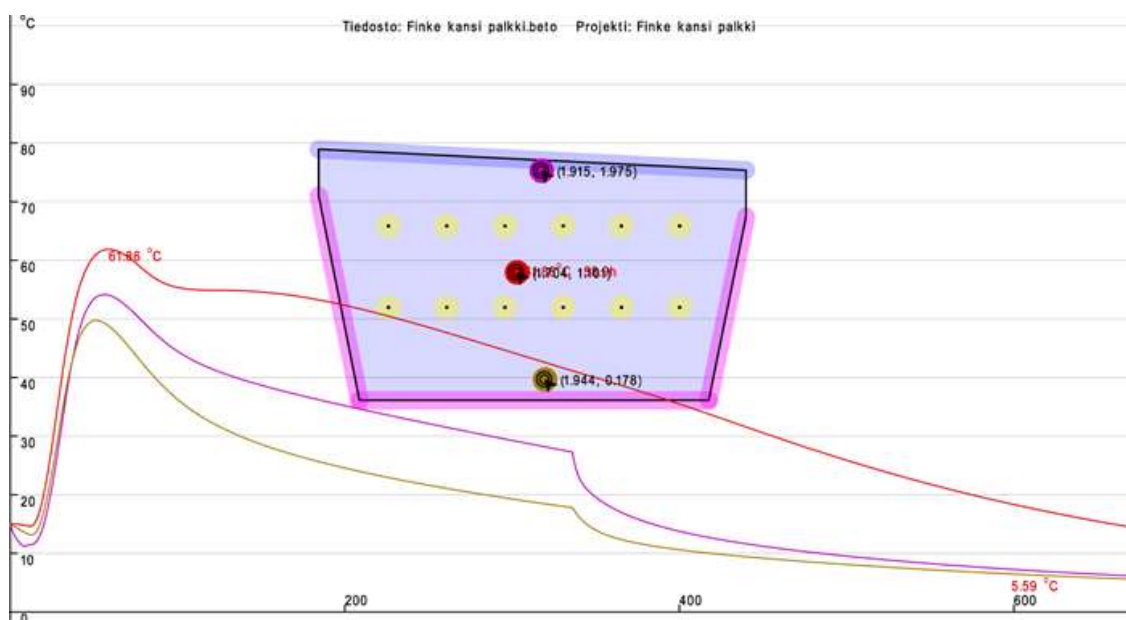
KUVA 15. Finkensillan jäähdytysjärjestelmän suunnitelma, (T. Kiiskinen, S. Ylönen)



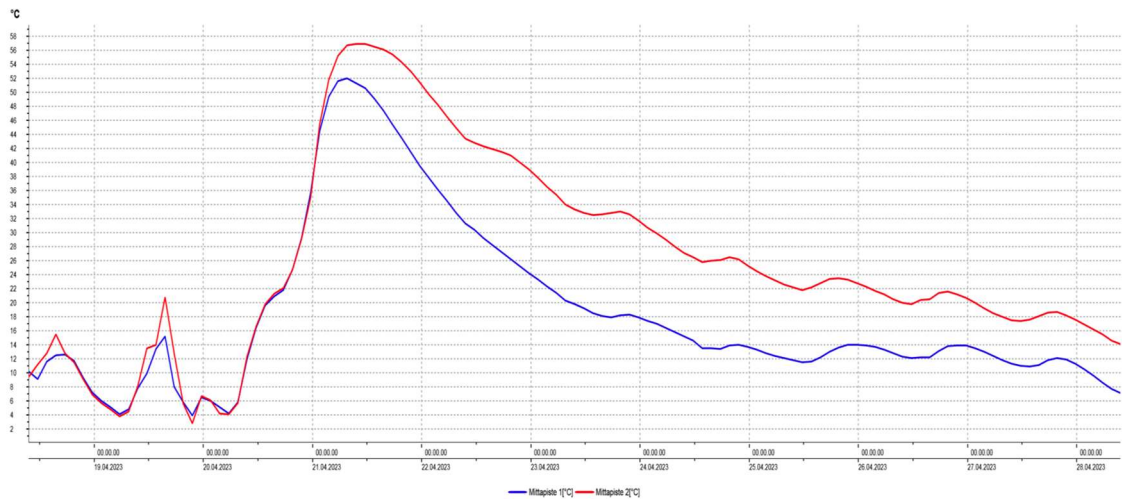
KUVA 16. Jäähdytysputkisto kannatinpalkin raudoituksen sisällä. (Atte Kopra 2023)



