

Betonin lämpötilan hallinta sil- tarakenteissa

Eero Simonen

OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2023

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma
Infrarakentaminen

SIMONEN, EERO:
Betonin lämpötilan hallinta siltarakenteissa

Opinnäytetyö 47 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Huhtikuu 2023

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin betonin lämpötilan nousua siltarakenteissa ja tapoja hallita tätä lämpötilan nousua, koska nämä ovat ajankohtaisia ongelmia alalla. Tavoitteena työssä oli tunnistaa lämpötilan nousun syyt, haitat ja tapoja, joilla niitä voidaan hallita. Tutkimusta toteutettiin perehtymällä asiaan liittyviin aineistoihin, kuten standardeihin ja tieteellisiin julkaisuihin. Työ toteutettiin yhteistyössä Tampereen Raitiotieallianssin kanssa.

Työssä perehdyttiin teoriapohjaiseen materiaaliin, sekä asiaan liittyviin käytännön toteutuksiin. Tietoa asiasta on kerätty niin lämpötilan nousun tekijöistä, kuten sementeistä ja rakenteen mittasuhteista. Samoin lämpötilan nousun haitoista, kuten myöhästyneestä ettringiittireaktiosta. Sekä lämpötilan hallinnan työkaluista, kuten jäähdytysputkistoista ja nestetyyppijäähdytyksestä. Tuloksena on tietopaketti, jota voi hyödyntää työnjohto työmaalla, kuin myös betonitehtaan henkilökunta.

Lämpötilan hallinnan keinoina ainoa tapa, jolla saadaan tuloksia eikä se itsessään aiheuta kustannuksia on työn aikataulutaminen siten että muuta jäähdytystä ei tarvita. Työmaalla lämpötilaa voidaan hallita myös jäähdytysputkistoilla. Parhaat tavat lämpötilan hallintaan tehdään betonintehtaalta, jossa sitä voidaan hallita jäähdyttämällä betonin raaka-aineita, käyttää suhteituksessa jäätä tai jäähdyttää seosta nestemäisellä tyypellä. Betonin jäähdytys vaatii lisää yhteistyötä tilaajan, urakoitsijoiden ja betonitehtaiden välille, jottei kaikki vastuu siitä olisi urakoitsijalla.

Asiasanat: massiiviset betonirakenteet, betonin jäähdytys, betonisilta

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Civil Engineering

SIMONEN, EERO:
Temperature Control of Concrete in Bridge Construction

Bachelor's thesis 47 pages, appendices 1 pages
April 2023

The objective of this study was to gather information about temperature rise of concrete in bridge construction. More specifically the aim was to recognise why the temperature rises as much as it does, what consequences it has and how it can be controlled. This is a topical issue in the bridge construction field. The study was done in cooperation with the Tampere Tramway Alliance.

This study was conducted mostly by studying different standards, scientific publications and case studies. The Information was gathered from many sources and then compared between them.

As a result, an information package was created covering the following themes: temperature rise, reasons for it like different kinds of cements, problems caused by temperature rise like delayed ettringite formation and ways to control the rise like cooling concrete with embedded pipes or using liquid nitrogen. This thesis allows to learn about the subject quickly and can be used by site supervisors or staff in concrete plants.

The findings indicate that the only way to have cooler concrete without additional costs is scheduling work when weather is cooler. On site cooling is also possible with embedded pipes. The best ways to control concretes temperature are done in the concrete plant where it is possible to cool raw material, use ice in mixture or use liquid nitrogen to cool mixture.

Key words: mass concrete, cooling concrete, concrete bridge

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	BETONIRAKENTEIDEN LÄMPÖTILA	8
	2.1 Massiiviset siltarakenteet	8
	2.2 Lämpötilaan vaikuttavat tekijät	9
	2.3 Betonin koostumus.....	11
	2.3.1 Sementin määrä	11
	2.3.2 Masuunikuona	12
	2.3.3 Lämmöntuotto.....	14
	2.3.4 Betonin arvosteluikä	15
	2.3.5 Betonin lämpötila	15
	2.4 Valaminen	16
	2.5 Lujuuskato.....	18
	2.6 Sementin lämmönkehitys	18
	2.7 Ettringiitti	20
	2.8 Betonin lämpökäsittely	23
3	LÄMPÖTILAN HALLINTA TYÖMAALLA.....	24
	3.1 Aikataulutus	24
	3.2 Jäähdytysputkistot.....	24
	3.3 Käytännön toteutuksia.....	29
4	JÄÄHDYTYSMENETELMÄT BETONITEHTAALLA	32
	4.1 Yleistä jäähdytyksestä.....	32
	4.2 Suhteitus kylmällä vedellä / jäällä.....	33
	4.3 Runkoaineen jäähdytys	35
	4.4 Nestemäisen typen käyttö.....	36
	4.5 Ohjeet suomalaisissa teksteissä	38
	4.6 Järjestelmät Suomessa	39
5	YHTEENVETO JA POHDINTA	41
	5.1 Yhteenveto.....	41
	5.2 Pohdinta	42
	LÄHTEET	44
	LIITTEET	47
	Liite 1. Finnsementin lämmön- ja lujuudenkehitysmalli.	47

ERITYISSANASTO

Hydrataatio	Sementin ja veden välinen reaktio, jossa vesi sitoutuu fysikaalisesti ja kemiallisesti sementtiin. Puhekielessä tätä kutsutaan betonin kovettumiseksi. Reaktio tuottaa lämpöä.
P-lukubetoni	P-lukubetoni on betonilaatu, joka on tarkoitettu toistuvan jäätymis-sulamisrasituksen ja suolarasituksen alaisiin rakenteisiin kuten siltoihin
Silko	Siltojen korjausohjeet, silko tuotteet ovat siltojen ja muiden taitorakenteiden korjaukseen soveltuvat tuotteet, joilla on Väyläviraston hyväksyntä

1 JOHDANTO

Massiivisissa betonivaluissa tulee yhä useammin ongelmaksi valun liian suuri lämpötilan nouseminen. Tämä aiheuttaa rakentamiselle haasteita työn aikataulutusessa, sekä betonivalujen lämpötilan hallinnassa. Ilmiö tulee esille etenkin massiivisissa betonirakenteissa, joihin mm. sillat ja siirtolaattarakenteet useasti kuuluvat.

Johtuen tiukoista aikatauluista, betonivalun lämpötilan hallinnan haastavuus tulee yhä useammin esille. Kohteen aikataulutus saattaa pakottaa valamaan vuoden kuumina ajankohtina, minkä lisäksi ilmaston lämpeneminen lisää haastetta. Ongelmaan myös kiinnitetään nykyään enemmän huomiota kuin aiemmin, koska massiivivaluja on runsaammin ja niiden riskit tunnistetaan paremmin.

Opinnäytetyö siis keskittyy kertomaan ensin ilmiöstä ja sen syistä, kuin myös tästä aiheutuvista ongelmista. Opinnäytetyössä käsitellään tapoja, joita lämpötilan hallintaan löytyy ja mitkä näistä ovat käyttökelpoisimpia toteuttaa. Tietoa kyseisen ongelman ratkaisuihin ei paljoa löydy suomenkielisistä lähteistä, johtuen että ongelmaa on toistaiseksi käsitelty Suomessa vain vähän, eikä tule esille monissakaan valettavissa rakenteissa. Suuri osa tiedosta löytyi yhdysvaltaisista lähteistä, koska siellä asiaa on tutkittu paljon jo hyvin varhaisessa vaiheessa. Tämä johtuu siitä, että patorakenteet ovat pakottaneet tutkimaan vaatimuksia betonille ja sen lämpötilalle.

Opinnäytetyössä paneudutaan siis ensisijaisesti siltoihin, mutta oppi on suurimmaksi osaksi sovellettavissa muihinkin massiivisiin rakenteisiin, ja erona on vain erilaiset ohjeistukset sillarakenteille, sekä useasti erilaiset rakenteen ympäröivät olosuhteet. Tavoitteena on ollut koota tietoa yhteen paikkaan useista eri lähteistä, joka tuo lisätietoa työnjohdolle yhdessä paketissa. Siltoja rakennetaan ympäri Suomea lisää vuosittain, ja myös muuta massiivista betonirakentamista tehdään niin korkeiden rakennusten, kuin myös tuotantolaitosten yhteydessä.

Työ on lähinnä kirjallisuustutkimuksena suoritettu, johon tietoa on etsitty alan oppikirjoista, tieteellisistä julkaisuista, standardeista ja asiaan liittyviltä yrityksiltä. Mukana on myös käytännön toteutuksia maailmalta.

2 BETONIRAKENTEIDEN LÄMPÖTILA

2.1 Massiiviset siltarakenteet

Betonirakenne on massiivinen silloin, kun sen mitat ovat niin suuret, että hydrataatioreaktio muodostaa niin paljon lämpöä, että on ryhdyttävä rajoittamaan lämpötilankehitystä, jotta välttyttäisiin liian korkeasta lämpötilasta johtuvat vauriot (Betonitekniikan oppikirja 2018, 376). Yleensä rakennetta on pidetty massiivisena, kun rakenteen pienin mitta on metrin, mutta jos sideainemäärä on betonille asetettujen vaatimuksien vuoksi suuri, voivat maksimilämpötila, lämpötilanmuutokset ja kovettuvan rakenteen osien väliset lämpötilaerot tulla suuriksi, rakenteen pienimmän mitan ollessa vain puoli metriä. (Betonirakenteiden työmaatoteutus 2019, 283.)

Rakenteen betonointi, muotit, jälkihoito, suojaus ja jäähdytys tulee hoitaa tavalla, että betonin korkeasta lämpötilasta johtuvaa lujuuskatoa ei pääse syntymään, eikä lämpötilaeroista ja lämpötilan muutoksista johtuvaa halkeilua tapahdu. Betonin lämpötilan pitäisi kuitenkin olla maksimissaan +60 °C hydrataatioreaktion aikana tai vaihtoehtoisesti, jos lämpötilaa ei pystytä pitämään alle tuon lämpötilan, voidaan betonin tavoitelujuutta nostaa, jotta mahdollinen lujuuskato ei alentaisi suunniteltua lujuutta. Joka tapauksessa tällöinkin on huolehdittava, ettei betonin lämpötila pääse nousemaan yli 70°C, jotta hydrataatioreaktion häiriintyminen ei johtaisi rakenteen myöhempään vaurioitumiseen lujuuskadon ja sisäisen halkeilun myötä. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 376.)

Betonointi tulee myös suorittaa tavalla, jossa betonoitavan rakenneosan minikään poikkileikkauksen eri osien välille ei syntyisi yli 20°C lämpötilaero tai korkeintaan 20°C/m. Tämä tulee suorittaa valitsemalla betonimassan koostumus, lämpötila, valutekniikka, valualueet ja työsaumat järkevästi oikein, sekä suojaamalla valupinta oikealla tavalla. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 376–377.)

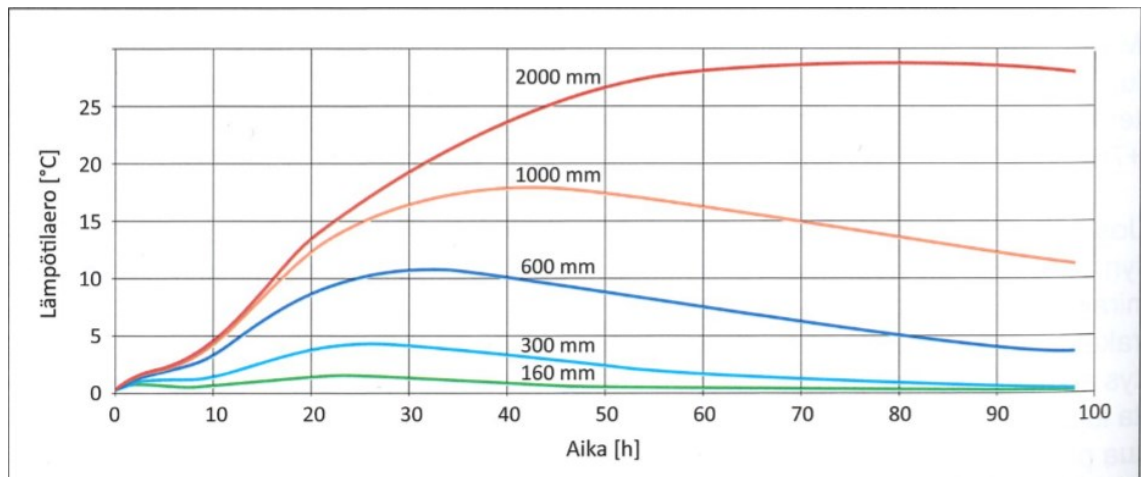
2.2 Lämpötilaan vaikuttavat tekijät

Lämpötilan nouseminen tulee nopeasti massiivissa rakenteissa ongelmaksi, ja lämpötilan muutoksista voi tulla huomattavan suuria. Betonin lämpötilan nousuun vaikuttavat seuraavat tekijät:

- betonirakenteen massiivisuus, mitä paksumpi rakenne, sitä suurempi lämmöntuotto
- käytetty sementtimäärä ja sementtityyppi
- sementin karkeus ja käytetty kiviaineksen raekoko välillisesti
- massan lämpötila
- muottien ja suojauksen lämmöneristysominaisuudet
- mahdollinen jäähdytys tai lämmitys
- sääolosuhteet

(Betonirakenteiden työmaatoteutus 2019, 284).

Rakenteen mittojen vaikutus lämpötilaerojen syntymiseen on huomattava, ja sitä kuvataan kuviossa 1, jossa kuvataan lämpötilaeroa rakenteen keski- ja pintaosien välillä eri paksuisien betoniseinin sisällä. Ulkolämpötila on kuvion esimerkissä +10°C. (Betonitekniiikan oppikirja 2018, 376.)

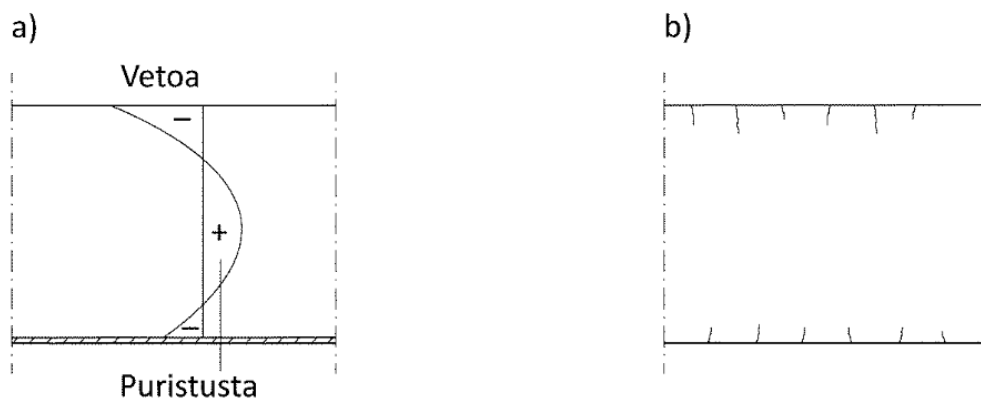


KUVIO 1. Rakenteen paksuuden vaikutus lämpötilaeroon (Betonitekniiikan oppikirja 2018, 377).

Hydrataatioreaktio vapauttaa lämpöä, kun sementti ja vesi alkavat reagoida, jolloin betonirakenteen lämpötila nousee. Paksuissa rakenteissa lämpö poistuu pinnoilta nopeammin kuin se pääsee poistumaan rakenteen keskiosista, jolloin ra-

kenteen sisälle syntyä lämpötilaeroja. Tämän seurauksena rakenteen kovettuessa ja jäähtyessä käyttölämpöön syntyy jännityseroja, jotka voivat aiheuttaa halkeilua, jos vetojännitys rakenteen osissa ylittää sallitun veto- tai leikkauslujuuskapasiteetin. (Betonirakenteiden työmaatoteutus 2019, 286.) On myös mahdollista, että rakenteesta ei poistu lämpöä ollenkaan, ja tätä kutsutaan adiabaattiseksi lämpötilan nousuksi (Betonitekniiikan oppikirja 2018, 377).

Mitä paksumpi rakenne on kyseessä, sitä hitaammin lämpötila pääsee pois rakenteesta ja täten myös lämpötilaero pinnan ja keskiosan välillä kasvaa, jolloin myös vaurioitumisriski kasvaa. (Betonitekniiikan oppikirja 2018, 377.) Suurin halkeamien muodostumisriski on rakenteen jo jäähtyessä, jolloin lämpötilaero pinta- ja sisäosan välillä kasvaa helposti suureksi. Kuviossa 2 on esitetty pintahalkeamien syntymekanismia ja esiintymistä, jossa sisäosien lämpötilat ja muodonmuutokset ovat suurempia kuin pintaosissa, jolloin sisäosiin syntyy puristusjännitystä ja pintaan vetojännitystä. (Betonirakenteiden työmaatoteutus 2019, 286.)



KUVIO 2. lämpötilaerosta johtuvan pintahalkeamien syntyminen ja esiintymispaiikat (Betonirakenteiden työmaatoteutus 2019, 286).

Betonille, jota käytetään massiivisissa rakenteissa, on useita erityisvaatimuksia ja siltojen osalta betoni tulee valmistaa Väyläviraston ohjeen 41/2020 ”infrabetonien valmistus” mukaan. Ohje kuvaa useita erityisvaatimuksia, joita infrabetonille asetetaan, oli se sitten massiivinen tai ei.

2.3 Betonin koostumus

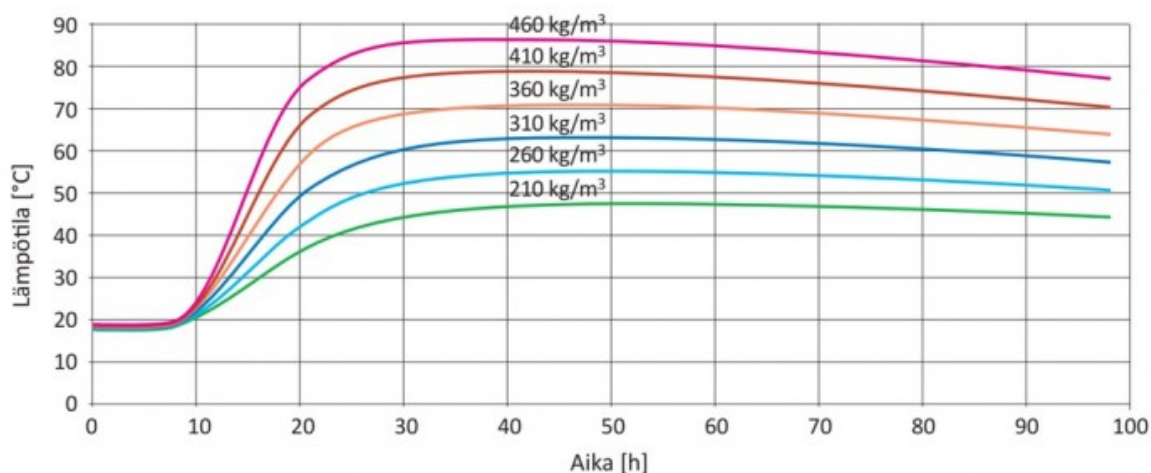
Betonin koostumus tulee valita siten, että hydrataatioreaktiossa syntyvää lämpöä muodostuisi mahdollisimman vähän. Lämmönkehitykseen vaikuttavat ensisijaisesti seuraavat:

- sementtimäärä
- sementtityyppi
- sementin kemiallinen koostumus
- sementin hienous

(Betonitekniikan oppikirja 2018, 377).

2.3.1 Sementin määrä

Koska sementin määrä vaikuttaa eniten betonin lämmöntuottoon tulisi sen määrä minimoida reseptissä (Betonitekniikan oppikirja 2018, 378). Tätä toki ohje ”infrabetonien valmistus” rajoittaa, ja määrää sideaineen kokonaismääräksi vähintään 300 kg/m^3 . Lisäksi mikäli betoniasemalla lisättävän masuunikuonan lisäys portlandsementtiin ylittää 35 % sideaineen kokonaismäärästä, sideaineen kokonaismäärän on oltava vähintään 350 kg/m^3 . (Infrabetonien valmistus 2020, 15–16.) Ja luonnollisesti mitä kovempaa betonia halutaan, sitä enemmän sideainetta on käytettävä. Kuviossa 3 on kuvattu lämpötilan kehittymistä eri sementtimäärillä seinärakenteessa, jonka paksuus on 2000 mm. Kuvan käyrät kertovat rakenteen keskikohdan lämpötilan ulkolämpötilan ollessa $+ 10^\circ\text{C}$.



KUVIO 3. Sementin määrän vaikutus betonin lämpötilan kehitykseen (Betoniteknikan oppikirja 2018, 378).

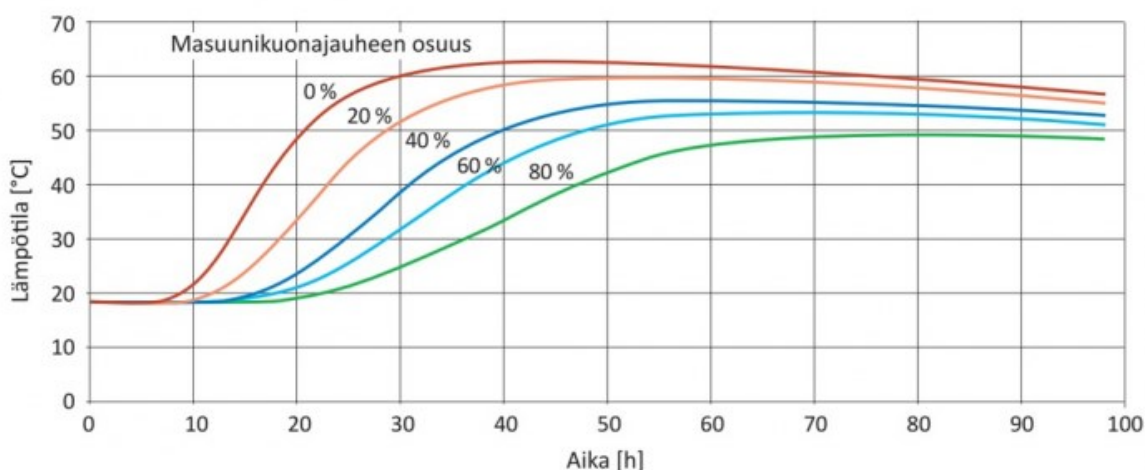
Myös suunnitteluohjeet vaikuttavat luonnollisesti omalta osaltaan sementin määrään määrittelemällä rakenteelle vähimmäislujuuden. Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeessa Betonirakenteiden suunnittelu NCCI 2 määrittellään sillan betonirakenteiden vähimmäisvaatimuksia. Ohjeessa kerrotaan vedeneristeen alla oleville kansille minimivaatimuksen C30/37 lujuusluokka ja P-lukuvaatimukseksi P30. Reunapalkkien osalta on käytettävä vähintään C30/37 P30 tai C35/45 P50 riippuen rasitusluokista. (Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI2 2022, 26.) Vertailuksi eräässä betonisuhteutuksessa, jossa valmistettiin C35/45 P50 massaa, sementin kokonaismääräksi tuli 465 kg/m^3 ja toisessa suhteutuksessa, jossa valmistettiin C30/37 P30 massaa, sementin kokonaismääräksi tuli 374 kg/m^3 .

2.3.2 Masuunikuona

Hydrataatiolämpöä voidaan myös hillitä käyttämällä mahdollisimman karkeaa sementtiä, jolloin lämpö vapautuu pidemmällä aikavälillä eikä maksimilämpötila käy yhtä korkealla. Mahdollista on myös korvata osa sementistä masuunikuonajauheella tai lentotuhkalla. Masuunikuonajauheen reaktiolämpötila on selvästi sementtiä pienempi, joten sen avulla voidaan pienentää betonirakenteen maksimilämpötilaa sekä lämpötilaeroja. (Betoniteknikan oppikirja 2018, 378.)

Väyläviraston ohjeen ”infrabetonien valmistus” mukaan masuunikuonan enimmäismäärä ei saa ylittää 50 % sideaineen kokonaismäärästä poikkeuksena huokoistumattomat betonit, joissa määrä ei saa ylittää 70 %. Näihin määriin lasketaan mukaan sementin sisältämä masuunikuona sekä betoniasemalla lisättävä masuunikuona. Jos sideaine sisältää muita seosaineita, masuunikuonan määrä vähennetään muiden seosaineiden määrällä. (Infrabetonien valmistus 2020, 16.)

Kuviossa 4 on esitetty seinämäisen 2000 mm paksun rakenteen lämpötilaa valun jälkeen ulkolämpötilan ollessa + 10°C, kun nopeasti kovettuvaa sementtiä on korvattu masuunikuonajauheella 0 %, 20 %, 40 %, 60 % ja 80 % (Betoniteknikan oppikirja 2018, 378). Verrokkina masuunikuonien määrille CEM II Oiva-sementissä on masuunikuonaa valmiiksi 21–35 % ja markkinoille 2021 vuonna tulleessa CEM III Kolmossementissä sitä on 40–46 % (Finnsementti nd.).



KUVIO 4. Masuunikuonan vaikutus lämpötilan kehitykseen (Betoniteknikan oppikirja 2018, 378).

Ongelmana masuunikuonan käytössä on myös se, että sitä käytettäessä täytyy sideainetta olla enemmän, kun jos käytettäisiin pelkkää sementtiä. Infrabetonien valmistus ohjeessa määritellään kullekin seosaineelle kerroin, joiden avulla määritetään tehollinen sideaineen kokonaismäärä (kg/m^3). Tämä kerroin on portlandsementille 1, kun taas masuunikuonalle 0,8, jonka seurauksena masuunikuonaa

täytyy käyttää enemmän, jotta päästään vaadittavaan teholliseen sideainemäärään, jota taas tarvitaan P-luvun määrittämiseen. (Infrabetonien valmistus 2020, 35–37.)