KUVA 17. Jäähdytysjärjestelmän putkisto yhdistyy jakotukkiin, joka on yhdistetty meressä olevaan porakaivopumppuun. (Atte Kopra 2023)



KUVA 18. Finken kannatinpalkin simuloitu jäähdytyskenaario. Lämpötila nousee betonin sitoutuessa korkeimmillaan 61 °C. Taustalla myös kannatinpalkin profiili jossa on merkittynä jäähdytysputkisto keltaisilla ympyröillä. (Betologi-järjestelmä)



KUVA 19. Palkin toteutuneet lämpötilat. Mittauspiste 1 sijaitsi palkin yläpinnassa, lämpötila kävi korkeimmillaan 52,0 °C. Mittauspiste 2 sijaitsi palkin ytimessä, lämpötila kävi korkeimmillaan 56,9 °C. Korkein lämpötila oli noin vuorokauden kohdalla.

6.2 Jäähdytysvaikutuksen mittaus

Työmaalla toteutettiin jäähdytysvaikutuksen mittaus, millä voidaan arvioida jäähdytysjärjestelmän jäähdyttävää vaikutusta betonirakenteessa. Mittalaitteina toimi data-loggereita, jotka mittasivat betonin lämpötilaa ja betonirakenteen sisällä olevan jäähdytysputkiston sisään tulevaa, sekä ulosmenevää veden lämpötilaa. Näiden tietojen avulla voidaan laskea jäähdytysjärjestelmän teho (P).

Jäähdytysveden virtausnopeus 15 l/min on mitattu laskemalla jäähdytysjärjestelmästä ulostulevaa vettä ämpäriin ja mitattu aikaa, kuinka nopeasti ämpäri täyttyy. Putkistoon on asennettu Celsicom dataloggerit, jotka mittasivat putkiston päässä sisään menevän ja ulostulevan meriveden lämpötilaa. Näillä tiedoilla saadaan laskettua jäähdytysjärjestelmän jäähdytys (P) kilowateissa.

Järjestelmästä ulostulevan jäähdytysveden lämpötila oli korkeimmillaan noin 9 °C. Järjestelmän sisään menevän veden lämpötila oli noin 5 °C. Lämpötilaero veden lämpötilassa oli siis 4 °C. Tämä lämpötila jäähdytysvesistä on otettu ajan kohdassa, jolloin betonin lämpötila oli korkeimmillaan palkin ytimessä 56,9 °C.

Jäähdytysvaikutuksen tehoa voidaan mitata seuraavalla kaavalla:

$$\text{Jäähdytysteho } (\varphi) = \rho V c \Delta T \quad (1)$$

Symbolit selitettynä:

$$\rho = \text{tiheys } (kg/m^3)$$

$$V = \text{veden virtausnopeus } (m^3/s)$$

$$c = \text{ominaislämpökapasiteetti } (J/kgK)$$

$$\Delta T = \text{meno - ja tuloveden erotus } (K)$$

Lähtöarvot:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 15 \text{ l/min} = 0,0025 \text{ m}^3/s$$

$$c = 4186 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta T = 4 \text{ K}$$

Arvot sijoitetaan kaavaan (1), jolloin saadaan järjestelmän jäähdytysteho φ :

$$\varphi = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0025 \text{ m}^3/s \cdot 4186 \text{ J/kgK} \cdot 4 \text{ K} = 41860 \text{ W} \approx 42 \text{ kW}$$

Tämän kaltaisella toteutuksella palkin jäähdytysjärjestelmän tehoksi saatiin 42 kW. Järjestelmän teho on siis riittävä. Betonin lämpötila saatiin pysymään maltillisen alhaalla, eli alle 60 °C:n ja maksimilämpötila oli alle myös mallinnuksessa ennustetun 61°C:n.