Suomalaisen granuloidun masuunikuonan saatavuudessa on myös ollut ongelmia. Se on vaikuttanut ainakin Finnsementin sementin tuotantoon, eikä se ole voinut ottaa vastaan uusia tilauksia kolmossementistä vuoden 2022 loppupuolella. Masuunikuonan vähäisyyden vuoksi myös sementin seostuksia on jouduttu muokkaamaan ja kuonamäärää vähentämään Oiva-sementissä. (Lyytinen 2022.)

2.3.3 Lämmöntuotto

Betonin varhainen lämmöntuotto syntyy pääasiassa sementtiklinkkerin trikalsiumaluminaatti C_3A - ja trikalsiumsilikaatti C_3S -komponenteista, joten klinkkerimäärän minimoinnilla saataisiin alennettua maksimilämpötilaa, mikä toki tapahtuisi jonkin verran lujuudenkehityksen kustannuksella. Minimointia voidaan tehdä käyttämällä seossementtejä, käyttämällä seosaineita kuten masuunikuonaa ja lentotuhkaa ja välttämällä suuria lujuusluokkia sekä alhaista vesi-sementtisuhdetta, jotka kasvattavat sementtimäärää ennestään. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 379.)

Alhaisimpia lämmöntuottajia suomalaisista sementeistä ovat muun muassa SR-sementti sekä Oiva-sementti. (Betonitieto nd.) Nopeasti kovettuvia sementtejä tulisi välttää, kuten Pika- ja Rapid-sementtiä. Sementin määrään pystytään myös vaikuttamaan käyttämällä mahdollisimman suurta maksimiraekokoa, käyttämällä lisäaineita sekä valitsemalla jäykkä betonimassa. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 379.) Toki useasti betonipumppu ja työn sujuvuus rajoittavat jäykän massan valitsemista. Etenkin pumppu rajoittavat tekemistä, sillä notkeuden on oltava riittävän notkeaa, jotta se on pumpattavissa.

Jos betonimassalla on alhainen lämmöntuotto, on sillä myös korrelaatio hitaampaan lujuudenkehitykseen (Betonitekniikan oppikirja 2018, 379). Tämä tulee ottaa huomioon muotinpurkuiässä. Tämä ei kuitenkaan tule usein siltatyömaalla

ongelmaksi, koska tästä huolimatta lämpötila usein kohoaa korkeaksi ja hitaastikin lujutta tuottava betoni saavuttaa 80 % muotinpurku-lujuuden suhteellisen nopeasti, johtuen suurista mitoista, jolloin lämmöntuottoa tulee huomattavasti väistämättä.

2.3.4 Betonin arvosteluikä

Betonin arvosteluikä voidaan myös käyttää 28 vuorokauden sijaan 91:tä vuorokautta, jolloin voidaan hyödyntää seosaineiden kuten masuunikuonan hitaampaa lujudenkehitystä ja lämmöntuottoa. Betonin puristuslujuus kasvaa 28 vuorokauden ja 91 vuorokauden välillä normaalisti 10...30 % riippuen käytetyistä si-deaineista. (Betoniteknikan oppikirja 2018, 379.) Käytettäessä 91 vuorokauden arvosteluikää tarvitsee siitä olla maininta rakennussuunnitelmassa. Jos arvosteluikä muutetaan 28 vuorokaudesta 91 vuorokauteen, vaaditaan sille hankkeen tilaajan ja suunnittelijan hyväksyntä. (InfraRYL 2022.)

2.3.5 Betonin lämpötila

Veden ja kiviaineksen lämpötila vaikuttaa myös luonnollisesti betonimassan lämpötilaan, joka pitää ottaa huomioon etenkin kesällä, kun varsinkin kiviaines on lämmintä. Lämmön nousua voidaan rajoittaa tällöin käyttämällä mahdollisimman viileää vettä sekä jäähdytettyjä kiviaineksia. Veden seassa voidaan harkita käytettävän myös jäähileitä. (Betoniteknikan oppikirja 2018, 379.)

Betonin lämpötila asemalta lähtiessään vaikuttaa myös siihen, kuinka korkealle betonin hydrataation aiheuttama lämpötila lopulta nousee. Tämän takia betonin lähtölämpötila tulisi olla tavanomaisia betonirakenteita alempi, etenkin kun kyseessä on lämpimällä kaudella suoritettu valu. Lämpimät pitkään kestävät ajanjaksot lämmittävät betoniin käytettyä kiviainesta sekä suhteitukseen käytettäviä vesivarantoja. Lähtölämpötilaa voidaan alentaa tehokkaasti jäähdyttämällä raaka-aineita betoniasemalla. Betonin kuljetusmatka sekä pumppaaminen nostattavat hieman betonin alkulämpötilaa. Mitä alhaisempi alkulämpötila on, sitä alhaisempi betonin lämpötila hydrataation aikana. (Betonitieto nd.)

2.4 Valaminen

Massiivisten rakenteiden valaminen vaatii aina huolellista suunnittelua ja vähintään vaativan luokan betonityönjohtajan pätevyyden. Usein vaatimuksena on poikkeuksellisen vaativan työnjohtajan pätevyys, riippuen rakenteen vaativuudesta. Ennen valamista tulee mitoiltaan erilaisille rakenteille teettää etukäteen lämmön- ja lujuudenkehityslaskelmat, koska lämmönkehitykseen vaikuttaa betonimassan ominaisuuksien lisäksi rakenteen tilavuuden ja pinta-alan suhde. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 379.) Ohjelmat betonin lämpötilan arviointiin löytyy yleensä betonin valmistajilta, joilla saadaan tuotettua laskelmat erilaisille poikkeileikkauksille, erilaisilla massoilla, erilaisilla ulkolämpötiloilla ja erilaisilla massan lämpötiloilla.

Myös Finnsementiltä löytyy oma betonin lämmön- ja lujuudenkehityksen laskennan työkalu, josta asiakkaat voi pyytää ennakkolaskelmat. Laskuri vaatii seuraavat tiedot:

- mitat
 - käytettävä betoniresepti (sideaineet ja niiden määrät, vesimäärä ja ilmamäärä)
 - betonin valmistuslämpötila
 - käytettävät muotti- ja eristemateriaalit
 - ympäristön olosuhteet (lämpö ja tuuli)
- (Finnsementti n.d.)

Finnsementiltä löytyy myös yksinkertaisimmille rakenteille oma haku, jossa voi määritellä rakenteen ominaisuuksia, jonka perusteella betometrihaku etsii valittujen ominaisuuksien mukaan laskennat. Kuvassa 1 esitetään valittavat kohdat (Finnsementti n.d.). Laskuri ei kuitenkaan vaadi betonin lähtölämpötilaa, joten sen vaikutusta täytyy arvioida itse. Liitteessä 1 on kuvan 1 valinnoilla saatu raportti.

Rakenne	Lujuusluokka	Sementti
<input type="radio"/> Laatta 300mm	<input type="radio"/> C25/30	<input checked="" type="radio"/> Oiva
<input checked="" type="radio"/> Laatta 700mm	<input type="radio"/> C30/37	<input type="radio"/> Rapid
<input type="radio"/> Antura	<input checked="" type="radio"/> C35/45	<input type="radio"/> SR
<input type="radio"/> Seinä	<input type="radio"/> C40/50	<input type="radio"/> Oiva+kuona
<input type="radio"/> Pilari 400mm x 400mm	<input type="radio"/> C50/60	
<input type="radio"/> Pilari 1200mm x 1200mm		
<input type="radio"/> Laatta-palkki		
<input type="radio"/> Pohjalaatta		
<input type="radio"/> Massiivilaatta		
Ulkolämpötila	Säänkestävyys	
<input type="radio"/> 5°C	<input checked="" type="radio"/> Säänkestävä	
<input checked="" type="radio"/> 25°C	<input type="radio"/> Ei-säänkestävä	
<input type="button" value="Hae arkistosta"/>		
<input type="button" value="Tyhjennä lomake"/>		

KUVA 1. Finnsementin betometrihaku (Finnsementti n.d.).

Laskelmien avulla voidaan suunnitella vaadittavat suojaus – ja jäähdytystoimenpiteet. Laskelmilla saadaan myös selville kummimmat ja kylmimmät kohdat, joihin vähintään tulisi sijoittaa lämpötilan mittauspisteet. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 379.)

Lämpötiloista johtuvaa halkeamariskiä ei voi aina eliminoida valitsemalla oikeanlaista betonin koostumusta, jolloin voi olla tarpeen hallita lämpötila eroja betoniin tulevilla jäähdytysputkilla tai eristämällä betoni. Eristäminen auttaa tasaamaan lämpötilaeroja ja täysin eristetyssä rakenteessa lämpötilaero jää nolnaan. Eristäminen tosin nostaa keskikohdan lämpötilaa hieman. Eristeitä käytettäessä tulee niitä käyttää riittävän kauan, jotta lämpötilaero kuumimman sisäosan ja kylmimmän ulko-osan välillä olisi mahdollisimman pieni. Tärkeätä on, ettei eristeitä poisteta liian aikaisin, koska tästä seuraa nopea pinnan jäähtyminen ja lämpötilaerojen kasvaminen. Lämpötilaero voi tällä tavalla kasvaa jopa suuremmaksi, mitä se olisi ollut täysin eristämättömällä rakenteella. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 380.)

2.5 Lujuuskato

Liian korkeasta betonin lämpötilasta johtuva lujuuskato otetaan huomioon, kun tutkintaan puristuslujuuden vaatimuksenmukaisuutta. Jos tarkempia tutkimuksia ei tehdä, oletetaan että puristuslujuus alenee 20 %, kun betonin korkein lämpötila on +80°C. Toinen oletus on, että lujuuden alenema on nolla, kun betonin korkein lämpötila on +60°C. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. (InfraRYL 2022.) Tästä saadaan myös vanha ”nyrkkisääntö”, jossa lujuuden alenema on 1 % jokaista asteen lämpötilan nousua +60°C jälkeen.

Jos lämpötila ylittää +70°C tulee, pitkäaikaiskestävyyttä tutkia rakenteista irrote-tuin näyttein tilaajan hyväksymän koeohjelman mukaisesti. Sen sijaan lämpötilan kohotessa yli +80°C, betonin puristuslujuuden kelpoisuutta todetaan rakenneko-kein ottamalla poranäytteet korkeimpien lämpötilojen kohdilta. (IfraRYL 2022.)

2.6 Sementin lämmönkehitys

Sementin lämmönkehitykseen vaikuttaa sementin kemiallinen koostumus ja myös sen hienous. Sementtien hydrataatiolämmöntuotot vaihtelevat noin 250kJ:sta/kg 400kJ:iin/kg seitsemässä vuorokaudessa. Suurimmat arvot saa-daan nopeilla sementeillä ja pienimmät lämmönkehityksen arvot saadaan hitaim-milla sementeillä. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 39.)

- Oiva-sementti 310–340 kJ/kg
- SR-sementti 320–340 kJ/kg
- Plus-sementti 310–340 kJ/kg
- Kolmossementti 280–290 kJ/kg

(Finnsementti n.d.)

Sementin hienoudella tarkoitetaan partikkelikokoa sementissä, eli jauhatushie-noutta. Se kerrotaan ominaispinta-alan mukaan ja yksikkönä on m²/kg. Hienous määritellään yleensä Blainen-menetelmän mukaan ja sitä arvioidaan ilman lä-päisevyyden perusteella. Mitä suurempi ominaispinta-alan arvo sementillä on,

sitä hienompaa se on. Ja mitä hienompaa se on, sitä enemmän sillä on reaktiopinta-alaa. Reaktiopinnan kasvu taas lyhentää sitoutumisaikaa, jolloin myös sementin hydrataatio, lujuudenkasvu ja lämmöntuotto nopeutuu. Hienompi sementti vaatii myös enemmän vettä saavuttaakseen tietyn notkeuden verrattuna karkeampaan sementtiin. Suomalaisten sementtien hienous vaihtelee 300...550 m²/kg välillä. (Betonitieto n.d.) Massiivirakenteissa käytetyissä Finnsementin sementeissä on seuraavanlaisia hienouksia:

- Oiva-sementti 400–480 m²/kg
- SR-sementti 310–390 m²/kg
- Plus-sementti 420–470 m²/kg (ei enää saatavilla, Oiva-sementti korvannut)
- Kolmossementti 450–520 m²/kg
(Finnsementti n.d.)

Ennen oli myös saatavilla hienoudeltaan karkeampia sementtejä eli alhaislämpösementtejä, joiden lämmönkehitys kerrotaan olevan n. 75 % yleisportlandsementin arvosta (Sillanrakennustöiden valvontaohje 1983, 25). Finnsementin (silloin Partek) sementti-infosta vuodelta 1985 nähdään tämän alhaislämpösementin eli LH-sementin tietoja ja teknisiä ominaisuuksia. LH-sementtiä valmistettiin erikoisklinkkeristä ainoastaan Partek Ab:n Kolarin tehtaalla. Infossa sanotaan sementin olevan rakennussementti, jonka lujuudenkehitys on hidas ja lämmönkehitys alhainen ja sen sanotaan soveltuvan erityisesti hitaan lämmönkehityksensä vuoksi massiivisten betonirakenteiden valuun. (LH-sementti 1985.) Alla vertailu LH-sementin ja Oiva-sementin lämmönkehityksestä (7 vrk) ja hienoudesta:

- Oiva-sementti
 - Lämmönkehitys 310–340 kJ/kg
 - Hienous 400–480 m²/kg
(Finnsementti n.d.)
- LH-sementti
 - Lämmönkehitys 200–240 kJ/kg
 - Hienous 320 ± 15 m²/kg
(LH-sementti 1985.)

2.7 Ettringiitti

Ettringiitti on portlandsementin hydrataatiotuote, joka syntyy sementin reaktion alkuvaiheessa. Sitä esiintyy kaikissa betoneissa (Pyy. 2022, 26–27). ”Tavallinen” ettringiitin muodostuminen sekoitetaan toisinaan haitalliseen myöhästyneeseen ettringiittireaktioon.

Myöhästyneeksi ettringiittireaktioksi kutsutaan, kun jo kovettuneessa sementtikivessä sulfaattimineraalit alkavat reagoida kemiallisesti, johon liittyy reaktiotuotteiden tilavuuden kasvu. Reaktiossa syntyvä ettringiittimineraali alkaa kiteytymään betonin ilmatäyteisten huokosten sisälle, jolloin suojahuokosten tilavuus vähenee ja täten myös betonin pakkasenkestävyys huononee. Itse vahinko betonille tapahtuu reaktiosta, joko siten että pakkasrapautuminen alkaa hajottamaan betonia alentuneen heikentyneen pakkasenkestävyyden takia, tai siten että huokosten sisällä paine kasvaa liian suureksi kiteytymisen takia. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 134.)

Myöhästyneeseen ettringiittireaktioon eli ettringiitin uudelleen kiteytymiseen on yleensä syynä liian voimakas lämpötila betonin kovettumisen aikana, mikä aiheuttaa häiriötä sementin kovettumiseen. Ettringiitin muodostuminen ajatellaan yleisesti alkavan +70 °C korkeammista lämpötiloista, jonka yli betonin lämpötila ei saisi mennä. Toinen kriittinen asia ettringiitin muodostumiselle pidetään olevan mikrohalkeamat, joihin ettringiitti pystyy kiteytymään. Mikrohalkeamat voivat olla tulosta liian kovasta lämpötilan vaihtelusta, eli myös siinä liian korkea lämpötila voi olla syytä. (Betonitekniikan oppikirja 2018, 134.)

Ongelmaa on havaittu elementtiteollisuuden voimakkaasti lämpökäsitellyissä tuotteissa erityisesti 1970-luvulla valmistetuissa elementeissä. Myöhästyneen ettringiittireaktion mahdollistaa siis liian voimakas lämpökäsittely kovettumisen aikana, sekä ankara kosteusrasitus elinkaaren aikana. (Pyy. 2022, 26–27.) Vaarana siis on, jos massiivirakenne kuten silta joutuu valmistusvaiheessa liian korkeaan lämpötilaan ja altistuu kosteudelle kuten sillat yleensä altistuvat, alkaa niissä myöhästynyt ettringiittireaktio.

Maailmalla ilmiötä on löydetty myös silloissa ja esimerkiksi Yhdysvalloissa Marylandin osavaltiossa asiaa on tutkittu. Tutkimuksessa tutkittiin 16 siltaa, jossa epäiltiin olevan myöhästynyttä ettringiittireaktiota, sillan pintahalkeilun perusteella. Reaktiota löytyi jokaisesta sillasta, josta sitä tutkittiin, niin rakenteista jotka olivat elementteinä, kuin myös paikallavalu rakenteista. Sitä löytyi myös kohdista, jossa ei havaittu pintahalkeilua. Ongelmaksi tuli kuitenkin se, että ei kyetty täysin luotettavasti erottamaan onko löytynyt ettringiittikide alkuperäisestä reaktiosta johtuvaa, vai nimenomaan tutkittua myöhästynyttä ettringiittiä. (Taylor 2001.)

Myös ranskassa on löydetty useasta sillasta myöhästyneen ettringiitin ongelmaa. Eräässä tutkimuksessa tutkittiin useita ranskalaisia siltoja, jossa oli havaittu kyseistä ongelmaa, kuvattiin ongelmaa ja mitä niistä opittiin. Tutkimuksen perusteella luotiin strategia, kuinka ongelmalta voitaisiin välttyä. Kuvassa 2 on tutkimuksessa mukana ollut Bellevue silta Nantes kaupungissa Ranskassa. Kuvasta nähdään sillan välituessa olevaa myöhästyneen ettringiitin aiheuttamaa verkko- halkeilua. (Godart & Divet 2013.)



KUVA 2. Myöhästyneestä ettringiittireaktiosta johtuvaa halkeilua (Godart & Divet 2013).

Haitallisen myöhästyneen ettringiittireaktion välttämiseksi ranskalaisten tutkimuksessa, jaotellaan valmistettava rakenne ensin yhteen kolmesta riskiluokasta sen

perusteella miten haitallista reaktio olisi sille. Ensimmäisessä kategoriassa olisi esimerkiksi tilapäiset rakenteet ja taas kolmannessa kategoriassa olisi esimerkiksi padot ja tunnelit. Seuraavaksi rakenne jaotellaan yhteen kolmesta luokasta kosteuden perusteella. Ensimmäiseen luokkaan XH1 kuuluvat rakenteet, jotka ovat kuivissa tai kohtalaisissa kosteusolosuhteissa. Toisessa päässä XH3 luokkaan kuuluvat rakenteet, jotka ovat koko ajan kosketuksessa veden kanssa esimerkiksi vuorovesien vuoksi. Näiden kahden luokan perusteella rakenteet jaetaan yhteen neljästä luokasta, jotka on kuvattu taulukossa 1. (Godart & Divet 2013.)

Rakenteen riskiluokka	Kosteus/vedelle altistumis luokitus		
	XH1	XH2	XH3
I	As	As	As
II	As	Bs	Cs
III	As	Cs	Ds

TAULUKKO 1. Riskiluokkien ja kosteusluokkien muodostavat luokat (Godart & Divet 2013.)

Jokaiselle As-Ds luokalle on määritelty tietty maksimi lämpötila minkä se saa saavuttaa, jotka ovat karkeasti seuraavanlaiset:

- As, lämpötila < 85°C
- Bs, lämpötila < 75°C
- Cs, lämpötila < 70°C
- Ds, lämpötila < 65°C

(Godart & Divet 2013.)

Eli tässä strategiassa hyväksytään suuriakin lämpötilan arvoja, mikäli rakenteen riskiluokka ja kosteusluokka eivät ole suuria. Ranskan ilmasto Suomeen verrattuna on toki melko leuto eikä rakenteet vaadi samanlaista pakkasenkestävyyttä. Kuitenkin heidän tutkimuksistaan oppina voi ottaa kovaan arvoon laitetun jatkuvan kosteuden vaikutus, mitä myös Hannu Pyy alleviivaa omissa materiaaleissaan (Pyy. 2022, 26–27). Väyläviraston mukaan heillä ei ole tutkittu myöhästyneen ettringiittireaktion vaikutuksista siltarakenteissa, eikä myöskään lähiaikoina ole suunnitelmissa aloittaa sellaista.

2.8 Betonin lämpökäsittely

Betonin lämpökäsittelyllä tarkoitetaan betoniteknologiassa lujuudenkehityksen nopeuttamiseen käytettyä tapaa, ja sen tarkoituksena on nopeuttaa muottikertoa.

Betoni pidetään olevan lämpökäsiteltyä, jos:

- betonimassan lämpötila on $> +40\text{ °C}$
- kovettumisen aikana lämpötila nousee $> +50\text{ °C}$
- lämpötila nousee kovettumisen aikana $> 25\text{ °C}$

(Betonitekniikan oppikirja 2018, 504)

Yleinen harhakäsitys on, että betonirakenteen hydrataation aikainen liiallinen lämmön nousu ja lämpökäsittely olisivat verrattavissa toisiinsa, joka ei pidä paikkaansa. Näitä kahta asiaa ei tulisi rinnastaa toisiinsa. Liiallinen lämmön nousu tapahtuu suunnittelematta, jonka mukana tulee useasti ikäviä seurauksia, kun taas lämpökäsittely on suunniteltu ja halittu prosessi. (Paukku 2016.)

3 LÄMPÖTILAN HALLINTA TYÖMAALLA

3.1 Aikataulutus

Ensimmäinen menetelmä hallita betonin lämpötilaa, on suorittaa valut ajankohdina, milloin ympäröivä lämpötila on riittävän alhainen. Eli voidaan suorittaa valu esimerkiksi keväällä, jolloin ilma on vielä viileää ja betonikin saadaan viileänä, ilman sen jäähdystystä. Oleellista on, että valuajankohtaa ei ole edeltänyt kuuma jakso, jonka aikana betonin raaka-aineet ovat päässeet kuumenemaan. Raaka-aineiden lämpötilat tulevat vallitsevaa lämpötilaa hieman perässä. Keväällä ja kesän alussa betoni onkin ilman lämpötilaa viileämpää ja syksyn suunnalla tilanne voi olla käännteinen. Valujen aikatauluttaminen yölle voi auttaa hieman laskemaan betonin lämpötilaa (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 6).

Kun betonin lämpötilaa ei saada pidettyä riittävän alhaisina esimerkiksi valamalla kylmempinä ajankohtina tai jos aikataulu vaatii valujen tapahtuvan kuumina ajanjaksoina, voi betonin jäähdytys tulla kysymykseen. Massiivisissa ja paljon sideaineita sisältävässä rakenteessa jäähdytys voi tulla kysymykseen jo suhteellisen viileilläkin keleillä. Jäähdytystä suoritetaan pääasialisesti jo betonitehtaalla, mutta jonkinlaisiin toimenpiteisiin pystytään myös työmaalla.

3.2 Jäähdytysputkistot

Jos betonin lämpötilaa ei pystytä pitämään riittävän viileänä voidaan harkita jäähdytysputkistojen tekemistä valuun. Putkiston ideana on, että putkistossa kierrätetään kylmää nestettä (yleensä vettä, veden ja pakkasnesteen sekoitusta tai suolavettä, jolla alhaisempi jäätymispiste kuin pelkällä vedellä) joka alentaa ympäröivän betonin lämpötilaa. Riippuen jäähdytysputkien koosta, nesteen virtaamasta sekä nesteen lämpötilasta, pystytään kovettuvan betonin maksimilämpötilaa hillitä huomattava määrä. Pienemmät putket kylmemmällä nesteen lämpötilalla aiheuttavat vaikeammat paikalliset olosuhteet betonille, kuin suuremmat putket, joissa virtaa vähemmän kylmä neste. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 9–10.)

Jäähdytysputkiston materiaaleina voi käyttää alumiinia, ohutseinäistä teräsputkea tai muuta riittävän kestävästä putkea, kuten jämäkkää PVC-putkea. Putken halkaisija voi olla luokkaa 25 mm ja sitä on käytetty onnistuneesti jäähdytyksessä. Analyysien mukaan isompi putki, olisi tehokkaampi ratkaisu, vaikka neste olisikin lämpimämpää isomman putken osalla. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 10.) Jos kyseessä on kuitenkin suhteellisen pienen kohteen jäähdytys, lienee järkevintä käyttää jonkinlaista elastista vesiputkea, kuten PEX tai PE putkea.

Jäähdytyskierron pituus tulisi olla korkeintaan 76 m betonissa, joka sisältää paljon sementtiä, koska pidemmällä putkituksilla tehokkuus laskee, johtuen nesteen lämpenemisestä putkessa (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2020). Jäähdytyskierron maksimi tavoitepituus vanhemmassa ohjeessa tulisi olla 244 m, joka on peräisin padonrakennuksen ohjeista. Myös putkijatkoksien määrä tulisi minimoida, koska ne ovat putkiston heikoimmat kohdat. Putkijatkosten kohdat tulisi myös sitoa huolella, jottei putket irtoa toisistaan. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 10.)

Jos jäähdytyksessä on useita putkikiertoja, tulisi kiertojen olla samaa kokoluokkaa, jotta jäähdytys olisi samankaltaista eri kohdissa. Jokainen putkikierto tulisi testata vuotamisen varalta ennen valamista. Jokaisella kierrolla tulisi olla myös jonkinlainen visuaalinen indikaattori, että neste todella kiertää järjestelmässä. Järjestelmässä tulisi olla nesteen kiertoa valun alkaessa, jotta putkeen ei syntyisi valusta vahinkoa. Tällöin putket eivät alkaisi kellumaan valussa ja jäähdytys alkaisi mahdollisimman hyvissä ajoin. Valamisen aikana tulisi myös varautua korjaamaan jäähdytysputkistoa, mikäli se vaurioituu esimerkiksi betonin aiheuttamana tai täryttämisestä. Ylimääräistä putkea ja liittimiä pitäisi olla valmiina, jotta korjaaminen voi onnistua. Toki jos kyseessä on tiheästi raudoitettu rakenne ja muotti lähellä putkia voi korjaaminen olla hyvin haastavaa valamisen aikana. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 10.)