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutustua betonin vesikiertoisiin jäähdytysjärjestelmiin, kertoa kuinka ne on toteutettu Kruunusillat projektilla, sekä laskea yhden työmaalla toteutetun jäähdytysjärjestelmän jäähdytysteho betonissa.

Työmaalta kerätyn datan perusteella jäähdytysjärjestelmien suunnitelmallisuudella on suuri vaikutus työn lopputulokseen. Suunnitteluohjelman suuntaa antava informaatio betonin lämpökäyttäytymisestä tietynlaisissa olosuhteissa oiva työkalu jäähdytysjärjestelmien toteutukseen.

Suunnitteluohjelman antama tieto betonin lämpötilakäyttäytymisestä eri valettavissa rakenteissa on erinomaista. Kruunusillat-urakalla useimmiten suunnitteluohjelmien antama tieto on ollut todellista tilannetta vastaava. Ennustettu lämpötila on ollut lähellä todellisuutta, mikäli valuolosuhteet ennusteessa on olleet todellista vastaavia. On kuitenkin paljon muuttujia, joita tulee ottaa huomioon tällaisia laskiessa, joista voi syntyä virhettä ja tämän takia ei välttämättä päästä 1:1 vastaavuuteen todellisen ja ennustetun lämpötilakäyttäytymisen kanssa. Suunnitteluohjelman antamaan tietoon tulee siis suhtautua tietynlaisella varauksella.

On kuitenkin huomattava, että tarkastelun kohteena on vesistön äärellä oleva silta, joka helpottaa jäähdytysjärjestelmien toteutuksessa siinä, että jäähdyttävän veden saanti on helppoa. Kaikissa jäähdytystä vaativissa betonirakenteissa jäähdyttävän veden saanti ei ole välttämättä itsestäänselvyys. Mikäli kyseessä ei olisi sikaan vesistön äärellä oleva silta, olisi asia eri ja tulisi pohtia mistä jäähdyttävä vesi olisi saatava. Vaihtoehtoina voisi olla esimerkiksi vesijohtoverkosta saatava vesi tai jäähdytyslaitteesta tuleva kylmäaine, joka kiertää putkistossa.

Betonivalun jälkeisten jäähdytystoimenpiteiden mahdollisuudet eivät ole kuitenkaan rajattu vain vesi- ja ilmakiertoisiin järjestelmiin. On siis mahdollisesti tutkittava, olisiko mahdollista tehdä jäähdytysjärjestelmiä, jossa kiertävä kylmäaine olisikin jotain kaasua tai nestettä. Olisiko mahdollista soveltaa teollisuuden jäähdytysjärjestelmiä, jossa olisi oma kylmälaitteensa? Laitte kierrättäisi suljetusti linjaston läpi samaa kylmäainetta, jota laite jäähdyttäisi ja tämän jäähdytystehoa voitaisiin säätää tarvittaessa. Tämä ratkaisu voisi poistaa sen, että minkäänlaista vesilähdettä ei tarvittaisi, vaan järjestelmässä kiertäisi sen oma kylmäaine, jota

laite pumppaa linjastoon. Nopea jäähdytystehon säätäminen olisi eduksi myös siinä, että jäähdytysteho ei olisi missään kohtaa liian suuri ja putkiston lähellä ei tulisi liian suuria lämpötilaeroja. Järjestelmässä tärkeinä piirteinä olisi se, että putkiston vuodot olisi mahdollisimman helppo havaita ennen kuin alettaisiin valamaan, sekä toimivuuden valvonnan tulisi olla helppoa.