Jäähdyttävän nesteen pumppaukselle on myös tiettyjä edellytyksiä ja yhdelle putkikierrolla tavanomainen pumppauksen tilavuusvirta on 15–17 l/min, kun kyseessä on 25 mm putki. Tällöin putken sisällä olevan virtauksen nopeus on noin

nelinkertainen mitä turbulenti virtaus vaatii. Turbulenti virtaus putkikierrossa kasvattaa lämmönsiirrossa tapahtuvaa energian siirtoa, täten kasvattaen lämmön virtausta rakenteesta. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 10–11.)

Tarkkaa tarvittavaa virtausta selvittäessä voidaan laskea Reynoldsin luku, jolla voidaan tulkita, onko virtaus laminaarista vaiko turbulenttista

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\eta}$$

jossa:

Re=Reynoldsin luku

D=putken halkaisija

v= keskimääräinen virtausnopeus m/s

ρ = nesteen tiheys kg/m³

η =dynaaminen viskositeetti Pa*s

(Tammertekniikka 2019, 101)

Putkivirtauksessa Reynoldsin lukua voidaan tulkita seuraavasti:

alle 2000: laminaarinen virtaus

2000–4000: siirtymäalue, jossa virtaus voi olla laminaarinen tai turbulenttinen

yli 4000: turbulenttinen virtaus

(Shashi 2015)

Jos järjestelmässä käytetään vettä, joka on esimerkiksi järvestä tai joesta, tulisi vesi suodattaa ennen käyttöä, jotta sedimenttiä ei kulkeutuisi järjestelmään ja täten tukkisi sitä putkien taitteissa, kavennuksissa tai venttiileissä. Vedenkierron suunta tulisi myös vaihtaa vähintään päivittäin, ellei kyseessä ole vain lyhyt jäähdytysputkisto. Jäähdytyslaitteiston tarve arvioida tilanteen mukaan riippuen putkiston pituudesta ja putkikiertojen määrän mukaan. Vettä, jota on jäähdytetty 3°C asti on käytetty jäähdytyksessä onnistuneesti. Seoksella 70 % vettä ja 30 % pakkasnestettä, on nestettä jäähdytetty 1°C asti ja käytetty onnistuneesti. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 10.) Käytetyn lähteen uudemmassa versiossa suositellaan, että betonin ja veden suurin lämpötilaero tulisi

kuitenkin olla korkeintaan 20°C, ettei putkea ympäröivä betoni koe lämpöshokkia, josta seuraa lopulta halkeilua (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2020). Kuitenkin jos kierto putkissa aloitetaan hyvissä ajoin, putkea ympäröivä betoni ei ole vielä päässyt kuumenemaan, eikä shokki ole tällöin yhtä suuri.

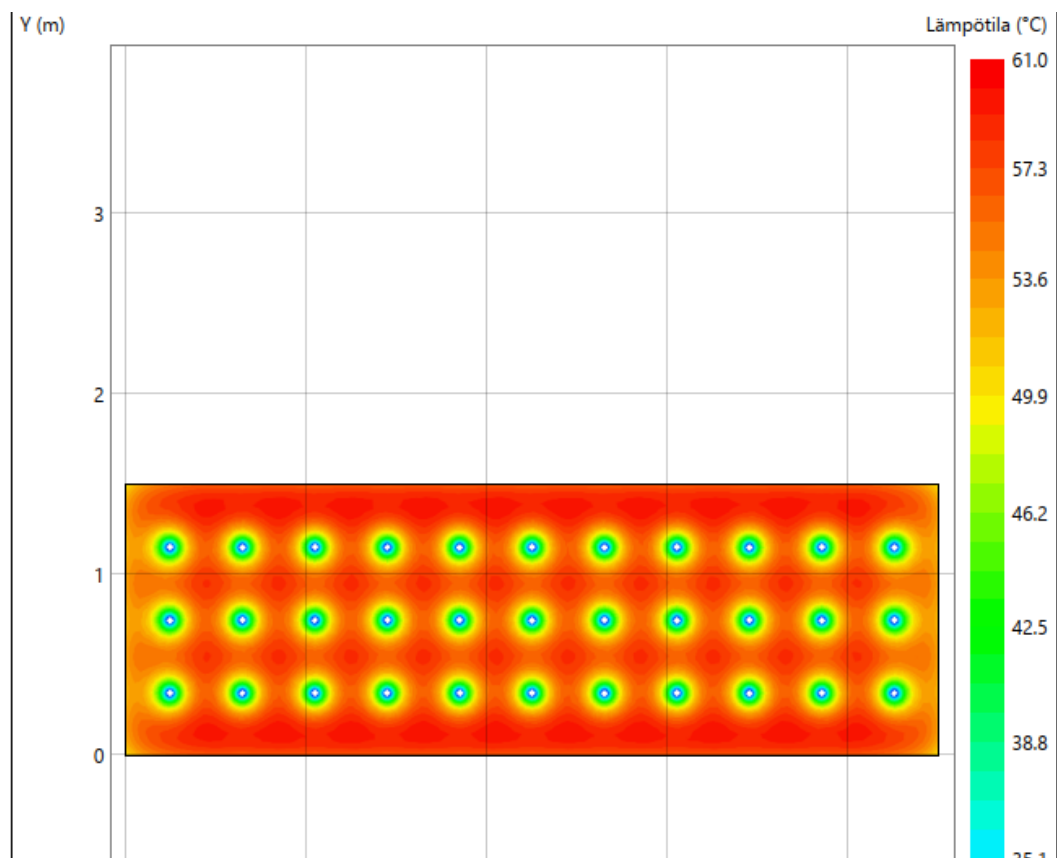
Jäähdytysputkiston voi toteuttaa myös tavalla, että eri syvyyksissä on eri putki-kierto, jolloin vedenvirtausta voidaan säädellä sen mukaan kuinka lämmintä missäkin kohdassa on. Kuvassa 3 nähdään järjestelmä, jossa jokaisen kierron virtaamaa saadaan säädettyä venttiilillä ja täten hienosäädettyä lämpötiloja. Monissa kohteissa viileän veden lähteenä toimii vesijohtoverkosto, jolloin erillistä jäähdytystä ei ole tarpeen rakentaa, mikäli sieltä saa riittävän viileää vettä. Myöskään veden talteenotto ja kierrättäminen ei ole tällöin välttämätöntä. (Roush & O'Leary 2005.) On myös oleellista seurata betonin lämpötilaa eri kohdissa ja syvyyksissä rakennetta. Lämpötilaa tulisi seurata on seurata jäähdytysputken lähellä ja kahden putken puolivälissä, jotta tiedetään vaikutus eri etäisyyksiltä jäähdytysputkesta. Myös lähtöveden ja tuloveden lämpötiloja tulisi seurata, jotta poistuneen lämmön määrä saadaan tietoon. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 11.)



KUVA 3. Jäähdytysputkien päitä eri syvyyksillä valussa (Roush & O'Leary 2005).

Sillanrakennustöiden valvontaohjeessa mainitaan, että jäähdytysputkistoilla on saatu aikaan 5-8 °C suuruinen maksimilämpötilan lasku, kun käytetään halkaisijaltaan 25 mm muoviputkea jaon ollessa k 600 mm ja putkisilmukan pituuden ollessa 100 m. Jäähdyttävän veden lämpötilan kerrotaan olevan + 5 °C ja veden virtausnopeus noin 20 l/min. (Sillanrakennustöiden valvontaohje 1983, 26.)

Jo aiemmin mainituilla betonin lämpötilan arvioimishjelmistoilla pystytään joidenkin ohjelmien tapauksessa simuloimaan myös jäähdytysputkistojen vaikutusta. Kuviossa 5 Ruduksen ohjelmiston lämpötila simulaatio.



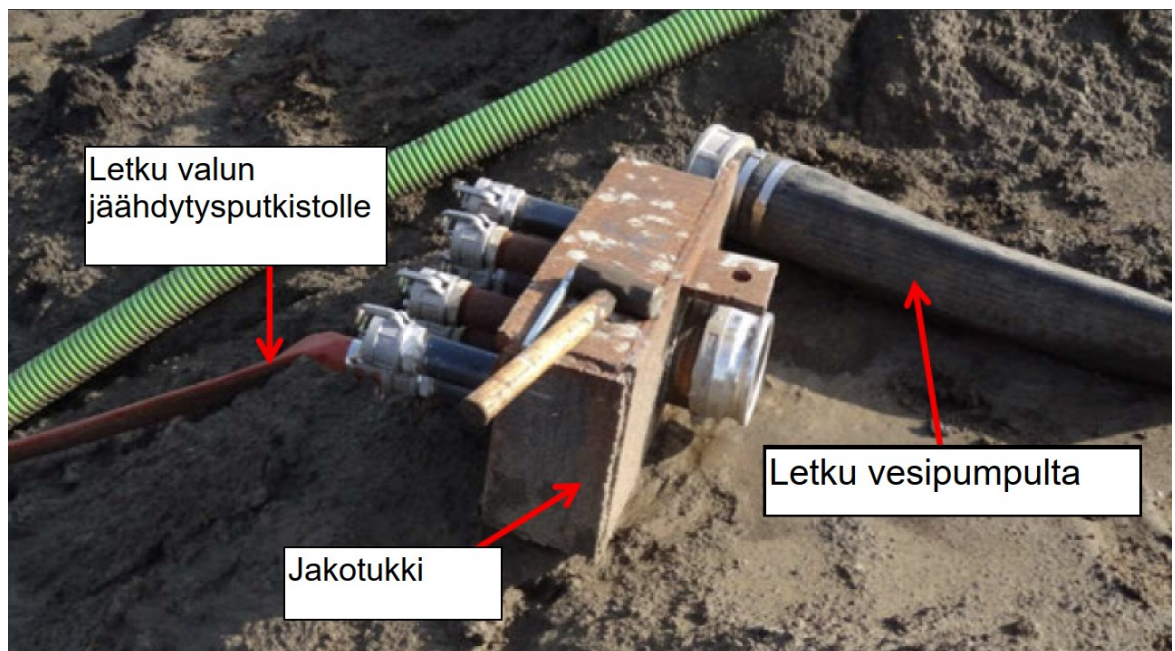
KUVIO 5. Jäähdytysputkistojen simulaatio rakenteessa (Raitiotieallianssi 2022).

Kun jäähdytystä ei enää tarvita rakenteessa, tulee jäähdytysputkistot täyttää umpeen asianmukaisesti. Täyttö suoritetaan injektoimalla putket täyteen asiaan sopivaa SILKO-hyväksyttyä tuotetta käyttäen.

3.3 Käytännön toteutuksia

Jäähdytysputkistoja on käytetty dokumentoidusti työmailla mm. Missouri joen ylittävän sillan anturassa Yhdysvalloissa vuonna 2012. Tässä tapauksessa vesi pumpattiin Missouri joesta jäähdytysputkistoihin käyttäen niin sähköisiä, kuin myös polttomoottorisia pumppuja hyväksi käyttäen. Pumppausmatkat vedestä muotille oli välillä pitkiä ja käytössä oli suuri vesipumppu, jotta korkeuseroista ja vesiputken sisäisestä kitkasta johtuvat painehäviöt eivät olisi ongelma. Pumppausmatka oli vaakasuunnassa 122 metriä ja korkeuseroa oli 15 metriä. (Shaw 2012, 74–75.)

Vesi pumpattiin 4–8 tuuman putkistoa pitkin pumpulta valupaikalle. Putken edessä kohti valupaikkaa putkisto jaettiin useammaksi pieneksi putkistoksi, joka mahdollisti useamman paikan yhtäaikaisten jäähdytyksen, ja samalla myös kasvatti painetta putkessa putken pienentyessä kuvan 4 tavalla. (Shaw 2012, 75.)



KUVA 4. Veden jakaminen pumpulta usealle valupaikalle (Shaw 2012, 76).

Kun putkisto saavutti valupaikan, jaettiin putkisto yhä pienemmiksi putkistoiksi, joka mahdollistaa jokaisen putkikerron oman veden syötön. Jakaminen mahdollistaa myös veden virtauksen säätelyn jokaiselle kierrolle erikseen kuvien 5 ja 6 osoittamalla tavalla (Shaw 2012, 76–77.)



KUVA 5. Jakotukki (Shaw 2012, 76).



KUVA 6. Jakotukki (Shaw 2012, 76).

Jäähdytysjärjestelmät muodostuivat useammasta putkikierrosta, jossa vettä pumpattiin. Putkien välimatka toisistaan oli vaaka- ja pystysuunnannassa noin 0,6–0,9 metrin luokkaa. Putkimateriaaleina käytettiin PEX (polyeteeni) putkea sekä PVC (polyvinyylikloridi) putkea. PEX putken kokona käytettiin $\frac{3}{4}$ tuumaa (noin 19 mm) ja PVC putken osalta $\frac{3}{4}$ tuumaa (noin 19 mm) ja 1 tuuman (noin 25 mm) putkea. Kuvassa 7 on PEX putkella toteutettu jäähdytysputkisto ja kuvassa 8 PVC putkella toteutettu jäähdytysputkisto. (Shaw 2012, 78.)



KUVA 7. PEX jäähdtytysputkisto (Shaw 2012, 78).



KUVA 8. PVC jäähdtytysputkisto (Shaw 2012, 79).

4 JÄÄHDYTYSMENETELMÄT BETONITEHTAALLA

4.1 Yleistä jäähdytyksestä

Betonin lämpötilan nousun minimointi valun hetkellä on tehokkain tapa vähentää lämpörasitusta sekä lämpötilasta johtuvaa halkeilua. Massiivisia rakenteita valettaessa betonin jokaista 6°C kohden, joka on keskimääräistä ilman lämpötilaa alempana, betonin suurin lämpötilapiikki alenee 2–3 °C. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 3.)

Oleellista tietoa mietittäessä vaikutusta betonin lämpötilalle on lämpökapasiteetti, joka kertoo lämpömäärän, jolla tässä tapauksessa betonin lämpötilaa saadaan nostettua yhdellä lämpöasteella. Betonin eri ainesosilla taas on omat ominaislämpökapasiteetit, joka taas kertoo kuinka paljon eri materiaaleihin, sitoutuu lämpöenergiaa lämpötilaeroa ja massaa kohti. Ominaislämpökapasiteetit betonin raaka-aineissa vaihtelevat kiviaineksen noin 0,75 kJ/(K*kg) arvosta veden 4,18 kJ/(K*kg) arvoon. Eli mitä isompi ominaislämpökapasiteetti ja massa tietyllä raaka-aineella on, sitä isompi vaikutus sillä on lämpötilaan. Taulukossa 2 on esitetty erään 1m³ suhteituksen raaka-aineiden painot, materiaalien ominaislämpökapasiteetit, näiden tulona lämpökapasiteetit ja viimeisenä lämpökapasiteetit on jaettu veden ominaislämpökapasiteetilla, jolloin saadaan aineen lämpökapasiteettia vastaava määrä vettä, jotta vertailu helpottaisi. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 3–4.) Laskuissa käytetään viimeisen sarakkeen arvoja.

Ainesosa	paino kg/m ³	ominaislämpökapasiteetti (kJ/(K*kg))	lämpökapasiteetti (kJ/K)	vastaava määrä vettä (kg)
0/1 kiviaines	82	0,75	61,5	14,7
kosteus (5%)	4,1	4,18	17,1	4,1
0/8 kiviaines	1064	0,75	798,0	190,9
kosteus (2%)	21,3	4,18	89,0	21,3
8/16 kiviaines	550	0,75	412,5	98,7
kosteus (1%)	5,5	4,18	23,0	5,5
Sementti	480	0,88	422,4	101,1
Vesi	147	4,18	614,5	147,0
Yhteensä	2353,9			583,3

TAULUKKO 2

4.2 Suhteitus kylmällä vedellä / jäällä

Betoniin vaaditaan vain rajallinen määrä vettä ja sen jäähdyttävä energia ei välttämättä ole riittävä massiiviseen rakenteeseen, vaikka suhteutuksessa lähes kaikki vesi olisikin jäätyneessä muodossa. Kylmällä vedellä suhteitus onnistuu helpommin, kun jään suhteitus. Tämä johtuu yksinkertaisemmista laitteistosta mitä vedelle vaaditaan, myös sekoitusaika on pienempi koska ei ole jäätä minkä tarvitsee sulaa. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 6.)

Selvitettäessä kuinka paljon veden lämpötilan laskeminen vaikuttaa betonin lämpötilaan, otetaan käyttöön taulukon 2 arvoja. Kerrotaan sekoitettavan veden painolla lämpötilan muutos, ja tämän jälkeen jakamalla ne aiemmin selitetyllä lämpökapasiteetteja vastaavalla veden painolla.

Lasketaan miten paljon vaikutusta olisi laskea veden lämpötila $20\text{ °C} \rightarrow 2\text{ °C}$ ja vastaavasti $8\text{ °C} \rightarrow 2\text{ °C}$. Lämpötilat valikoituivat näiksi Tampereen Veden julkaisemiin tietoihin perustuen, jossa kerrotaan veden lämpötilan vaihtelevan $7\text{--}9\text{ °C}$ välillä, alueilla jonne vesi tulee pohjavetenä ja $1\text{--}22\text{ °C}$ välillä, alueilla joihin vesi tulee pintavetenä. (Tampereen Vesi n.d.)

veden jäähdyttäminen $20\text{ °C} \rightarrow 2\text{ °C}$

$$\frac{147\text{ kg} * (20\text{ °C} - 2\text{ °C})}{583,3\text{ kg}} = 4,536 \dots \text{ °C}$$

ja vastaavasti $8\text{ °C} \rightarrow 2\text{ °C}$

$$\frac{147\text{ kg} * (8\text{ °C} - 2\text{ °C})}{583,3\text{ kg}} = 1,512 \dots \text{ °C}$$

Jo veden jäähdyttämisellä voi siis saada jo jonkinlaisia tuloksia aikaan. Tämä korostuu alueilla, jonka vesi tulee pintavetenä, ja on altis lämpötilan muutoksille lämpöjaksojen aikana.

Jään käyttö betonin valmistuksessa on yksi tehokkaimmista tavoista saada las-kettua betonin lämpötilaa, sillä yksi kilo jäätä absorboi 334 kJ energiaa muuttu-essaan jäästä vedeksi. Tätä energiamäärää kuvataan ominaissulamislämmöksi. Jään tyypillä on myös väliä sekoitusaikaan, ensimmäiset tavat lisätä jäätä seokseen oli murskata tai lohkaista jäätä ennen myllyyn laittamista. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 6.)

Myöhemmin käyttöön on tullut laitteistoja, joilla valmistetaan hiutaleista jäätä/hilejää, jossa jää muodostuu jäähdytetyssä pyörivässä sylinterissä, jonka pin-nalle ruiskutetaan vettä ja jään muodostuessa se raaputetaan sylinterin pinnalta (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 6). Tätä tapaa on käy-tetty betonin valmistuksessa siitä syystä, että hilejällä on suurempi pinta-ala kuin muilla jää tyypeillä, jolloin se viilentää tehokkaammin. Hilejää on myös kooltaan pientä, jolloin se sulaa nopeasti ja täten lyhentää sekoitusaikaa, koska kaiken jään tulee sulaa sekoituksen yhteydessä. (Semco 2015.)

Laitteistot, joilla jäätä voidaan valmistaa ovat kalliita ja Suomen olosuhteissa kausi, jolloin niitä tarvitaan, on lyhyt. Paljonko jäätä voidaan käyttää betonin val-mistuksessa, riippuu kuinka kosteita muut betonin runkoaineet ovat. Jos runkoai-neet ovat kuivia noin kolme neljäsosaa vedestä voi olla jäänä, jos taas runkoai-neet ovat riittävän kosteita voidaan loput vedestä lisätä jäänä. (Cooling and In-sulating Systems for Mass Concrete 2005, 6.) Jotta sekoitus sujuisi sujuvammin, ei kaiken veden tulisi olla jäänä, vaan sen määrä tulisi olla maksimissaan kolme neljäsosaa (Guide to Hot Weather Concreting 2010, 10).

Jos taulukon 2 koko vesimäärä voitaisiin lisätä jäänä myllyyn, saataisiin betonin lämpötilaa alennettua esimerkin seoksen tapauksessa seuraavanlainen määrä:

$$\frac{147 \text{ kg} * (334 \text{ kJ/kg})}{583,3 \text{ kg} * 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * K} = 20,137 \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tällaiseen jää määrään tuskin pystyttäisiin betonitehtaalla. Jos puolet vedestä pystyttäisiin lisäämään jäänä, olisi jään jäähdyttävä määrä puolet aiemmin mai-nitusta.

4.3 Runkoaineen jäädytys

Vaikka runkoaineen ominaislämpökapasiteetit ovat melko alhaisia, muodostavat ne niin suuren osan betonista, että niiden lämpötilalla on suuri vaikutus betonin lämpötilaan (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 6). Jos jäädytyksellä halutaan suurta muutosta, voidaan sitä saavuttaa jäädyttämällä runkoainetta. Yksinkertaisimmillaan runkoaineen lämpötilaa saadaan pidettyä matalampana, on suojaamalla niitä Auringolta.

Karkeita kiviaineksia voidaan viilentää sumuttamalla tai ruiskuttamalla vettä kiviaineskasojen päälle. Tavalla saadaan rajallinen hyötö lämpötilaan melko kustannustehokkaalla tavalla. Lämpötilan muutos riippuu haihtumisen viilentämiseffektistä, joka puolestaan riippuu ympäröivistä olosuhteista kuten lämpötilasta, tuulesta sekä suhteellisesta kosteudesta. Ideana on saavuttaa viilentämistä kiviaineksen pinnalta tapahtuvan haihtumisen avulla, joten kivikasojen liiallinen kastelu ei ole tarkoituksenmukaista, ja voi haitata haihtumisella tapahtuvaa viilentämistä. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 7.)

Karkeita kiviaineksia voidaan jäädyttää myös upottamalla kiviaines tankkeihin, joiden läpi kylmää vettä kierrätetään. Aluksi tankki täytetään jäädytetyllä vedellä, sitten karkea kiviaines tiputetaan tankkiin, jäädytettyä vettä virrataan kiviaineksen läpi, vesi tyhjenetään tankista ja lopuksi tiputetaan kiviaines kartionmallisesta pohjasta. Kiviaines tiputetaan kuljetushihnalle, josta se kuljetetaan täryseulaan, joka poistaa ylimääräisen kosteuden. Tämän kaltaisella järjestelmällä on saatu jäädytettyä karkeita kiviaineksia 3°C lämpöiseksi 45 minuutin jäädytyksellä. Koko jäädytyskierron pituus olisi noin 2 tuntia huomioiden myös täytön ja tyhjennyksen. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 7.)

Jos taulukon 2 kiviaineksista 0/8 ja 8/16 jäädytettäisiin +24°C → 3°C saataisiin sillä seuraavanlainen viilennys betoniin:

$$\frac{(190,9 \text{ kg} + 98,7 \text{ kg}) * (24^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C})}{583,3 \text{ kg}} = 10,426 \dots ^{\circ}\text{C}$$

Kiviainesta on viilennetty myös sumuttamalla viileää vettä kuljetushihnalla kulkeville kiviaineksille. Tämä voi vaatia joko tavallista pidemmän hinnan tai hitaammin kulkevan hinnan sekä tavan poistaa ylimääräinen vesi. Tällä tavalla vettä ruiskutetaan vain muutamia minuutteja käytännön syistä, jolloin lämpö poistuu lähinnä vain kiviainesten pinnasta. Ennen kuin kiviaines päätyy myllyyn, täytyy kiviaineksesta poistaa ylimääräinen vesi. Käyttämällä viileää paineilmaa, jota puhalletaan kiviaineksen läpi, saadaan lämpötilaa edelleen alemmas. Kuitenkin vain sellaisissa määrissä, ettei ylimääräinen vesi pääse jäätymään. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 7.)

Alipainejäähdytyksessä käytetään hyödyksi veden alemmaa kiehumispistettä pienemmässä paineessa ja suurta lämmön absorptiokykyä veden muuttuessa nesteestä höyryksi. Tällä tavalla voidaan jäähdyttää kaikenkokoisia kiviaineksia. Kiviaineksissa täytyy olla riittävä määrä kosteutta, jotta lämpöä poistuu riittävästi kosteuden mukana. Kosteat kiviainekset laitetaan painealtaaseen, joka suljetaan tiiviiksi, jonka jälkeen ilmaa aletaan pumppaamaan pois. Tavalla on laskettu kiviaineksen lämpötilaa 43°C lähtölämpötilasta 10°C lopputulokseen, 45 minuutin käsittelyllä. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 7–8.)

4.4 Nestemäisen typen käyttö

Nestemäinen typpi on hajutonta, väritöntä ja erittäin kylmää ja sitä käytetään teollisuudessa muun muassa jäähdytykseen ja pakastukseen. Typpi on inertti, joka kertoo, että aine ei reagoi muiden aineiden kanssa vaan on reaktiokyvytön, eikä tätä vahingoita betoniakaan. Typpi ei myöskään ole syttyvää. (Työterveyslaitos 2022.) Kun nestemäinen typpi höyrystyy, sitoo se itseensä paljon lämpöenergiaa, jonka vuoksi se on tehokas jäähdytysaine (Linde n.d.). Typeä käytettäessä täytyy muistaa, että typpi syrjäyttää hapetta ja voi aiheuttaa hapenpuutteesta johtuvia tukehtumisia suljetuissa tiloissa. Hengittäessä puhdasta typeä, hapenpuute voi johtaa välittömään tajunnan menetykseen ja lähes välittömään kuolemaan. Jos taas henkilö hengittää nestemäisen typen kylmiä höyryjä, se voi aiheuttaa

paleltumia hengitysteissä. Ylipäättään suora kosketus nestemäiseen tyypeen tai altistuminen tyyppihöyryille aiheuttaa paleltumavamman. (Työterveyslaitos 2022.)