Tämän työn perusteella kuitenkin veden käyttäminen jäähdytysjärjestelmissä on helppoa, vaivatonta ja veden jäähdytysteho tämän kaltaisissa betonirakenteissa on riittävä.

LÄHTEET

Bofang, Z. 2014. Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete

Fairbairn, E. & Azenha, M. 2019. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS.

Global Cement and Concrete association. Fly Ash. Global Cement and Concrete association. viitattu 21.4.2023. <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/fly-ash/>

InfraRYL. 2022. RT-tietokanta. Rakennustieto Oy. Viitattu 10.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.rakennustieto.fi>

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2022. Kylmätekniiikan perusteet. 10. uud. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Kosmatka S.H., Wilson M.L. 2011. Design and Control of Concrete Mixtures. Portland Cement Association. Viitattu 7.5.2023
https://www.researchgate.net/publication/348676262_Design_and_Control_of_Concrete_Mixtures

Napari, P. 2007. Orgaaninen Kemia. Helsinki: Edita publishing Oy.

Science direct. Blast Furnace Slag. Science Direct. viitattu 21.4.2023.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/blast-furnace-slag>

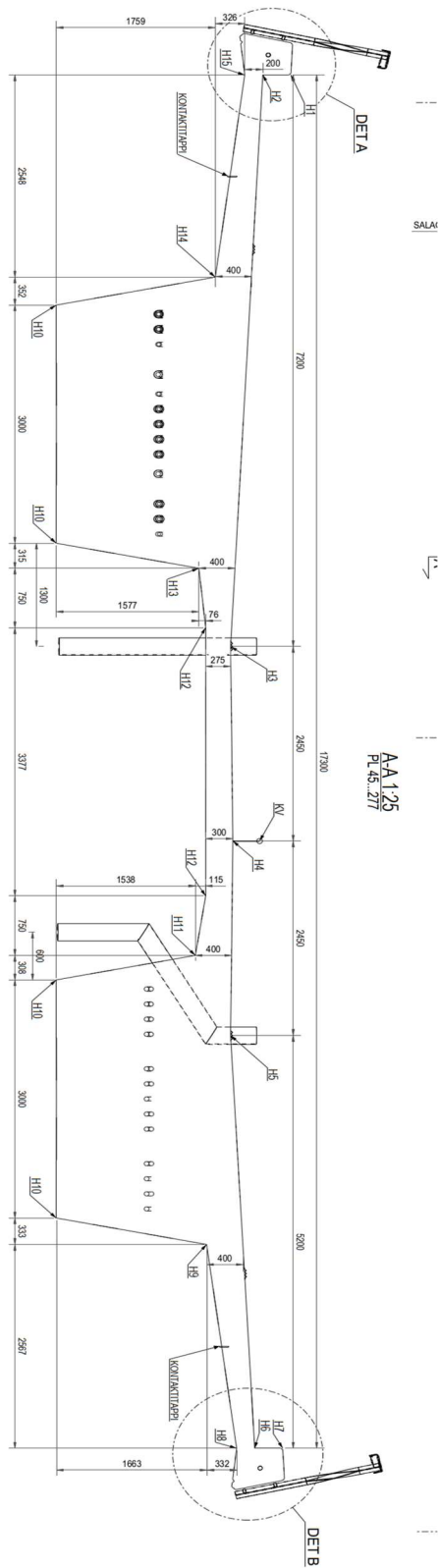
Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonitekniikan oppikirja BY201 2018. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Suomen Betoniyhdistys. Betonisanasto. BY Betonitieto. viitattu 21.4.2023.
<https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto.html>

Suomen Betoniyhdistys. n.d. Massiiviset rakenteet. BY Betonitieto. viitattu 21.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden.
<https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/betonin-valu-ja-tiivistys/erityisrakenteet/massiiviset-rakenteet.html>

LIITTEET

Liite 1. Finkensillan kansirakenteen mittapiirustus



Liite 2: Testo dataloggeri