Nestemäinen tyyppi on vaihtoehtoinen tapa jäähdyttää myllyyn menevää vettä, luoden jään ja veden sekoituksen. Tyyppi ruiskutetaan säilytystankeista suoraan joko vesitankkiin, kiviainekseen tai myllyyn lämpötilan alentamiseksi mahdollisimman paljolla, kuitenkin siten, ettei jäätymistä tapahdu. Eräs tapa tehostaa jäähdytystä on injektoida tyypeä veteen tähän tarkoitettuun sekoittimessa, juuri ennen kuin se päätyy myllyyn, jolloin osa vedestä jäätyy. Jään määrää hallitsemalla voidaan määrittää haluttuja lämpötiloja. (Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete 2005, 7–8.)

Nestemäistä tyypeä voidaan ruiskuttaa myös betoniautoon siinä vaiheessa, kun betonikuorma on saatu kyytiin. Tyyppi ruiskutetaan autoon puomilla, joka menee säiliön sisään, samalla kun betonia sekoitetaan. Texasissa 2003-vuonna tehdyssä testissä valmistettiin 6 m³ betoniannos, jonka lämpötila oli +35°C. Tämän jälkeen siihen suihkutettiin nestemäistä tyypeä kahdeksan minuutin ajan. Tällä tavalla betonin lämpötilaa saatiin laskettua 11°C verran. Kyseisessä urakassa, jossa tätä testattiin, oli järjestetty läpiajettava jäähdytyspiste työmaan läheisyyteen, jossa tekniikko hoiti jäähdytyksen. (Beaver 2004) Vastaavanlaista jäähdytystä tapahtuu kuvassa 9.



KUVA 9. Nestemäisellä typellä betonin jäähdytystä (Ataalla 2016)

4.5 Ohjeet suomalaisissa teksteissä

Vanhoissa Suomalaisissa ohjeissa on myös mainintoja betonin lämpötilan alentamisesta ja sillanrakennustöiden valvontaohjeessa vuodelta 1983 on likimääräinen laskukaava, kuinka suuri vaikutus on minkäkin osa-aineen lämpötilalla.

$$T_b = \frac{RT_t + CT_c + 5WT_w}{R + C + 5W}$$

jossa,

R = runkoaineen määrä kg/m³

C = sementtimäärä kg/m³

W = käytetty vesimäärä kg/m³

T_r = runkoaineen lämpötila °C

T_c = sementin lämpötila °C

T_w = veden lämpötila °C

(Sillanrakennustöiden valvontaohje 1983, 24)

Kaavan mukaan voidaan todeta, että alla listatuilla toimenpiteillä pystyttäisiin alentaa betonimassan lämpötilaa 1°C verran

- Sementin lämpötilaa lasketaan 10°C
- Kiviaineksen lämpötilaa lasketaan 1,6°C
- veden lämpötilaa lasketaan 3,6°C
- vedestä korvataan jäähileellä 6 kg/m³

(Sillanrakennustöiden valvontaohje 1983, 24)

Käytännössä yllä mainituilla osa-aineiden jäähdytyksillä voidaan betonimassan lämpötilaa alentaa seuraavasti:

- kuuman sementin välttäminen 2–3°C
- kiviaineksen suojaus ja jäähdytys 5–10°C
- veden jäähdytys 3–6°C
- jäähileen käyttö 5–10°C

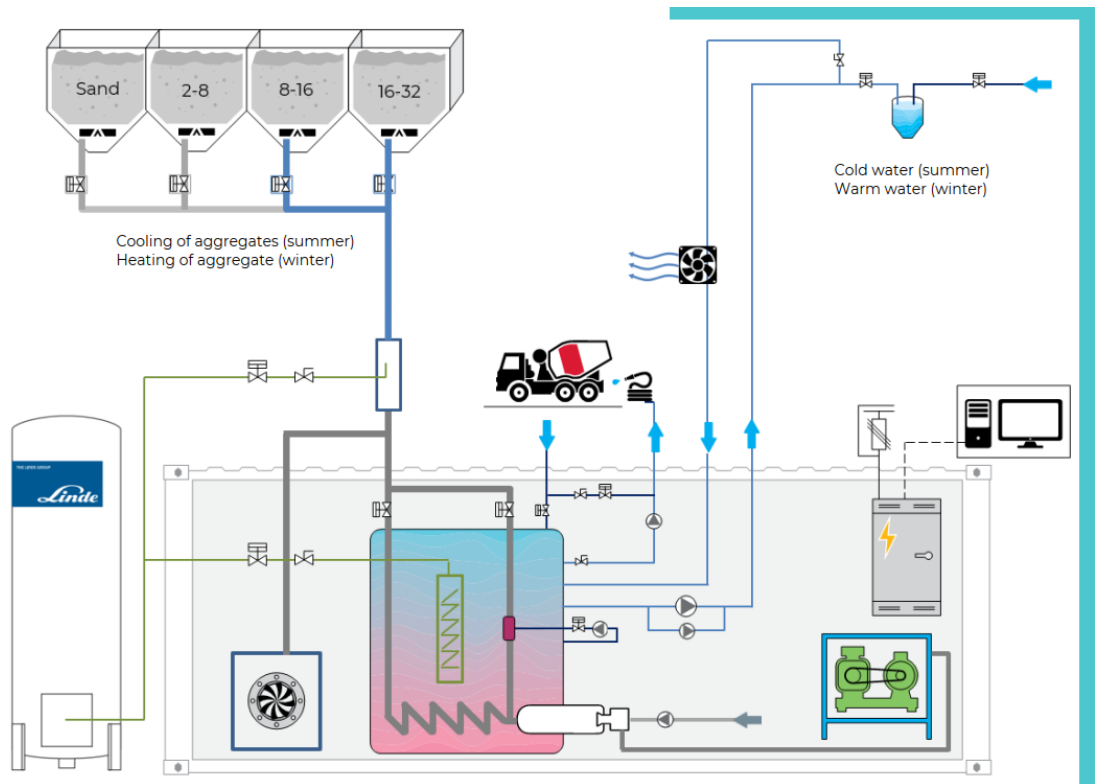
(Sillanrakennustöiden valvontaohje 1983, 25)

Laskenta perustuu samankaltaisesti lämpökapasiteettien laskuun, kun aiemmatkin laskut. Ominaislämpökapasiteetit suurin piirtein samaa luokkaa niin sementillä kuin myös kiviaineksilla, joka on riittävän tarkka tapa ja veden kapasiteetti viisinkertainen näihin verrattuna.

4.6 Järjestelmät Suomessa

Suomessa betonitehtailla on paljon lämmityskalustoa, sen sijaan jäähdytyslaitteistot on vielä harvinaisia. Suomessa jäähdytysratkaisuja tarjoaa tamperelainen yritys nimeltä Polarmatic Oy, joka toimittaa tuotteitaan ympäri maailmaa. Tarjolla on jäähdytysratkaisuja, joissa hyödynnetään olemassa olevia kuuman veden tankkeja, jotka hyödynnetään lämpimänä kautena kylmän veden tankkeina. Kylmä vesi tuotetaan kylmälaitteistojen avulla. Vaativampaan jäähdytykseen on myös tarjolla nestemäistä tyypeä hyödyntäviä laitteistoja, joilla voidaan jäähdyttää kiviainesta sekä vettä. Jäähdyttäminen tapahtuu kiviaineksen osalta ruiskuttamalla nestemäistä tyypeä kivisäiliöön ja veden osalta vesitankkiin asennetaan

lämmönvaihdin, joka jäädyttää veden kuvan 10 osoittamalla tavalla. (Polarmatic n.d.)



KUVA 10. Nestemäistä typpeä käyttävä jäädytys (Polarmatic n.d.)

Polarmatic Oy:n toimitusjohtajan Mia Kauhasen mukaan Suomeen ei ole vielä toimitettu jäädytysratkaisuja, mutta kyselyitä tulee koko ajan enemmän myös täällä kotimaassa. (Kauhanen 2023)

5 YHTEENVETO JA POHDINTA

5.1 Yhteenveto

Lämpötilan hallintaan löytyy jonkin verran keinoja, mutta asiaan ei yksittäistä ratkaisevaa tekijää ole. Betonin reseptillä pystytään vaikuttamaan hieman maksimilämpötilaan masuunikuonan avulla, ongelmaksi tulee, että sitä käytettäessä tarvitaan myös sementtiä lisää. Masuunikuonan kanssa täytyy siis löytää se resepti, millä sen lisääminen on vielä kannattavaa eikä sementtimäärät käy järjetömiksi. Ongelmana tässä on myös ollut masuunikuonan saatavuus.

Sementin valinnalla ei saa ihmeitä aikaan, kun valitaan markkinoilla olevia tuotteita ja nähtäväksi jää miten kolmossementti tulee toimimaan massiivisissa rakenteissa. LH-sementillä voisi olla hyvinkin ratkaiseva tekijä mutta tuotantoa tälle ei enää ole. Sementin määrään ei myöskään voi pahemmin vaikuttaa, sillä luonnollisesti tiettyä lujuutta vaadittaessa tarvitaan riittävästi sideainetta. Pitäisi kuitenkin muistaa, että massiiviseen rakenteeseen ei kannata suunnitella suuren lujuuden betonia.

Betonitehtaalla pystytään vaikuttamaan suuresti betonin lämpötilaan, parhaiten investoimalla siihen tarkoitettuihin nestetyypilaitteistoihin. Kuitenkin pitämällä runkoaine mahdollisimman viileänä varjossa, jäähdyttämällä sitä vedellä ja käyttämällä kylmää vettä suhteituksessa pitäisi saada jonkinlaisia tuloksia aikaan. Jään käytöllä suhteituksessa saa myös selviä tuloksia, sen ongelmina on hankinta betonitehtaalle, varastointi sulamatta ja annostelu myllyyn.

Työmaalla kannattavinta on aikatauluttaa työt siten, että kuumina vuodenaikoina ei tarvitse valaa paljoa massiivisia rakenteita, milloin raaka-aineet sekä kelit ovat kuumia. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, aikataulut ovat tiukoja ja lämpöjen hellittämiseen ei ole ikuisesti aikaa odotella. Ja käytännössä vuodessa voisi valaa vain joko syksyllä tai keväällä, joka rajoittaisi rakentamista suuresti. Jos kuumalla on pakko valaa, eikä betonitehdas kykene riittäviin toimenpiteisiin on harkittava jäähdytysputkistoja, jotka vaativat rakentamiseen paljon aikaa sekä käyttöön ylimääräisiä laitteistoja kuten pumppuja. Mahdollista on

myös korottaa betonin lujuutta ja hyväksyä tapahtuvaa lujuuskatoa, ongelmana vain on, että lujuutta lisätessä myös lämpöä tulee lisää ja lämmön lisääntyessä myöhästyneen ettringiitin vaara lisääntyy.

5.2 Pohdinta

Lämpötilojen kohoaminen valussa on ongelma, jonka usea siltaurakoitsija kohtaa rakentamisen aikana. Tässä opinnäytetyössä tavoitteena oli etsiä tälle syytä, mitä siitä aiheutuu ja miten sitä voidaan hallita. Lopuksi kohdassa yhteenveto oli summausta mitä voidaan käyttää missäkin tilanteessa. Lopputuloksena oli siis tavoitteiden mukainen tietopaketti asiaan, jota Suomessa ei ole tutkittu vielä paljoa. Massiivisista rakenteista aiemmin tehdyissä opinnäytetöissä lämpötilannousua ei käsitellä kattavasti, ja materiaali pohtii lähinnä tuotantotekniikkaa, joten tämän opinnäytetyön aihe lienee hyvä lisäys aiemmin tehtyihin töihin.

Valujen jäähdytys on Suomessa vielä melko tuntematonta ja mitään yhtenäistä tietoa tai ohjeistusta ei asiasta löydy. Parhaat tavat ja käytännöt löytyvät ulkomailta lämpimistä maista, joissa rakennetaan paljon. Tietoa näistä on kuitenkin melko vaikea löytää, koska osa on yrityksien sisäistä tietoa ja kaikkia asioita ei luonnollisesti ole käännetty englanniksi, saattikka sitten suomeksi. Myöskään suunnitteluosaamista ei tältä alalta paljoa Suomesta löydy, jolloin vastuu esimerkiksi jäähdytysputkistoiden käytöstä on suurelta osalta työmaalla.

Osasta suomalaisista lähteistä, joissa on ollut jotain tietoa aiheesta huomaa, että tietoa katoaa matkan varrella. Esimerkiksi iäkkäässä sillanrakennustöiden valvontaohjeessa on paljon hyödyllistä tietoa mitä ei nykyohjeista enää löydy. Nykyisissä ohjeissa onkin enemmän laveita ohjeistuksia, joista tehdään omat johtopäätökset.

Aiheessa heräsi myös kysymys, kenelle kuuluu vastuu betonin lämpötilasta, kun valu aloitetaan. Tehokkaimmat jäähdytyskeinot tapahtuvat betonitehtaalla, mutta kysyntä on kuitenkin melko pientä ja tarvittava kausi lyhyt. Laitteistot ovat kalliita ja investoinnit suuria, jos niitä tarvitaan muutamia kertoja kesässä. Kuitenkin betoni tilataan oletuksella, että se on lämpötilan suhteen tietyn skaalan

sisällä, johon ei välttämättä kuumimmilla ajanjaksoilla ole mahdollista päästä ilman jäähdytyslaitteistoja. Ongelma on yhteinen niin tilaajan rakentajan ja betoninvalmistajan kesken, mutta tällä hetkellä vastuuta siitä ottaa lähinnä rakentamispuoli. Asiassa täytyisikin käydä keskustelua kaikkien osapuolien kesken, että löydettäisiin paras ratkaisu.

Partekin (vanha toiminimi) lakkautettu LH-sementti voisi myös ratkaista suuren osan ongelmista, koska sen alhaisella lämmöntuotolla voitaisiin valaa huomattavasti kuumemmilla keleillä, kuin nykyisten vaihtoehtojen sementeillä. Tässä opinnäytetyössä ei selvitetty miksi tuotanto lakkautettiin, mutta jatkotutkimuksia voitaisiin tehdä yhteistyössä Finnsementin kanssa, samankaltaisen tuotteen tuonnista uudestaan markkinoille. Kysyntää tuotteelle olisi juuri massiivisten rakenteiden ja siltojen rakentajilla.

Työ suosittaa myös vaurioiden jatkotutkimusta. Myöhästyneen ettringiitin syntymää on tutkittu jonkin verran maailmalla ja on todettu, että ongelma on todellinen ja toimenpiteitä on tehty, jotta siltä vältyttäisiin. Näissä tutkimuksissa nousee esille kaksi asiaa, lämpötila ja kosteus. Tutkimuksia ei kuitenkaan löytynyt (työn tekijä ei löytänyt) maista, jossa on samankaltaiset olosuhteet kuin Suomessa, jossa pakkasrasitus ja talvikauden kesto on merkittävä. Kuten suomalaisessa kirjallisuudessa mainitaankin ilmiö voi ilmetä pakkasrapauman kaltaisena, koska se aiheuttaa nimenomaan heikentyntä pakkausrasituksen kestoja, jonka vuoksi tämä olisi suomen olosuhteissa omiaan lisävahingoittamaan rakenteita. Aihetta olisi myös hyvä tutkia siinä mielessä, että ilmiöstä tiedetään melko vähän. Tiedetään että ongelma on olemassa, mutta ei tiedetä, kuinka vakava se on. Tämä johtaa siihen, että lujuuskato olisi huomioitu kovemalla betonilla, mutta ollaan varuillaan siitä syystä, että myöhästyntä ettringiittireaktiota alkaa ehkä tapahtua. Väylävirastolla ei ollut työn kirjoitus hetkellä tutkimusta aiheesta eikä sellaista ollut suunnitteilla.

LÄHTEET

American Concrete Institute. 2005. Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete.

American Concrete Institute. 2010. Guide to Hot Weather Concreting.

American concrete Institute. 2020. Cooling and Insulating Systems for Mass Concere. (teksti osittain tekijän hallussa)

Ataalla. M. 2016. Cooling Concrete using Liquid Nitrogen. LinkedIn. Viitattu 20.3.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/cooling-concrete-using-liquid-nitrogen-mina-ataalla>

Beaver. W. 2004. Liquid Nitrogen for Concrete Cooling. Concrete International. Viitattu 16.3.2023. https://www.sefindia.org/forum/files/liquid_nitrogen_110.pdf

Finnsementti. n.d. Sementit. Viitattu 15.3.2023. <https://finnsementti.fi/tuote-osasto/sementit/>

Godart, B. & Divet, L. 2013. Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy. HAL open science. Viitattu 6.4.2023 <https://hal.science/hal-00945667/document>

Infraryl 2022/2. Rakennustieto. Viitattu 9.2.2023. https://ryl.rakennustieto.fi/ryl/infraryl/2022_2/

Kauhanen, M. Toimitusjohtaja Polarmatic. Sähköpostiviesti 8.3.2023

Linde-gas. n.d. Typpi. Luettu 8.3.2023. https://www.linde-gas.fi/fi/products-ren/bulk_gases/nitrogen/index.html

Lyytinen, J. 2022. Masuunikuonan puute vaivaa sementin tuotantoa Suomessa. Rakennuslehti. 7.10.2022.

Partek 1990. Partekin sementit. Sideaineet SA-11. Partek Ab:n tuote-esite (Finnsementin toimittama esite)

Polarmatic. n.d. Coolmatic. Energy-Efficient Cooling for Concrete Batch Plants. (Polarmaticin toimittama tuote-esite.)

Pyy, H. 2022. Betonirakenteiden korjaaminen 2022. Betonirakenteiden kemialliset vauriot. Suomen Betoniyhdistys ry. Viitattu 6.3.2023. <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit/betonirakenteiden-korjaaminen-ja-tutkiminen/hannu-pyy-betonin-korjauskurssi-2023-kemialliset-vauriot.pdf>

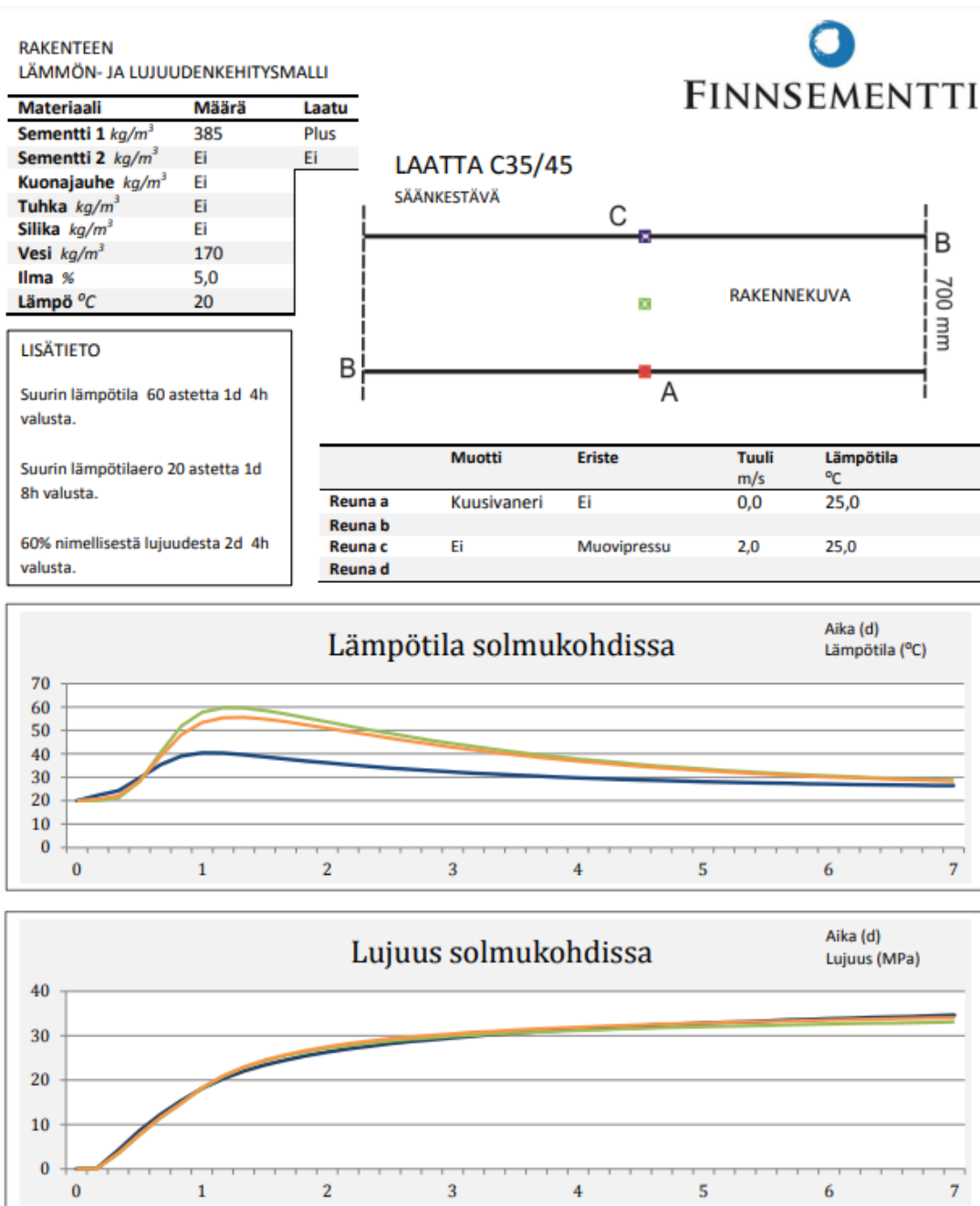
Raitiotieallianssi. Raitiotieallianssin projektipankki. Viitattu 3.4.2023. (Vaatii käyttöoikeudet)

- Roush, K. & O'Leary, J. 2005. Cooling Concrete with Embedded Pipes. Concrete international. Viitattu 15.2.2023 <https://www.proquest.com/docview/198721391/fulltext/852FE00333664DA0PQ/1?accountid=14242> (vaatii käyttäjätunnukset)
- Semco. 2015. A Closer Look at Concrete Cooling Systems: The Flake Ice Plant. Viitattu 1.3.2023. <https://semcoice.com/closer-look-concrete-cooling-systems-flake-ice-plant/>
- Shashi, E. 2015. Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual. Viitattu 17.3.2023 <https://www.sciencedirect.com/book/9781856178303/transmission-pipeline-calculations-and-simulations-manual> (vaatii käyttäjätunnukset)
- Shaw, J. 2012. A case study of mass concrete construction for Midwest boarder bridges. Iowa State University. Viitattu 22.3.2023 <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/2c761f0c-c42e-4c47-ae41-4456d0eabdeb>
- Suomen Betoniyhdistys ry. n.d. Betonitieto verkkosivu. Massiiviset rakenteet. Viitattu 10.2.2023. <https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/betonin-valu-ja-tiivistys/erityisrakenteet/massiiviset-rakenteet.html> (vaatii käyttäjätunnukset)
- Suomen Betoniyhdistys ry. n.d. Betonitieto verkkosivu. Sementti. Viitattu 10.2.2023. <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-valmistus/betonin-osa-aineet/sementti.html> (vaatii käyttäjätunnukset)
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonitekniikan oppikirja 2018 by 201. Helsinki: BY-Koulutus Oy
- Suomen Betoniyhdistys ry, Suomen rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2019. Betonirakenteiden työmaatoteutus. BY 71. RIL 149-2019
- Tammertekniikka. 2019. Tekniikan kaavasto. 19. painos. AMK-Kustannus Oy
- Taylor, H. 2001. Delayed ettringite formation. Cement and concrete research. Materialstoday. Viitattu 6.4.2023 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601004665> (koko versio vaatii käyttäjätunnukset)
- Tie – ja vesirakennuslaitos. 1983. Sillanrakennustöiden valvontaohje. 3500 paikalla valetut betonirakenteet. <https://www.doria.fi/handle/10024/132334>
- Työterveyslaitos. n.d. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet. Typpi. Viitattu 8.3.2023. <https://ova.ttl.fi/typpi>
- Vellamo. n.d. Tampereen Vesi. Viitattu 20.2.2023 <https://vellamo.tampere.fi/about>
- Väylävirasto. 2020. Infrabetonien valmistus. Väyläviraston ohjeita 41/2020. Viitattu 8.2.2023. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf

Väylävirasto. 2022. Eurokoodin soveltamisohje. Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Väyläviraston ohjeita 5/2022. Viitattu 8.2.2023. https://ava.vayla-pilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-5_NCCI_2_web.pdf

LIITTEET

Liite 1. Finnsementin lämmön- ja lujuudenkehitysmalli.



Oheisena olevat tulokset perustuvat laboratorio ja kenttäkokeiden avulla määritettyihin sementin lämmöntuoton, kypsyyssasteen ja lujuudenkehityksen välisiin riippuvuuksiin. Tuloksiin vaikuttavat voimakkaasti ulkoilman lämpötila, tuulen nopeus ja suojauksen tai eristykseen huolellisuus ja oikea-aikaisuus. Tämän johdosta näillä laskelmilla Ei voi korvata työnaikaista lujuuden seurainta, joka on suoritettava Betoninormien mukaisesti esim. olosuhdekoekappaleilla tai rakenteen lämpömittausten avulla.